arXiv:2302.03481v1 [cs.HC] 7 Feb 2023

“我是跟随者，也是老板”：探索视障人士引导机器人的不同程度的自主性与机器形态

Yan Zhang 人工智能产业研究院，清华大学，中国北京
zhangyan@air.tsinghua.edu.cn

Ziang Li
人工智能产业研究院，清华大学
中国北京
lza85995@gmail.com

Haole Guo 人工智能产业研究院，清华大学，北京，中国
guohaole@air.tsinghua.edu.cn

Luyao Wang
人工智能产业研究院，清华大学
北京，中国
wanglydesign@163.com

Qihe Chen
人工智能产业研究院，清华大学
北京，中国
cqh9933@163.com

Wenjie Jiang
人工智能产业研究院，清华大学
中国北京
wenjie97strive@163.com

Mingming Fan
香港科技大学和技术（广州）
中国广州
香港科技大学和技术
中国香港特别行政区，中国
mingmingfan@ust.hk

Guyue Zhou
人工智能产业研究院，清华大学
北京，中国
zhouguyue@air.tsinghua.edu.cn

Jiangtao Gong*
人工智能产业研究院，清华大学
中国北京
gongjiangtao2@gmail.com

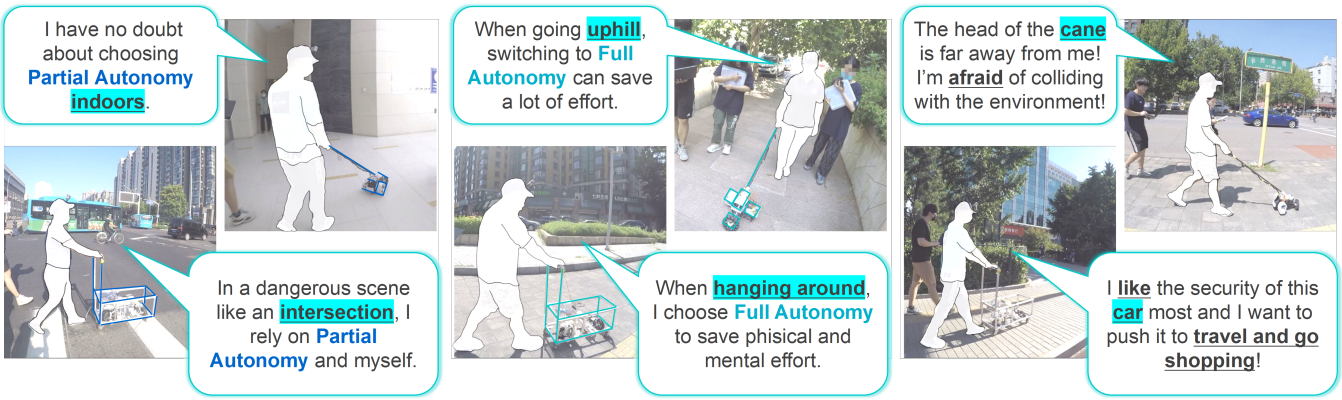

图1：通过展示实地研究中的照片和访谈，概述参与者对不同程度的自主性和机器形态的感知与使用。

*通讯作者

允许免费制作本作品全部或部分内容的数字版或纸质版副本，用于个人或课堂使用，但不得以营利或商业优势为目的复制或分发，且副本首页须附上此声明和完整引文。对于本作品中由作者以外的其他人拥有版权的组件，必须尊重其版权。注明出处后，允许摘录。以其他方式复制、转载、发布到服务器或分发至列表，均须事先获得明确许可和／或支付费用。请向 permissions@acm.org 申请许可。*CHI '23，2023年4月23日至28日*，德国汉堡© 2023 版权归所有者／作者所有。出版权已授权给ACM。ACM ISBN 978-1-4503-9421-5/23/04...$15.00
https://doi.org/10.1145/3544548.3580884

摘要

近年来，研究者开始探索以手杖或汽车形态呈现的引导机器人，以帮助盲人和低视力人士（BLV）。这类机器人在引导时可以实现完全自主或部分自主。然而，不同形态和自主程度的引导机器人的优缺点仍不明确。我们旨在填补这一空白。我们设计了可切换自主程度的引导机器人手杖和汽车机器人，并针对盲人和低视力人士（BLV）开展了一项受控实验室研究（N=12）和一项实地研究（N=9）。结果显示，在受控研究中，完全自主带来了更好的行走表现和主观评价；而在自然环境中，参与者因需要更多控制而更多地使用部分自主。

此外，与手杖机器人相比，汽车机器人展现出更高的安全感和导航效率。我们的研究结果为盲人和低视力群体如何看待不同机器形态和自主程度提供了实证证据，可为辅助机器人的设计提供参考。

CCS 概念

• **以人为中心的计算 → 无障碍性的实证研究**。

关键词

引导机器人，视力障碍，导航，自主程度，机器形态，控制，信任，安全性

ACM 引用格式：

Yan Zhang、Ziang Li、Haole Guo、Luyao Wang、Qihe Chen、Wenjie Jiang、Mingming Fan、Guyue Zhou 和 Jiangtao Gong。2023。"我是跟随者，也是老板"：探索视障人士引导机器人的不同程度的自主性和机器形态。载于《*2023*年计算系统中的人为因素 *CHI* 会议论文集》（*CHI '23*），*2023*年*4*月*23*日至*28*日，德国汉堡。ACM，美国纽约州纽约，22页。https: //doi.org/10.1145/3544548.3580884

1 引言

至少自22亿人受到视力障碍影响以来 [63]，高效且安全的导航辅助技术一直被视为解决盲人和低视力群体独立移动困难的方法。长期以来，智能引导设备的开发在商业和学术领域从未停止。

迄今为止，人们已经尝试了各种机器形态设计 [6, 35, 41, 61, 64, 67] 。

对于具有接地式动觉反馈 [51], 且效率最高的机器形态，研究者主要关注两种：手杖 [40,51, 55, 60] 和汽车 [16, 26, 58, 64], 。交互式辅助机器人的机器形态对人机协作的效率和体验有着至关重要的影响，例如信任 [1, 23], 、陪伴 [11], 和沟通 [33, 46]。然而，尽管已有许多设想和尝试，关于接地式引导机器人的机器形态如何影响导航效率和用户体验，目前仍缺乏全面而深入的研究。

与此同时，当前的引导机器人采用了不同程度的自主性。一种完全自动化的行李箱机器人 [26] 应运而生，可实现精准导航，用户只需握住它并跟随它即可；而一种部分自动化的引导手杖 [51] 则经过开发，可用于转向和避开障碍物，同时让用户通过推动手杖来控制向前运动。自主程度是人机交互 [53], 的基本因素之一，吸引了许多人机交互研究者探究用户在不同情境下对自主性水平的感知和使用情况 [15, 44]。然而，部分自主对于引导机器人的设计是否必要这一问题尚未得到探讨。该问题有助于了解盲人群体并设计出用户友好的引导机器人。

为填补上述两个空白，本文设计了两种引导机器人，分别采用手杖和汽车形态，并开展了一项受控研究和一项实地研究，共有十九位参与者参与，以回答上述问题。结果显示，与普遍看法相反，盲人及低视力人士更偏好汽车形态的机器人，而非手杖形态的机器人；尽管其便携性和熟悉度较低，却可能带来更强的安全感。对于不同程度的自主性，参与者在不同条件下表现出不同的选择。在受控且安全的环境中，完全自主在提升移动能力和改善体验方面效果最佳；而在自然环境中，参与者最偏好部分自主。

本研究的贡献包括：i）设计并开发了两种可切换自主程度的手杖形态和汽车形态引导机器人；ii）开展受控研究，比较不同自主性水平和机器形态的引导机器人的导航效率和用户体验；iii）开展实地研究，考察盲人在自然环境中对自主程度和机器形态的偏好；iv）为引导辅助机器人设计提供见解，分别涵盖机器形态和自主程度。

2 相关研究

本节回顾了各种接地式导航机器人，重点关注机器形态这一特征，随后深入探讨了人机辅助机器人系统中的自主程度。

2.1 采用不同机器形态的现有接地式机器人

与使用视觉、音频、触觉或非接地式动觉反馈的引导设备 [2, 7, 19, 22, 25, 28, 36–38、40、48、49、55–57, 60, 66],相比，采用接地式动觉反馈、能够提供直观转向反馈的引导机器人已被证明具有更高的导航效率 [51]。引导机器人的设计框架主要基于两种形态：手杖形态符合视障人士的感知方式和习惯；汽车形态则更注重机器人机构的稳定性。

2.1.1 手杖形态的引导机器人。引导机器人手杖具有便于携带、重量轻以及为为盲人及低视力群体所熟悉等优点。便携式白手杖与导盲犬的理念被融合到配备电机和车轮的机器人手杖"roji"中，为视障人士提供导航 [50]。白木、平田和菅家 [54]开发了一种智能被动式手杖原型，其结构类似机器人手杖，但不具备主动动力，能够引导用户前往目的地并避免跌倒。作者指出，手杖形态的优势在于尺寸小、重量轻。另一种引导手杖配备了接地式滚动杖头 [68, 70]。Ye 等人 [68] 表示，他们的设计基于这样一个事实：白手杖已在视障人士群体中被广泛用作行动辅助工具。

然而，受手杖结构的限制，手杖形机器人在稳定性、抗干扰能力和承载能力方面存在明显不足。一项用户研究邀请了10位盲人和低视力参与者，使用一款能够沿路径行进的机器人手杖进行测试 [17]。结果显示，用户对实时引导、可靠反馈和友好界面感到满意。然而，一次试验未能成功，因为参与者拉得太用力，导致机器人无法正常移动。这表明，受机械结构影响，手杖形机器人可能

无法在不可控环境和人类行为面前保持足够的稳定性和稳健性。Slade、Tambe和Kochendefer（2021）设计了一款便携式增强型手杖，配备一个用于引导转向方向的转向全向轮 [51]。移动性指标的积极结果证明了该设计的可用性。尽管作者采用了各种方法减轻重量，参与者仍认为它很重，因为这款仅配备一个车轮的手杖机器人无法自平衡。

2.1.2 汽车形态引导机器人。 除了手杖形态外，汽车形态机器人更为常见，也更适配机器人技术。尽管这两种形态都已发展出实用的引导功能，但尚未有研究比较各自外形尺寸对导航效率和用户体验的影响。手推车、行李箱乃至四足机器人都可归类为汽车形态导航辅助机器人；这类机器人在物理上较为显眼，并在集成功能、承重和提供安全性方面具有优势。

行李箱式引导机器人 Cabot [26], 旨在融入环境，并通过位于用户左侧、配备扶手来模仿导盲犬的互动能力。盲人和低视力用户高度赞扬了 Cabot 带来的舒适感、自信感和安全感。Kayukawa 等人 [29]提出了另一种汽车形态导航机器人，它行走在用户右侧，在传感器和处理器的选择上与前一种机器人保持一致。他们组装了激光雷达、立体相机和笔记本电脑，这些设备几乎无法应用于白手杖上。汽车形态引导机器人除了位于用户侧边，也可以像手推车一样处于用户前方，例如 LIGHBOT [58]。LIGHBOT 的开发旨在解决设施内部的移动障碍，并获得了积极反馈：用户认为移动更轻松、更安全，也更有信心。利用汽车形态的结构稳定性，一些引导机器人还承担了行走辅助功能，既承受了负载，也分担了人体倚靠时的重量 [34, 43]。

此外，手杖形态与汽车形态之间明显的差异可能会对用户的认知产生重要影响。以往研究着重于开发和改进某一种形态，试图掩饰其弱点并放大其优势，但尚未比较研究盲人及低视力人士对两种引导机器人形态的权衡取舍。手杖形态和汽车形态各自的优势与局限给盲人及低视力人士带来的整体感知，可为设计用户友好的引导机器人提供启示。

2.2 辅助机器人自主性水平

与自动驾驶的发展相同，导航机器人的自主程度正从半自动向完全自动演进。机器人完成任务的自主性框架分为三个方面：感知环境、规划移动路线，以及对环境采取行动 [9]。控制权的分配将人机交互中的自主程度分为由人类控制、由机器人控制或共享控制 [5, 8, 53]。机器人应在哪些方面以及在多大程度上自动执行任务，是实现有效人机协作的关键。

关于人类对不同自主性等级的感知，例如控制感 [15, 69], 信任 [44], 和安全性 [4]，已有相关讨论。辅助机器人对残障人士的影响已从许多方面进行探讨。研究发现，尽管完全自主能够带来很高的效率，用户仍需要能够进行控制。然而，对于视障人士如何看待部分自动化和完全自动化的引导机器人，以及他们在不同情境下对调整自主程度的需求和偏好，目前仍缺乏研究。

一项研究以机器人辅助进食系统为基础，探讨残障人士对自主程度的看法 [10]。研究者提出了三种自主模式，可为用户提供不同程度的控制权。研究发现的结果与先前研究一致：完全自主能够减轻用户的负担并提高其独立性。然而，参与者指出，错误的存在推翻了自主程度越高就总是越好的结论。他们还表示希望能以简单直接的方式控制速度。另一项研究 [30], 报告了一项为期三周的研究结果：研究对象是兼具手动和自主模式的机械臂，旨在帮助脊髓创伤患者完成拾取与放置任务。结果显示，尽管自动模式减轻了用户的负担，但他们的满意度并未如预期般提高。此外，参与者表示，使用自主模式时希望配备输入界面，这反映了他们希望拥有控制权。

许多研究探讨了不同程度的自主性，甚至研究了自主性可切换的行走辅助机器人。一项关于安全步行技术的研究发现，仍需使用行走辅助设备的人依然需要掌握控制权 [27]。Morris 等人 [43]为老年人设计了一款汽车形态的行走辅助机器人，具备部分自主和完全自主两种模式，并配有力传感器界面。研究已证明自主性可切换行走机器人的可用性。这种设计让用户能更灵活地选择所需的自主程度，但研究并未观察用户在不同模式下的偏好和表现。

对于面向视障人士的非完全自动化引导辅助机器人，控制权的分配至关重要，因为盲人失去了 90% 的感官信息，而这些信息包含导航所需的关键线索。尽管已有调查研究盲人及低视力群体对自动驾驶车辆的态度以及接管控制的意愿[12, 13], , 但尚无实证研究探讨盲人及低视力人士面对自主性和控制程度各异的移动辅助机器人时的实际行为。已有一些研究探索了部分自动化的引导机器人。Aigner 和 McCarragher [3] 开发了一款共享控制机器人手杖，能够通过转向避开障碍物，但将路线和目的地的选择留给用户。增强型手杖的设计 [51] 同样采用了将前进和转向控制权交由用户或机器人的理念，同时还能够引导手杖前往预设目标。

然而，上述关于引导机器人的文献仅关注某一自动化程度的开发与部署，未充分考虑一些关键问题。我们填补了研究空白，探究盲人和低视力用户对不同自主性水平的感知，以及他们对可切换自主控制的引导机器人的使用情况。为此，我们设计了两种可切换自主控制的引导机器人研究原型，分别采用手杖形态和汽车形态。

3 机器人设计

为了探究盲人及低视力群体对引导机器人规模的感知，我们提供了手杖形态和汽车形态两种机器人（图2）。两种机器人均具有两种不同的自主模式。在部分自主模式下，盲人及低视力人士通过推或拉机器人来控制其前进（或后退）的速度，而机器人负责横向转向。与之相对，完全自主模式则同时提供纵向移动和转向引导。最初，我们根据受控研究的环境构建了这两种引导机器人的室内版本。不过，考虑到实地研究中路面平整度状况较差，我们开发了升级版本，增加了减震结构和共享控制交互传感器，使用户能够自行切换自主控制。

3.1 硬件设计

手杖和汽车导航机器人大部分零部件相同（见表1）。

3.1.1 底盘设计。机器人通过垂直排列的横向和纵向全向车轮运动进行矢量求和，实现移动。通过切断纵向车轮电机的电流，机器人可以达到部分自主性。除两个主动轮外，手杖和汽车分别配有两个和四个辅助轮，以分担重量并保持平衡。

为提高实地研究中的通行能力，我们为机器人增加了独特的减震全向轮和双叉臂悬架结构。我们重新设计了传统的全向轮毂，留出额外的缓冲空间，并选用厚度为0.3 mm的锰钢片作为减震材料。三片锰钢片均弯折成“Ω”形，并以相同的间距安装，以实现减震效果。我们设计的双叉臂悬架结构与机动车上的结构相似。在主动轮的左右两侧各安装了一个弹簧，并在中间安装了两根连杆（图2）。此外，电机通过特定的铝制部件与连杆相连。

3.1.2 外形尺寸。机器人手杖的尺寸参照白手杖设计，机器人车的尺寸则参照导盲犬设计。此外，汽车的扶手采用刚性连接结构，其设计参考了导盲犬背带，因此能够更好地传递动觉反馈。

为适应不同用户的身高以及手握机器人手杖的不同姿势，用户手中的手杖部分可以围绕杖尖上下旋转。为使机器人汽车达到同样的目的，扶手的安装位置可以调节。

3.2 控制逻辑

两个引导机器人使用相同版本的控制逻辑。在受控研究中，我们部署了定位系统，使机器人能够自主导航。然而，考虑到实地研究中复杂的环境和安全性问题，我们开发了远程控制程序，以实现绿野仙踪方法。控制方法的详细描述将在“受控研究”和“实地研究”章节中的“研究方法”部分介绍。

4 研究1：受控研究

为了了解机器形态和自主程度如何影响受控环境中的导航效率和用户体验，我们使用设计部分介绍的机器人开展了一项2（机器形态：手杖、汽车）×2（自主程度：部分自主、完全自主）的受控用户研究。

4.1 研究方法

4.1.1 参与者。我们招募了十二名视障人士（男性 = 6 名，女性= 6名）参与本实验。所有参与者均无其他残疾，年龄介于21至47岁之间（M=32.42，SD=6.54）。由于我们的导航机器人系统设计为在人身右侧行走，因此筛除了左撇子受试者。能够使用白手杖是筛选标准之一。视障参与者的详细人口统计信息见表2。我们收集了每位参与者常用的辅助出行方式（出行辅助工具）。大多数人依靠白手杖出行，三人则总是由他人引导。一名低视力参与者有时不用白手杖，而是凭感觉行走。为控制无关变量，所有视力障碍程度不一的参与者均被蒙上眼睛。经机构审查委员会（IRB）批准后，我们获得了所有参与者签署的书面知情同意书。

4.1.2 实验设备与系统。图 3 显示，受控实验在一间 10m*9m 的大厅内进行，场地四周封闭，以避免受到干扰。两种形式的机器人都引导盲人及低视力人士在 8m*8m 的方形区域内沿预设路线行进。实验设备（即机器人）前端装有一个 HTC VIVE 追踪器，并搭载一块配有 HC-04 蓝牙模块的 Arduino UNO，用于接收移动指令。系统由四个 HTC VIVE 基站和一台服务器笔记本电脑组成：基站分别位于方形区域各边的中点，服务器笔记本电脑则负责计算并发送移动指令。（路径跟随方法的详情见附录A。）三台 GoPro摄像机以不同角度安装，用于视频录制。路线范围之外随机放置了一些障碍物，使模拟更加逼真。电机的控制指令以 4Hz 的频率更新。

为消除个体差异对移动能力的影响，实验采用传统白手杖和普通推车作为基线；普通推车的尺寸与汽车机器人相同。实验期间，每位参与者均使用白手杖、具有部分自主性和完全自主性的手杖机器人、与汽车机器人尺寸相同的普通推车，以及具有部分自主性和完全自主性的汽车机器人。

我们为汽车机器人提供了三种扶手样式：手提箱式、推车式，以及类似导盲犬的背带式。参与者可以自行选择最适合自己的扶手安装样式和高度。实验开始前，参与者可以为完全自主机器人选择步行速度，选项为 0.4m/s、0.6m/s 和 0.8m/s。参与者的选择列于表2。使用无动力手杖和手推车时，参与者会根据蓝牙耳机中播放的语音指令行进。PC服务器会自动计算位置并播放语音。

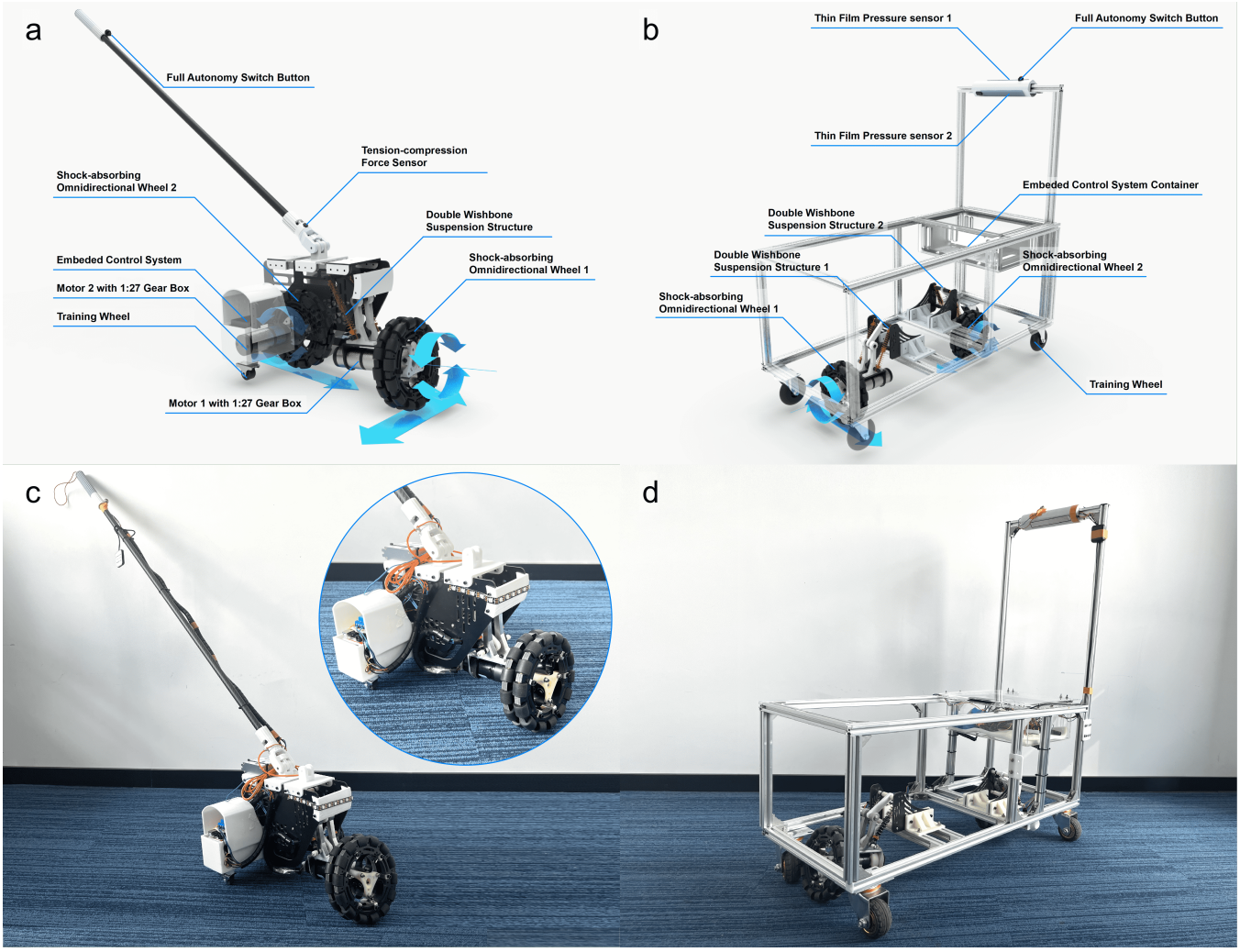

图2：自主性可切换的引导机器人手杖和引导车最终版本的模型与照片。(a) 引导手杖的渲染模型。(b) 引导车的渲染模型。(c) 引导手杖的照片。(d) 引导车的照片。

参与者走在路线左侧时，系统会播放“右”。参与者走在路线右侧时，系统会播放“左”。使用部分自主模式时，参与者可以自由地向前推动机器人，并按照机器人生成的转向指引转弯。使用完全自主模式时，参与者可以跟随速度预先设定的机器人。

我们使用自研手机应用辅助完成次要任务，具体将在“任务”一节中介绍。该应用每 3 秒随机选择两种振动模式之一并执行。参与者被要求用右手操作机器人，同时用左手拿着手机；如果当前振动模式与上一次相同，就触碰屏幕。随后，应用记录屏幕被触碰的次数并计算准确率。

4.1.3 任务。实验包含两个并行任务：主要步行任务和次要记忆任务。

主要任务旨在考察参与者的行走表现。行走任务路线由随机排列的六种不同转向（左转45°、左转90°、左转135°、右转45°、右转90°和右转135°）以及其间的直线路段组成。[2, 39, 65, 66]中也采用了类似的路线设计原则。受场地尺寸限制，整条路线设计为往返路线；每段长10米，包含三种不同的转向。参与者在每次试验中分两轮完成路线，两轮间隔2分钟。

次要任务旨在通过 N-back任务评估参与者的心理负荷。参与者在整个步行任务中都要完成包含两种振动模式的 1-back任务。持续 1 秒的短振动和持续 3 秒的长振动每隔 3 秒随机出现，受试者必须在间隔期间判断是否点击屏幕

表1：硬件规格

	Cane		Car	
	受控研究	实地研究	受控研究	实地研究
Size	290毫米x160毫米x142毫米，手杖长度为1米	347毫米x334毫米x199毫米，手杖长度为1米	770毫米x360毫米x300毫米	
结构材料	玻璃纤维、碳纤维，以及 ABS树脂	玻璃纤维、碳纤维，6061铝合金和 ABS树脂	方形铝管	方形铝管，6061铝合金、亚克力板
电机，Gear，和编码器	MD36NP27（84瓦，325转/分钟）配备1:27齿轮比，MD513（4瓦，293转/分钟）配备1:30齿轮比，以及霍尔编码器	MD36NP27（84瓦，325转/分钟）配备1:27齿轮比，和霍尔编码器	方形铝管	
车轮	直径 60 毫米和 127 毫米，全向轮；直径 22 毫米，塑料辅助轮	147毫米减震全向轮；直径 25.4 毫米，橡胶辅助轮	直径 127 毫米，全向轮；直径48毫米，塑料训练轮	147毫米减震全向轮；直径80毫米，橡胶训练轮
电池	直流12伏电池（2000毫安时）		直流12伏电池（5500 毫安时）	
蓝牙	HC-04		HC-04	
电机驾驶员	Waynestark 电机驱动器		Waynestark 电机驱动器	
嵌入式控制器	Arduino Mega 2560		Arduino Mega 2560	
定位	HTC VIVE	GPS	HTC VIVE	GPS

表2：受控研究参与者的人口统计信息

PID	性别	Age（岁）	先天性/后天性	视力损伤程度	视力损伤持续时间（年）	出行频率（次/周）	出行辅助工具	完全自主速度选择（手杖、汽车）
1	Male	25	先天性	失明	25	5	白手杖	0.8, 0.8
2	Male	33	后天性	失明	10	2	白手杖	0.8, 0.8
3	女性	36	后天性	低视力	10	几乎从不	白手杖	0.6, 0.6
4	女性	33	先天性	失明	33	2	白手杖	0.4, 0.4
5	女性	29	后天性	低视力	10	14	使用/不使用白手杖	0.4, 0.6
6	Male	33	后天性	失明	3	7	由他人引导	0.8, 0.6
7	Male	47	先天性	失明	47	7	白手杖	0.6, 0.6
8	女性	38	先天性	失明	38	14	由他人引导	0.8, 0.8
9	Male	21	先天性	失明	21	3	由他人引导	0.8, 0.8
10	Male	29	先天性	失明	29	5	白手杖	0.8, 0.8
11	女性	34	先天性	失明	34	1	白手杖	0.6, 0.8
12	女性	31	先天性	失明	31	10	白手杖	0.6, 0.8

。点击屏幕表示他们认为当前振动模式与上一次相同；否则，则表示两者不一致。[71] 中也采用了类似方法，来测量盲人及低视力人士使用导航辅助设备时的心理负荷。

4.1.4 流程。实验开始前，参与者先进行训练阶段，以熟悉机器人和任务。训练路线也由随机生成。参与者使用每种辅助器具完成训练路线，直到他们表示已掌握其使用方法。此外，实验人员向参与者演示了完全自主模式的三种前进速度，并请他们选择最适合自己的速度。实验期间将采用所选速度。随后，参与者反复尝试 1-back任务，直到确认他们理解了规则，并在一次 30 秒的试验中达到 80% 的准确率。

实验条件的顺序经过平衡处理。参与者表示准备就绪后，程序会在每次试验开始时随机确定一项路线任务。每位参与者都从同一地点出发（图 3）。次要任务与主要任务同时开始、同时结束。系统记录实时速度、偏离路线距离、时长、人类行走路径长度，以及 1-back任务的准确率。每次试验结束后，参与者填写辅助设备心理社会影响量表（PIADS）[20] 和系统可用性量表（SUS）[14]。实验结束后进行了结构化访谈，问题见附录 B。整个过程均有录像记录。

4.1.5 评估。

（1）行走表现：为分析引导机器人对参与者行走效率的影响，行走表现指标包括速度、时长、路径长度和

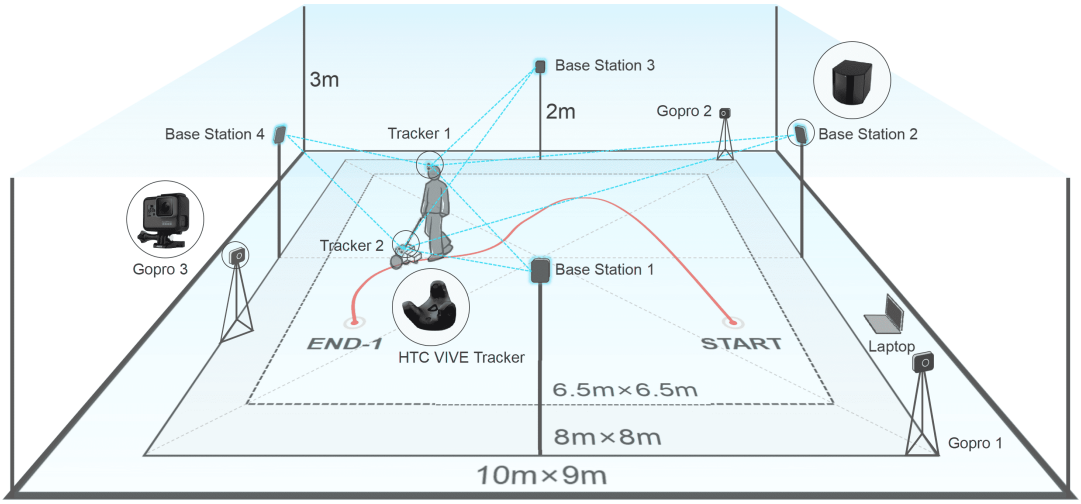

图 3：受控研究的实验设置示意图。图中以引导手杖和地面路径作为示例。

偏离路线距离。为消除个体行动能力差异造成的偏差，每个变量均减去无自主性基线条件下（使用普通白手杖和手推车）的数值。（2）心理负荷：为衡量参与者与引导机器人协作时的心理投入，计算并分析次要1-back任务的准确率。（3）可用性：各机器人的可用性可通过系统可用性量表（SUS）结果体现（见附录D）。（4）心理社会影响：PIADS旨在评估辅助器具对功能独立性、生活质量和幸福感的影响。由于评估辅助机器人对信任以及对控制感的满意度的影响是本实验的目的之一，因此在PIADS中补充了这两个条目（见附录D）。（5）主观感受：通过后测访谈了解参与者的主观感受。

基于边际均值进行双因素重复测量方差分析（方差分析）[52]，以分析定量测量结果。通过事后检验确定两两比较结果。事先检验了变量的正态分布和方差齐性。对于不符合正态分布的数据，采用弗里德曼双因素方差分析检验 [24]进行分析。置信区间设为 95%。

4.2 结果与讨论

所有参与者均已成功完成实验，共分析了24次试验的数据。图4展示了每种引导方法的实验轨迹结果示意图。导航开始前，控制程序随机生成了预设路线（橙色）。通过追踪器记录并绘制了人的轨迹（蓝色）和机器人的轨迹（红色）。可以看出，与基线白手杖和手推车相比，使用引导机器人时，用户的路径与预设路线更加吻合。

表 3：步行表现指标结果（平均值（标准差））。

	部分自主（基准测试）		完全自主（基准测试）	
	Cane	Car	Cane	Car
速度（米/秒）	-0.04 (0.17)	0.14 (0.18)	-0.02 (0.12)	0.08 (0.12)
时长（秒）	3.64 (6.77)	-3.00 (4.18)	-3.36 (5.64)	-4.19 (2.21)
路径长度(m)	1.02(1.90)	0.19 (1.92)	-0.34(2.06)	-2.12(2.33)
偏离路线距离(m)	-0.12 (24.75)	-6.19 (15.60)	0.52(17.99)	-33.77(16.96)

每种自主性与机器形态组合的总体偏好排名如图5所示。总的来说，全自动引导车最受欢迎，其次是部分自动化导引车、全自动手杖和部分自动化手杖。尽管一名参与者表示喜欢部分自动化手杖，但12名盲人参与者中有4名将其列为最后一名。参与者对传统白手杖持中立态度；普通推车最不受欢迎。

4.2.1 导航效率。如评估部分所述，步行表现指标已统一进行基准化，以抵消个体差异。结果见表3和图6。

在步行速度方面，参与者使用引导车时往往速度更快。自主性方面发现了显著差异。完全自主时，参与者的速度高于部分自主时（$M = 0.05$, $SD = 0.19$）（$M = 0.03$, $SD =$ 0.13 $F = 9.93$ $p = 0.01$, , ）。在机器形态和交互方面未发现相关证据。

就时长而言，除部分自主手杖（$M = 3.64$, $SD = 6.77$）外，所有机器人都优于基线。自主程度与机器形态之间存在交互效应（$F = 5.71$, $p = 0.04$）。事后分析表明

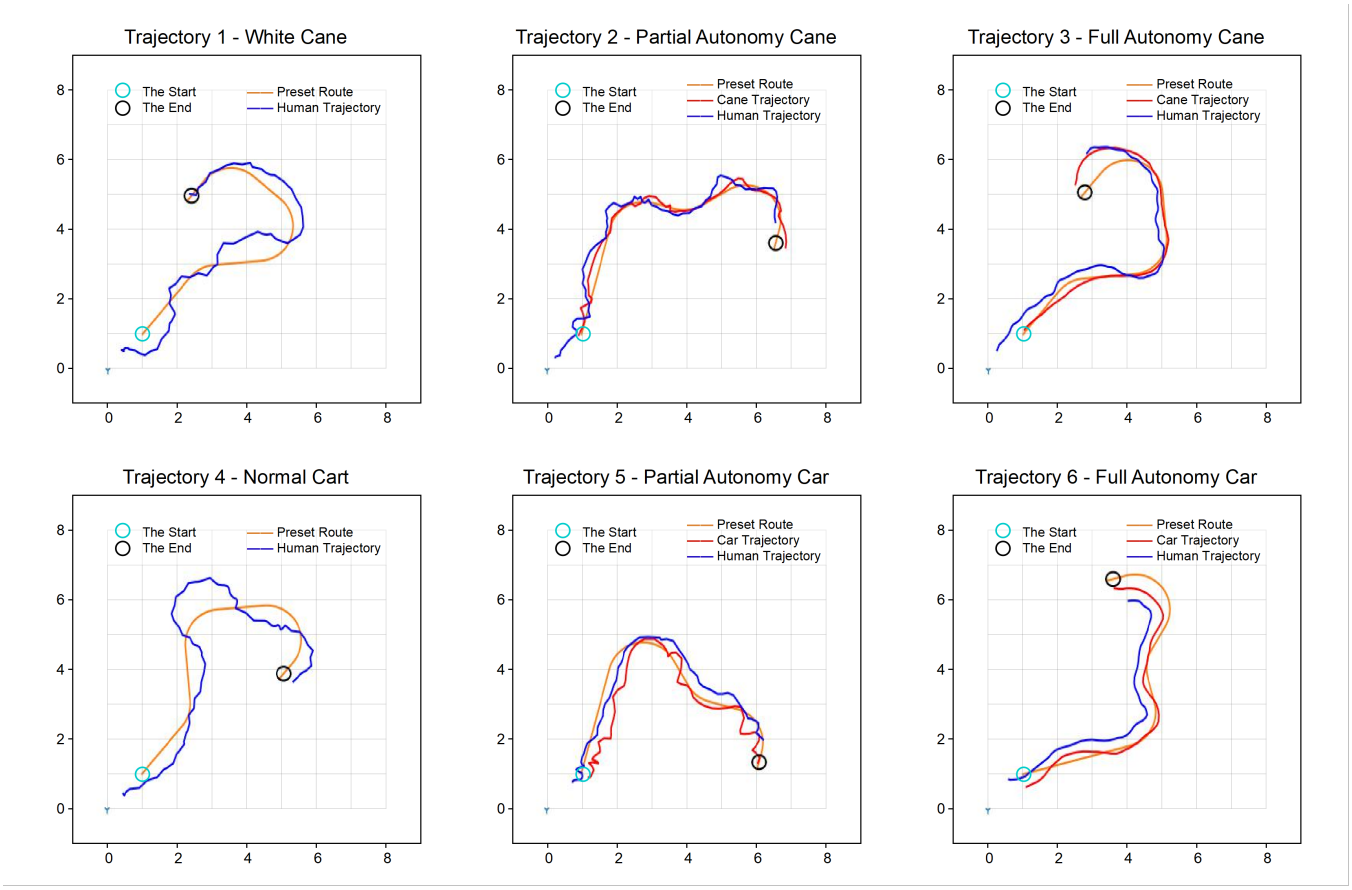

图4：受控研究中预设路线、机器人轨迹和人类轨迹的示例。

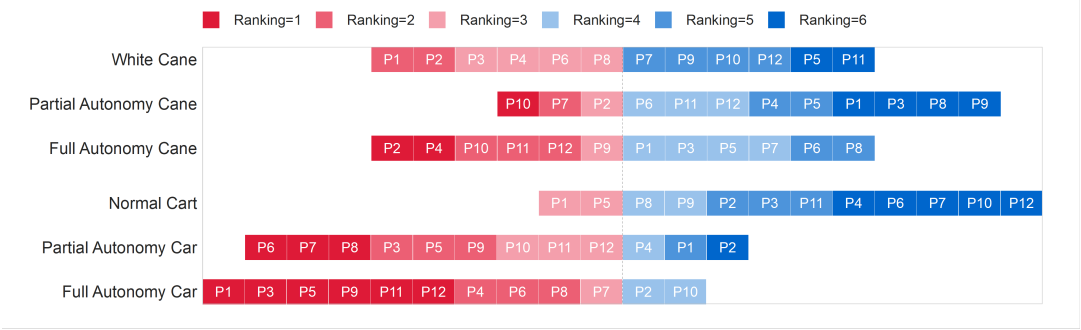

图5：参与者对基线白手杖、基线普通推车以及具有不同形态和自主性等级的机器人的偏好排名。

仅在使用部分自主模式时，机器形态才会产生影响。部分自动化导引车（$M = -3.00$，$SD = 4.18$，$F = 10.73$，$p = 0.01$）的时长短于部分自动化手杖（3.64 $SD = 6.77$ ，）。

此外，只有在使用引导手杖时，自主程度才会产生影响：全自动导引手杖（$M = -3.36$，$SD = 5.64$，$F = 9.19$，$p = 0.01$）的结果优于部分自动化导引车（$M = 3.64$，$S = 6.77$）。这一差异显著

使用汽车导航时（$M = -3.60$，$SD = 3.32$）比使用手杖时（$M = 0.14$，$SD = 7.06$，$F = 4.94$，$p = 0.05$）更短；完全自主时（$M = -3.78$，$SD = 4.21$）比部分自主时（$M = 0.32$，$SD =$ -6.46 $F = 9.37$ $p = 0.01$ ，，）更短。

就轨迹长度而言，只有引导车缩短了行进距离，这表明盲人能够更精准地跟随汽车。完全自主（$M = -1.23$，$SD = 2.33$，$F = 4.69$，$p = 0.05$）的路径长度短于部分自主（

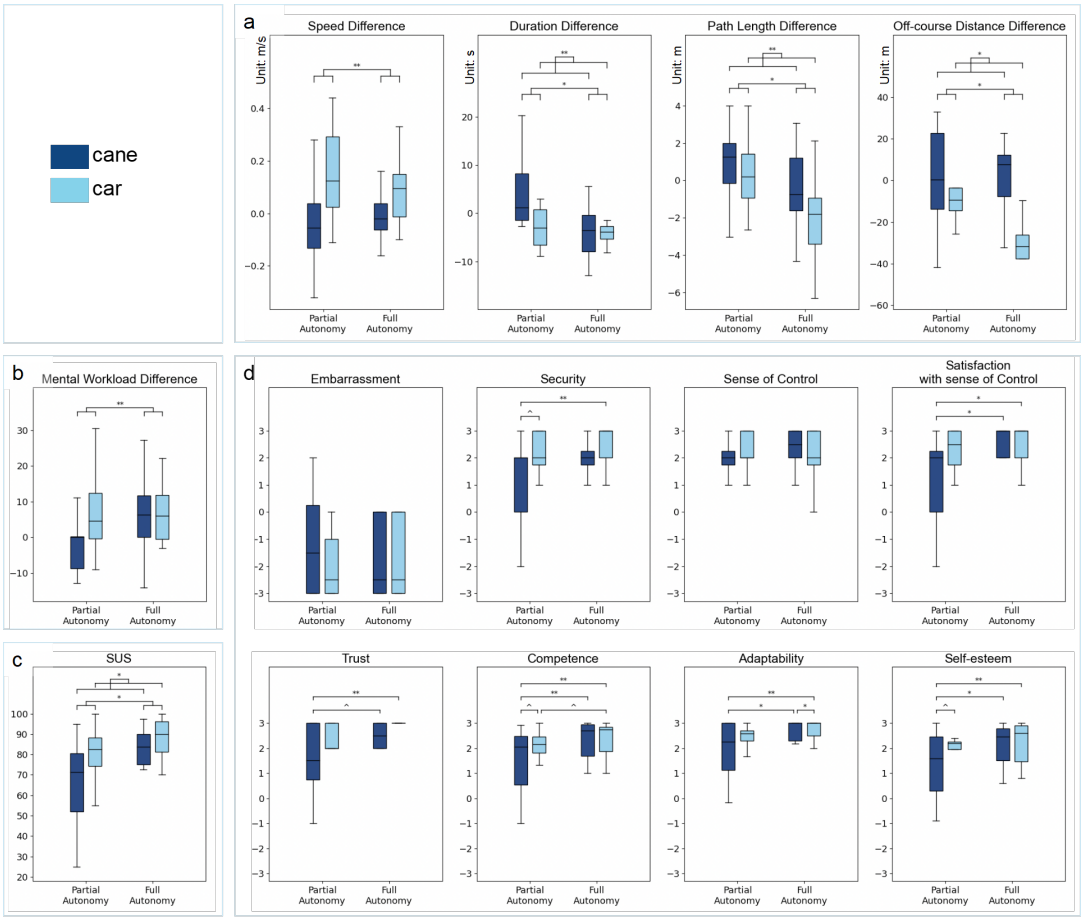

图6：受控研究结果箱线图。(a) 导航效率结果。(b) 心理工作负荷测量结果。(c) 系统可用性量表（SUS）结果。(d) PIADS 结果。

$M = 0.60$，$SD = 1.92$）。汽车形态机器人的结果（$M = -9.97$，$SD = 2.40$，$F = 17.02$ $p < 0.01$，）也显著短于手杖形机器人（$M = 0.34$，$SD = 2.06$）。然而，在路径长度方面未发现交互效应。

偏离路线距离是路线横向偏差距离的总和。使用汽车形态机器人导航时，偏离路线距离显著小于使用手杖形机器人时（$M = -16.09$，$SD = 22.29$，$F = 16.78$ $p = 0.03$，$M = 2.00$ $SD = 19.47$）。使用完全自主模式时的偏离路线距离也短于使用部分自主模式时（$M = -13.52$，$SD = 24.76$，$F = 5.74$，$p = 0.04$）（$M = -1.02$，$S = 19.14$）。可以看出存在交互效应趋势（$F = 4.21$，$p = 0.07$）；事后检验证实，在完全自主模式下，机器形态产生了影响：完全自主汽车形态机器人（$M = -33.47$，$SD = 16.93$，$F = 20.98$ $p < 0.01$，）的结果显著优于完全自主手杖机器人（$M = 0.52$，$SD = 17.99$）。自主程度对汽车形态机器人也产生了影响：全自动机器人车（$M = -33.77$，$SD = 16.93$，$F = 9.90$，$p = 0.01$）的结果优于半自动机器人手杖（$M = -6.19$，$SD = 15.60$）。

步行表现指标一致表明，与普通手杖和手推车相比，汽车形态机器人和完全自主机器人能够提供更好的引导，并带来更优的移动能力。

4.2.2 用户体验。 参与者在1-back任务中的准确率用于评估心理负荷。研究进行了基准化处理，以减少个体记忆差异的影响。除部分自动化手杖外（表4），结果均为正值，意味着心理负荷有所降低。双因素方差分析结果显示出显著的交互效应。事后分析表明，机器形态仅在部分自主条件下产生影响：部分自主引导车（$M = 7.85$、$SD = 11.96$、$F = 24.46$、$p < 0.01$）的结果优于部分自主手杖（$M = -3.07$、$SD = 10.03$）。使用手杖机器人时，自主程度产生了影响：全自动手杖（$M = 5.54$、$SD = 11.35$、$F = 7.75$、$p = 0.02$）的结果优于部分自动化手杖（$M = -3.07$、$SD = 10.03$）。使用完全自主引导机器人（$M = 5.43$、$SD = 12.32$、$F = 12.51$、$p = 0.01$）时的准确率显著高于使用部分自主引导机器人（$M = 2.39$、$SD = 12.15$）时的准确率。

表 4：用户体验指标结果

		心理负荷	SUS	PIADS			
		准确率 (基准测试)	得分	胜任力	适应性	自尊	Mean
部分自主性	Cane	-3.07% (10.03)	65 (22.41)	1.52 (1.25)	1.92 (1.15)	1.38 (1.27)	1.61 (0.56)
	Car	7.85% (11.96)	80 (12.72)	2.01 (1.29)	2.36 (1.03)	2.01 (1.06)	2.13 (0.14)
Full 自主性	Cane	5.32% (13.73)	81 (12.72)	2.28 (0.84)	2.51 (0.76)	2.11 (0.88)	2.3 (0.09)
	Car	5.54% (11.35)	88 (10.24)	2.40 (0.85)	2.58 (0.70)	2.20 (0.84)	2.40 (0.08)

部分自主手杖、完全自主手杖、部分自主汽车和完全自主汽车的系统可用性量表得分分别报告为65、81、80、88、4和（表）。基于系统可用性量表得分的双因素方差分析表明，参与者相较于部分自主（84.69 $SD = 11.89$ $F = 16.97$ $p = 0.02$ $M =$ 、、、72.60 $SD = 19.44$ $M = 84.27$ $SD = 12.03$ $M =$ 、）更偏好完全自主（84.69 $SD = 11.89$ $F = 16.97$ $p = 0.02$ 、、、），相较于手杖形态（、）更偏好汽车形态（、、7.19 $p = 0.02$ $M = 73.02$ $SD = 19.62$ $F =$ 、）。未发现显著的交互效应（图6）。

PIADS 揭示了用户对辅助引导机器人多个方面的满意度。采用弗里德曼双因素方差分析检验，评估了不同机器形态和自主性水平下的评分。图 6 展示了五个条目和三个指标的分布及统计差异。

在尴尬程度方面，部分自主汽车（$M = -2.00, SD = 1.21$）最能减轻参与者的尴尬，其次是完全自主汽车（$M = -1.75, SD = 1.42$）和全自主手杖（$M = -1.67, SD = 1.50$），但差异均未达到显著水平。在安全性方面，不同机器人之间存在显著差异（$\chi^2 = 13.87$, $p < 0.01$）。完全自主汽车的安全性最高（$M = 2.42, SD = 0.79$），显著高于部分自主手杖（$M = 1.25, SD = 1.48$, $p < 0.01$ $M = 2.08$ $SD = 0.79$ ）。部分自主汽车（ , ）也呈现出同样的趋势，其表现优于部分自主汽车（$p = 0.06$）。信任条目的模式与安全性相似：完全自主汽车（$M = 2.83, SD = 0.39, p =< 0.01$）和全自主手杖（$M = 2.50$, $SD = 0.52, P = 0.08$）的评分均高于部分自主手杖（$M = 1.58$, $SD = 1.44$）。未发现控制感方面存在差异的证据，但控制感满意度的结果有所不同（$\chi^2 = 8.53, p = 0.04$）。全自主手杖的控制感满意度最高（$M = 2.42, SD = 0.90$），其次是完全自主汽车（$M = 2.33, SD = 0.98$）。两者的得分均显著高于部分自主手杖（$p = 0.05, p = 0.02$）。

表4和图6展示了不同形态及自主性组合在三个指标上的结果和PIADS平均评分。参与者认为，全自主手杖和汽车形态机器人最有助于提升独立性、幸福感和生活质量。

总之，在受控研究中，完全自主和汽车形态机器人综合提供了最佳的用户体验。

4.2.3 访谈。 访谈期间，大多数参与者表示偏好完全自主和汽车形态机器人。他们指出汽车形态的优势，例如能带来更强的安全感、避开更多障碍物，并且有空间集成更多功能。他们还分享了对引导车的担忧，包括与手杖相比因不熟悉而需要更多练习，以及难以通过狭窄通道。人们也提到了手杖机器人的优点；例如，它易于快速学会，并且能够适应更多情境。然而，安全性低是最大的问题。

对于不同程度的自主性，参与者称赞完全自主在许多方面的表现，例如使用起来省心省力、操作舒适且安全性高。尽管完全自主很方便，但他们认为部分自主没有必要，也不太希望进行控制。不过，他们抱怨完全自主无法完美匹配自己的步行速度。相反，部分自主能够满足这一需求，带来舒适感和控制权，但需要付出更多努力。P8解释了她对不同自主性模式的理解，并设想了在不同情境下的使用方式：

> “前往陌生环境时，完全自主相当必要。如果我对某个地方不太熟悉，部分自主会有所帮助，尤其是我不熟悉如何转弯的时候。事实上，有时盲人及低视力人士特别想跑步，哪怕只是慢跑也一样。我们渴望感受速度带来的刺激，因此，当我以自己的速度跑步时，部分自主能帮到我。我认为，每个人的选择都源于其希望掌控的意愿。”

4.3 总结

由于可在手杖形态和汽车形态间切换的自主引导机器人，其系统可用性量表得分（81、88）高于以往研究（68.125 [43], 65 [51], 88 [26], 和 77,1 [58]），因此可以肯定地说，引导手杖和汽车都具有可接受的可用性。受控研究的定量和定性结果一致表明，完全自主的汽车形态机器人在引导效率和用户体验方面具有优势。就自主程度而言，参与者使用完全自主模式时速度更快、时长更短、路径长度更短、偏离路线距离更小，心理负荷也更低。完全自主模式带来了更高的安全感、信任度和控制满意度。就机器形态而言，汽车形态机器人缩短了视障人士的出行时长和路径长度，并减少了偏离路线距离，同时提升了安全感和信任度。

然而，尽管部分自主在偏好排名中高于白手杖和普通推车，但盲人将其描述为“没有必要”和“有帮助，但不如完全自主有益”。我们推测，对照实验未能在真实环境中还原他们的心理状态，并且

尚未充分探究影响参与者感知不同自主程度和机器形态的因素。

为了进一步了解视障人士在日常使用中对自主性和机器形态的偏好，我们升级了机器人并开展了一项实地研究。

5 研究2：实地研究

在首次实验后不久，我们使用升级后的引导机器人开展了一项实地研究。我们旨在了解盲人及低视力人士会在什么情况下使用部分或完全自主功能，以及他们对机器形态的偏好是否会在真实道路实际情境中发生变化。在这项研究中，参与者使用两种引导机器人前往自己想去的目的地，并可以随时按自己的意愿直接切换自主性。导航和避障功能通过绿野仙踪方法实现。

5.1 研究方法

5.1.1 准备工作。我们重新设计了用户界面和控制逻辑，以提升机器人的实用性，并实现由用户主动切换自主模式。我们开展了一项引导机器人实地试点研究，邀请两位参与者完成一条包含室内和室外路段的路线，以评估其可用性。收集他们的意见并反复迭代设计后，最终版本如图2所示。

(1) 有限状态机：我们在扶手上安装了一个按钮和力传感器，使微控制器能够识别用户切换自主模式的意图。图7展示了手杖引导机器人和汽车引导机器人的有限状态机。机器人启动后，默认设置为部分自主。用户通过拉动或推动扶手，按自己的意愿控制前进速度（V_p）。按下安装在扶手上的按钮后，状态将切换为完全自主，电机将使前进速度维持在当前速度（$V_f = V_p$）。如果力传感器检测到拉动或推动动作，表明用户有意接管控制，电机便会让出前进控制权，并切换回部分自主。处于部分自主状态时，引导机器人负责横向控制，通过转向来避开障碍物。出于安全考虑，两种状态都设有紧急停止协议。具体而言，在部分自主状态下，遇到无法避开的障碍物时，前进电机将接管纵向控制，并立即将前进速度降至零（$V_p = 0$）。危机解除后，控制权将交还给用户。在完全自主状态下，制动完成且危险消失后，状态将切换为部分自主。

（2）控制逻辑：在这一改进版本的实验设备中，保留了受控研究所用实验设备上的 HC-04 蓝牙模块，用于无线数据传输，但将追踪器替换为连接到升级版控制器 Arduino Mega 的 GPS 模块。与受控研究中使用的系统相比，该系统相当简单，仅由一台笔记本电脑组成，操作员通过键盘输入指令。除了基本的前进速度和转向控制外，键盘上还有紧急制动和自主性切换按键。测试后，远程控制系统的操作延迟不到 100 毫秒，足以在本研究中使用绿野仙踪方法。

5.1.2 流程。研究选取了三家按摩店作为研究地点，因为那里盲人和低视力人群聚集，且周边环境多样。实地研究开始前，我们与参与者达成了协议，其中包括他们选择的目的地。所有目的地步行距离均约为 10 分钟。参与者乘坐一台引导机器人出发，再乘坐另一台返回。出行顺序经过平衡安排。三位低视力参与者希望在研究期间蒙上眼睛，因为他们表示，虽然能够在阳光下 discreetly 出行，但夜间却始终无法独立行走。他们希望模拟夜间的状况，并寄望于机器人提升自己的夜间出行能力。

首先，所有参与者都签署了经机构审查委员会（IRB）批准的知情同意书。实验开始前安排了 10 分钟的培训环节，以确保参与者理解并掌握引导机器人的使用方法。研究人员提前告知了目标位置，参与者对方向和路线有大致了解。实地考察期间，参与者可以自由切换自主性。研究人员按照图 7 所示的紧急避障规程行事，并通过口头通知确保安全。由于机器人底盘的限制，遇到楼梯时，研究人员会协助搬运机器人。每次研究持续一小时，包括培训和访谈；每位参与者获得 100 元人民币作为报酬。

实地研究期间共有四名研究人员在现场（图8），其中一人负责以绿野仙踪式远程控制引导机器人，一人负责对整个过程进行录像，另外两人负责观察和实验后的访谈。除研究人员记录的第三人称视角外，参与者还通过头戴式摄像机记录了第一人称视角。研究人员鼓励所有参与者在行走过程中实时表达感受，并说明进行自主性切换操作的原因。每次试验后均进行实验后的结构化访谈。访谈问题的详细内容见附录C。引导机器人记录了参与者的实时速度和位置。

5.1.3 参与者。共有九名参与者（3名女性、6名男性），年龄范围为22至48岁（M=33.56，SD=8.17）完成了实地研究，其中包括两名先天性失明者、三名后天失明者和四名低视力者。在移动能力方面，其中七人能够独立使用或不使用白手杖出行。表5详细列出了参与者的人口统计信息。所有受试者均在三家按摩店工作，并自述熟悉周边区域。P5和P8均参与过受控研究和实地研究。

5.1.4 评估。两位研究人员按照相同的编码方案（表6）对视频进行人工编码，以分析环境影响对用户自主性选择的潜在影响。道路特征，包括路面平整度、坡度、交叉口、宽度、移动物体和环境噪声，均已定义。

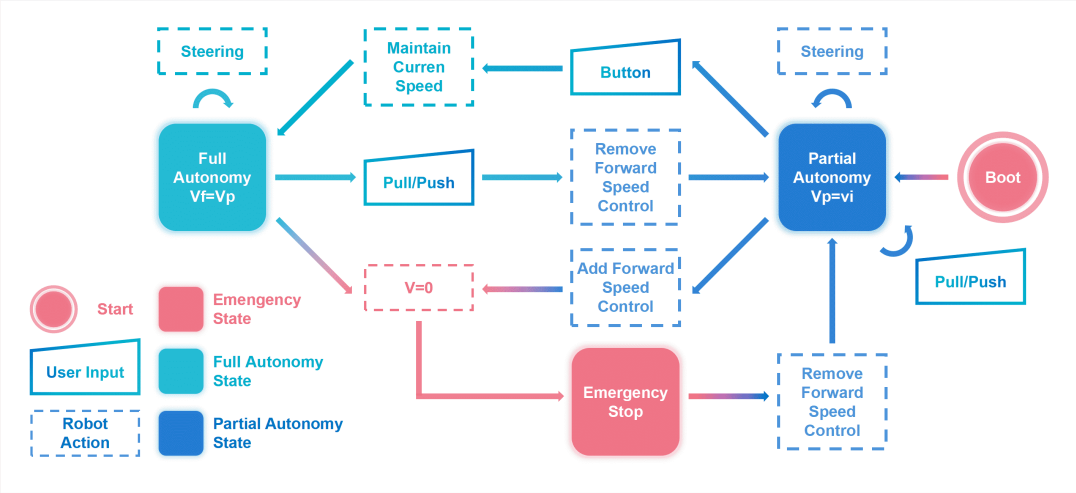

图7：实地研究中升级后的可切换自主模式的机器人手杖与汽车的有限状态机。

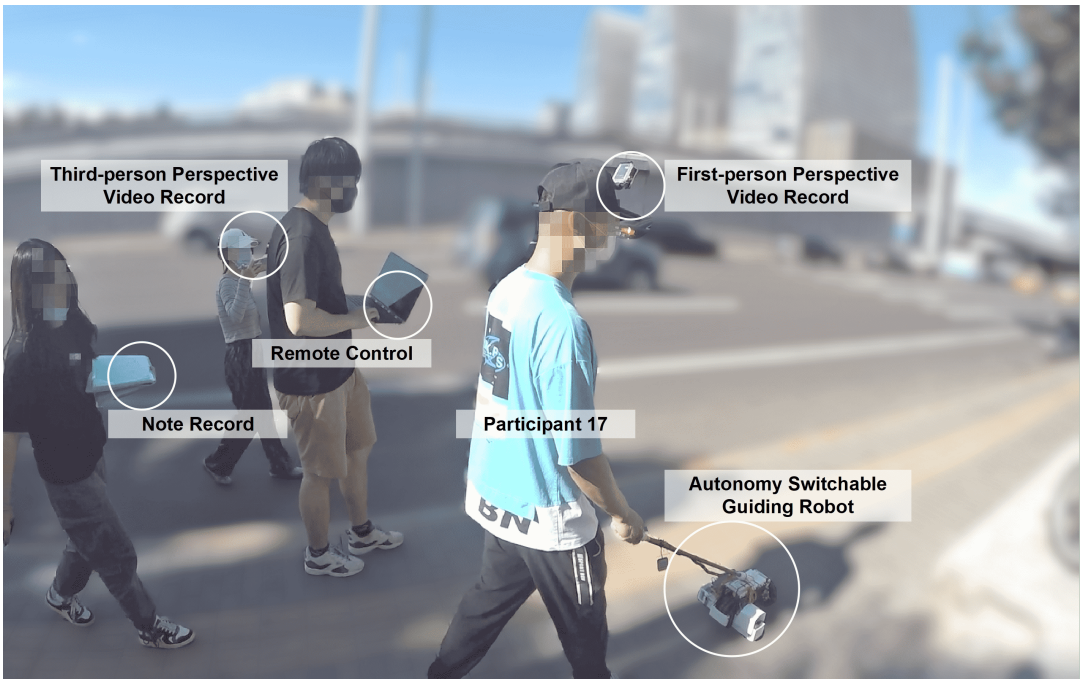

图8：现场实验设置示意图，以参与者17为例。

图9展示了各类别的路面状况。室内走廊最为平整，其次是大理石路。在沥青路上行走时，可以通过扶手感受到振动，但脚下的感觉仍然平坦。平整砖路的砖块凸起更为明显，前轮经过砖块间的缝隙时，可以感受到轻微的起伏。粗糙的砖路路面状况最差，有不规则裂缝，还存在绊倒的风险。

编码的计数方法基于每个自主性部分中各类别出现的次数。两位研究人员对视频进行编码，其评分者间Kappa值大于0.9（$p<0.01$）。根据正态性，采用了配对t检验 [31] 和Wilcoxon检验 [18] 对各变量进行分析。针对每种自主性，对人类步行速度和使用时长比进行了双因素方差分析检验。

表5：实地研究参与者的人口统计信息（*：蒙眼）

PID	性别	Age（岁）	先天性/后天性	视力损伤程度	视力损伤持续时间（年）	出行频率（次/周）	出行辅助工具
5*	女性	29	后天性	低视力*	10	14	使用/不使用白手杖
8	女性	38	先天性	失明	38	14	由他人引导
13	Male	31	先天性	失明	11	2	白手杖
14*	Male	22	先天性	低视力*	22	14	使用/不使用白手杖
15*	女性	25	先天性	低视力*	25	几乎从不	由他人引导
16	Male	33	后天性	低视力	9	1	白手杖
17	Male	34	后天性	失明	10+	4	白手杖
18	Male	48	后天性	失明	10+	几乎从不	白手杖
19	Male	42	后天性	失明	8	几乎从不	白手杖和由他人引导



图9：不同路面状况的示例。

表6：视频记录的人工编码方案。

道路特征	类别	描述
路面	室内走廊 大理石路 沥青路 平整砖路 粗糙的砖路	粗糙度增加 从室内走廊到 粗糙的砖路。
坡度	上坡/下坡 /无坡度	
交叉口	是/否	
宽度	窄/宽	是否需要 给行人让路 迎面而来 的行人
移动物体	行人 自行车和摩托车 机动车	物体被计数 当它被移动 朝向参与者时。
环境 噪声	交谈 非机动车 声音 机动车声音	类型和数量 进行了统计。

5.2 观察与发现

总之，从9名参与者完成的18次行程中收集了7738秒的视频数据。每个人都选择了不同的目的地，其中3人经历了室内路段。总体而言，参与者使用引导机器人在日常工作场所周围通行，并遇到了各种道路状况，包括有交通信号灯和无交通信号灯的交叉路口、行人与车辆共用的混合车道、上坡和下坡、宽阔和狭窄的人行道等。

就对部分自主和完全自主的总体偏好而言，定量和定性数据均显示前者更受青睐。时长分析显示，部分自主的使用率（$M = 0.71$，$SD = 0.14$）显著高于完全自主（$M = 0.29$，$SD = 0.14$），$t = 4.56$，$p = 0.002$。九位参与者中有七位在访谈中表示更倾向于部分自主。另有两位更偏好完全自主的参与者是 P15 和 P19。

就步行速度而言，双因素方差分析显示，用户使用完全自主时的平均速度（$M = 0.613$，$SD = 0.028$）显著高于使用部分自主时（$M = 0.524$，$SD = 0.015$ $F = 12.836$ $p = 0.012$），，，这表明参与者倾向于让完全自主的导航机器人帮助他们保持更快的速度。部分自主下实时速度的方差（$M = 0.026$，$SD = 0.004$）显著大于完全自主下的方差（$M = 0.0134$，$SD = 0.002$），$F = 13.968$，$p = 0.01$，这表明参与者使用部分自主时更倾向于大幅调整速度。P16 报告说，他在使用完全自主时会设置更高的速度，因为注意到环境安全时，他会切换模式，从而走得更高效、更大胆。“在安全的环境中，我想尝试更快的速度，”*P16* 说。

5.2.1 现场案例演示。图10展示了参与者17的完整轨迹。他从室内走廊出发，使用部分自主的引导手杖。离开建筑后，他决定在大理石路上加快速度。在踏上行人与机动车混行的沥青路之前，他遇到了几段窄路段和楼梯。在这段路程中，他多次开启和关闭完全自主模式。第一次

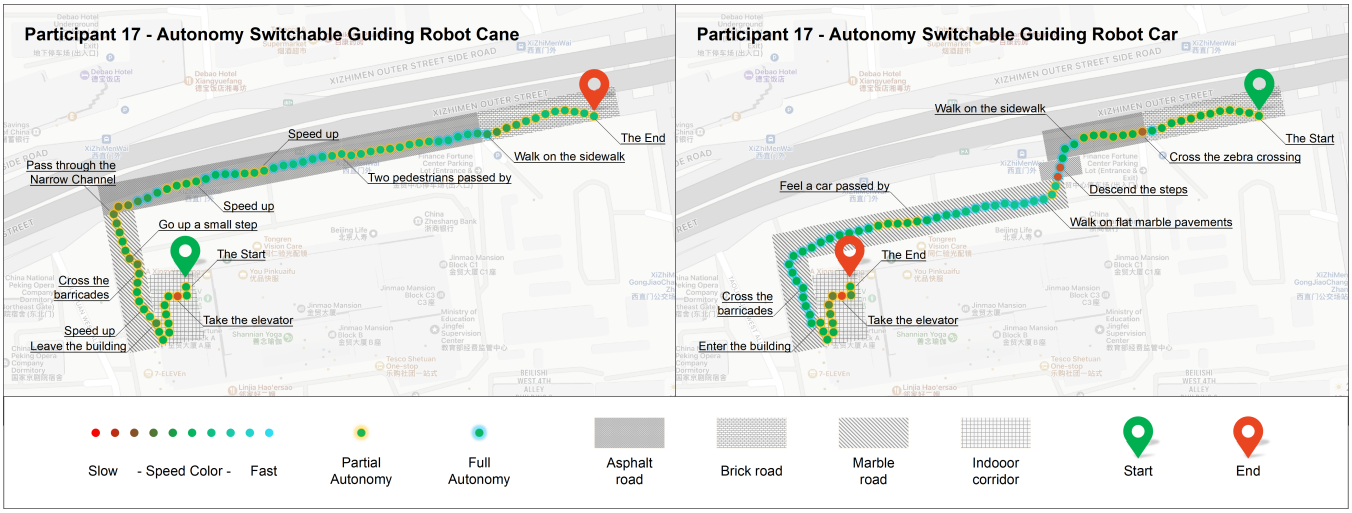

图10：实地研究轨迹示例（参与者17）。

退出完全自主模式，是因为他决定走快一些并推动机器人手杖，以调整速度。第二次，他感觉到有两名行人从前方经过，于是拉住机器人使其停下，尽管引导手杖正引导他避开行人。走上砖砌人行道后，他使用部分自主模式，直至抵达目的地。返程由机器人车引导。在到达斑马线之前，他使用部分自主模式。由于有一辆汽车经过，而参与者并未减速，操作员按照紧急预案限制前进速度，并进行语音提示。在下行楼梯前，有一小段沥青路。下完楼梯后，参与者沿着一段很长的平坦大理石路面行走；这段路程中，他大部分时间选择使用完全自主模式，只在感觉到有汽车经过时才切换为部分自主模式。进入建筑时，他减速并切换为部分自主模式。乘坐电梯后，参与者17返回了起点。

5.2.2 场景相关因素。表7展示了对道路状况进行视频编码的结果。总体而言，在感知到复杂、危险且多变的环境时，盲人及低视力人士更多地采用了部分自主。

关于**(1) 路面状况**，参与者在粗糙路段（如粗糙的砖路（$Mdn_{partial}$ = 0.38，Mdn_{full} = 0.13，p = 0.028）和沥青路（$M_{partial}$ = 0.60，M_{full} = 0.47，p = 0.044））行走时，选择使用部分自主的次数明显多于完全自主。尽管室内走廊的路面最为平整，但其也较为狭窄（窄路段中有86%是室内走廊）且蜿蜒，因此部分自主的使用多于完全自主（$M_{partial}$ = 0.37 M_{full} = 0.11 p = 0.027 2 ，）。

相比之下，道路路段的（）**宽度**并未显示出对盲人及低视力人士自主性选择产生明显影响的迹象。在访谈中，P14表示，他能够通过扶手的振动感受到道路上的凸起，并听到引导车车轮发出的噪声。“汽车晃动得更加频繁，车轮撞击地面上的凸起时发出声响……我认为环境变得复杂了，所以我选择自己推着它，以部分自主的方式运行。”P17解释了即使室内地面平坦，仍使用部分自主模式的原因。“室内空间不大，而且经常需要转弯。我觉得由我来控制速度更好。”

表 7：场景分析结果。

变量	部分自主	完全自主	值	p
室内走廊	M=0.37	M=0.11	t=5.94	0.027*
大理石路	M=0.42	M=0.36	t=0.71	0.528
沥青路	M=0.60	M=0.47	t=2.39	0.044*
平整砖路	Mdn=0.42	Mdn=0.40	Z=-0.59	0.553
粗糙的砖路	Mdn=0.38	Mdn=0.13	Z=-2.20	0.028*
上坡	M=0.11	M=0.11	t=-0.40	0.711
下坡	Mdn=0.17	Mdn=0.00	Z=-1.75	0.08^
交叉口	M=0.33	M=0.15	t=3.15	0.01**
窄路段	M=0.49	M=0.41	t=1.69	0.129
宽路段	Mdn=0.83	Mdn=1.00	Z=1.58	0.114
行人	Mdn=1.92	Mdn=1.60	Z=-2.07	0.038*
自行车和摩托车	M=1.49	M=1.04	t=2.00	0.08^
机动车	Mdn=0.77	Mdn=0.00	Z=-2.67	0.008**
交谈	M=0.71	M=0.49	t=1.01	0.34
非机动车声音	Mdn=0.40	Mdn=0.25	Z=-1.90	0.058^
机动车声音	M=2.43	M=1.45	t=3.36	0.01**

关于**（3）坡度**，结果显示，在下坡过程中，参与者选择部分自主的频率高于选择完全自主（$Mdn_{partial}$ = 0.17，Mdn_{full} = 0.00，p = 0.08）；而在上坡时，两者没有显著差异（$M_{partial}$ = 0.11，M_{full} = 0.11，p = 0.553）。不过，参与者在面对坡度时明确表达了他们的考量。P8和P16主要担心下坡时的速度控制。P8说：“使用部分自主来控制速度很方便……我担心在下坡保持速度时会造成突然的冲击。”P8、15和16都认为，使用完全自主

上坡可以节省更多力气。然而，由于无障碍轮椅通行路线中途有一个转弯，P8在上坡途中切换为部分自主。P8说："感觉到转向时我不太确定，所以我又切换回了部分自主。"

此外，**交叉路口（4）**的存在被确定为显著影响用户选择的因素：在通过人行横道时，使用部分自主的情况明显多于完全自主（$M_{partial} = 0.33$，$M_{full} = 0.15$，$p = 0.01$）。P13、P14 和 P15 认为，在这些多变且危险的场景中，由自己直接控制前进速度会更安全。P14 解释说，当他听到附近有车辆行驶的声音时，他害怕行走。P5 还表示，她担心引导机器人（处于部分自主状态）会拉着她向前走，尽管她知道机器人能够安全避开障碍物，并随时停下。与其他人不同，P19 过马路时选择了完全自主，因为他更担心无法及时通过交叉路口，赶上绿灯时段。"我知道自己走路很慢，而且有时间限制。使用完全自主来设定更高的前进速度，让它带着我通过，会更安全。"

对于**（5）移动物体**，Wilcoxon符号秩检验显示，当更多行人（$Mdn_{partial} = 1.92$，$Mdn_{full} = 1.60$ $p = 0.038$）或车辆（$Mdn_{partial} = 0.77$ $Mdn_{full} = 0.00$，$p =$,0.008）正在靠近或经过时，参与者切换至部分自主模式的可能性显著更高。对自行车和摩托车移动数量进行t检验后，发现了一定趋势（$M_{partial} = 1.49, M_{full} = 1.04, p = 0.08$）。对于**（6）环境噪声**，尽管说话声（$M_{partial} = 0.71, M_{full} = 0.49, p = 0.34$）和非机动车声音（$Mdn_{partial} = 0.40, Mdn_{full} = 0.25, p = 0.058$）的数量未达到显著性，但机动车声音密度较高时，参与者对部分自主模式的偏好显著更高（$M_{partial} = 2.43, M_{full} = 1.45, p = 0.01$）。所有参与者都曾直接或间接提及自己感知周围物体的能力，包括视觉、听觉，以及他们无法描述的感官。他们表示，当认为周围环境复杂时，会依赖部分自主模式，因为该模式能带来更高的安全感。

然而，值得注意的是，盲人的感受并不总是正确的。有一次，P17 在相对安静且开阔的区域行走时突然接管了控制。他自述感觉有一辆汽车正朝他驶来，但实际上并没有。

5.2.3 机器形态相关因素。 就机器形态而言，最明显的差异是**（1）尺寸**。图2和表1详细展示了每个机器人的大小。询问参与者两种形态在尺寸上的差异所带来的体验时，大多数参与者都提到了安全感。他们认为，体积较大且坚固的汽车能够帮助他们阻挡额外的危险。P13 和 P15 特别描述了引导机器人的长度、宽度和高度对感受和可用性的影响：

> P15："我的安全感实际上取决于（机器人）的宽度。至于长度，像行李箱那么大就可以了。扶手最好能够折叠起来，这样我就能挤上地铁了。"
>
> P14："汽车的尺寸可以再小一点。宽度正合适，但长度可以缩短，因为让我感到有安全感的是宽度。"

除了尺寸差异之外，我们还发现其他影响参与者体验的变量。首先，手杖的**(2) 长度** 会带来更多不安全感。P8、13 和 14 表示，由于手杖的长度会造成偏移，他们难以准确跟随手杖底盘的轨迹。

> P8："我需要一直记住（手杖底盘的）轨迹。由于车轮和我之间有一段距离，在我还没走到障碍物跟前时，手杖就已经避开了它。如果我不记住这条轨迹，也不严格按照它行走，就可能会撞上障碍物。"

其次，**（3）地面动觉反馈的传递**也存在差异。尽管手杖和汽车使用相同类型的电机和车轮，但 P15 和 P16 认为，转弯时引导车带来的运动感更强。P16 觉得，不明显的动觉反馈降低了他对引导手杖的信任。*P16*："它（手杖）的驱动感较弱，这让我怀疑它是否可靠。"

5.2.4 用户相关因素。除了道路场景和机器形态之外，人们还注意到，用户之间的差异也会影响他们对自主程度的偏好。P15 被蒙上眼睛，因为作为一名低视力者，她想模拟夜间出行的感受。她声称自己非常依赖他人，因此希望尽可能多地使用完全自主模式。

与 P15 的感受截然相反，P8 抱怨说由明眼人引导既不方便也不安全。出行时，她渴望掌控局面并保障自身安全。她首选的自主性模式是部分自主。 *P8*："我认为，人会下意识地先保护自己，这是本能，以防遇到危险。我会感到很脆弱，因为我只能跟着他走，无法参与（决策）。但使用部分自主模式时，我可以自己带路，也能更积极地参与行走。"

此外，参与者对周边环境的感知中，另一个经常被提及的描述是熟悉度。P5、8、14、15 和 17 都认同，在熟悉的环境中，他们会更多地使用完全自主模式。*P14* 说："我很放心使用完全自主模式，因为我对这里的道路状况了如指掌。"

此外，参与者还设想了实地研究中未曾遇到的其他场景，例如在公园散步、赶飞机或火车。P8、15 和 16 的看法一致：散步时会使用完全自主模式，以节省精力；赶时间时则会使用部分自主模式，因为在紧急情况下，他们更信任自己对速度的控制。与之不同的是，P17 和 19 选择在赶时间时使用完全自主模式，因为他们认为机器人导航效率更高。值得一提的是，他们两人都是出行频率较低的盲人。

6 讨论

控制实验与实地研究全面展现了视障人士对自主性水平和机器形态的感知与使用情况。总的来说，无论是在受控

实验还是实地研究中，用户都始终选择汽车形态引导机器人，但对自主程度的偏好会随条件而变化。下文将对此进行详细讨论。

6.1 盲人和低视力者的不同程度的自主性

对自主程度的偏好可以让我们一窥用户的心理状态。在受控研究中，完全自主在行走效率和用户体验方面都表现出显著优势。这一结果与先前研究的结论不同：更高的自主性可能会降低用户在控制感、安全性和信任方面的满意度 [21, 45, 69]。相反，在受控环境中，汽车形态的完全自主引导机器人获得了最高评分。用户反馈主要讨论完全自主有多智能、方便，甚至认为部分自主没有必要且多余，尽管其表现优于白手杖。

然而，在实地研究中，环境变得复杂且难以控制，随着用户在出行过程中大部分时间使用部分自主，他们对自主程度的感知也发生了变化。当盲人认为周围环境存在危险时，他们觉得完全自主的机器人能力不足且不可靠。定性结果表明，自主程度、期望的控制程度、信任和安全性之间存在关联，这与先前针对非盲人和低视力者群体的研究结果一致 [21, 45, 69]。参与者认为，较低的自主程度能让他们拥有更多控制权，从而在真实环境中行走时增强信任感和安全感。即使是完全失明、失去90%信息感知渠道的参与者 [32, 47]，在认为周围环境危险时也更加相信自己。与安全性相比，行走效率并非首要考量。尽管如此，部分自主仍提供了一种选择，能够大幅提升移动能力，并保障心理和人身安全。

总之，在存在不确定性和复杂性的情境中，以及需要较快步行速度时，部分自主是必要的。此外，即使参与者可以通过拉／推和按下按钮来调节速度，机器人控制的步行速度仍令人感到不适；这可以解释为机器式速度控制与手动控制并不相同 [42]。关于部分自主的发现能够惠及多个群体，包括残障人士和非残障人士。共享控制方法为解决这一悖论提供了一种途径：人们需要智能技术来改善生活，却又缺乏信任和安全感。我们的研究结果为确定盲人和低视力群体在不同情境中的自主程度偏好提供了实证证据。

6.2 盲人和低视力者的不同机器形态

我们的研究全面比较了盲人及低视力人士对手杖和汽车这两种机器形态的看法。正如前文所述，由于手杖与传统白手杖相似，因此被认为是设计引导机器人的理想形态。然而，融入机械特性后，手杖形态或许不再是最佳选择。尽管汽车形态机器人在便携性和熟悉度方面较逊一筹，用户仍强烈偏好这种机器人，因为它更省力，也能带来更高的安全感。

相同宽度以及与人的接近程度是影响安全性的重要因素，而手杖形态无法做到这一点。在定性结果中，用户反复提到，汽车形态机器人能带来更强的安全感，因为他们认为更大的宽度有助于阻挡更多障碍物，尽管他们事先已被告知机器人能够自动避开障碍物。事实上，手杖式机器人可能导致人机环境碰撞的问题此前已有讨论，并有人提出一种算法，通过预测人体运动和位置来解决机器人在狭窄走廊中导航时遇到的这一问题 [62]。改变机器形态也能避免这一问题。参与者提出了一些建议，以在保持高度安全感的同时提升便携性，例如采用可伸缩长度和扶手。

表8：机器形态具体信息

	与人的距离（米）		转向力（牛顿）	
	转向轮	前轮	转向轮	交给
Cane	0.98	0.70	7.14	2.86
Car	0.71	0.16	5.00	17.20

此外，表8展示了机器人手杖和汽车的形态细节。值得注意的是，引导手杖的转向轮与用户之间的距离大于引导车，证实了参与者在定性结果中的感知：他们认为跟随手杖机器人的运动很困难。

参与者在访谈中提到，他们认为手杖形机器人的转向力弱于汽车形态机器人，这让他们产生了不确定感。表8中的转向力为手杖形态和汽车形态引导机器人在动觉反馈方面的差异提供了证据。首先，由于缺少辅助轮，引导手杖的转向轮会提供更大的支撑，因此转向摩擦力也会显著增大。然而，由于手杖和汽车的旋转中心都是前轮，手杖的旋转半径明显更小。根据力矩的定义方程 $\tau = F_1 r_1 = F_2 r_2$，作用于用户手上的、用于指示转弯的手杖所产生的力小于汽车，因此动觉的传递较弱。转弯对于引导至关重要，因此运动传递较弱会使用户感到不确定，导致较低的信任感和安全感。此外，稳定的汽车形态结构更符合机器人设计原则，能够承载更多组件，且开发起来更加简单。

与传统白手杖和导盲犬相比，我们的机器人更加智能、安全。正如受控研究所示，与基线相比，引导机器人表现出更高的导航效率和更低的心理负荷，这有助于提升盲人和低视力群体的行动独立性和幸福感。

此前的研究曾尝试采用手杖和汽车形态作为引导机器人的设计结构。一些研究者受到视障人士熟悉且轻便的手杖 [17, 59], 的启发；另一些研究者则认为，汽车形态更安全、更接近导盲犬，也更容易融入人群，从而避免尴尬 [26, 58]。本研究对手杖和汽车形态结构进行了横向比较。定量和定性结果均表明，尽管盲人和低视力用户使用白手杖的经验更丰富，但汽车形态更适合作为引导机器人，也更受青睐。

6.3 辅助机器人的设计启示

为探究视障人士在使用自动化机器人导航时是否需要一定程度的控制，我们开发了两款此前尚未尝试过、可用性较高且自主性可切换的引导机器人。机器人经过专门设计，以便在实地环境中评估用户感知和表现，同时具备合理的用户界面和自主性切换逻辑，使参与者能够根据不同情境选择部分自主或完全自主模式。

参与者会切换到部分自主模式，因为他们需要更多主导权；也会切换到完全自主模式，以节省精力并帮助他们保持较快的步行速度。由于这两种状态都不会贯穿整个行程，因此能够在两者之间切换至关重要。

对于残障人士群体而言，部分自动化的辅助机器人能让用户拥有更多控制权和灵活性；用户仍可独立完成一些任务，同时由机器人提供辅助。此外，可切换自主性的辅助机器人能够更好地应对许多残障状况的不可预测性，根据情况变化进行调整，并按需提供适当的辅助。此外，部分自主模式有助于降低受伤风险，因为完全自主的机器人可能无法像人类那样应对环境或用户状况的变化，从而可能导致意外事故或受伤。

总而言之，具有高可用性的自主性可切换引导手杖和汽车确保了我们能够在各种环境中开展对自主性水平和机器形态的探索。我们关于自主性水平的研究结果首次揭示了盲人及低视力群体对引导机器人控制感、信任和安全性的需求，这有助于解决先前研究中提到的完全自主辅助机器人所引发的心理问题，以及部分自主和手动辅助方法所导致的表现问题 [10, 27, 30]。关于手杖形态和汽车形态引导机器人的优势与不足的证据，可为设计师提供指导。对机器形态的发现，为人机交互无障碍社区设计的引导机器人提供了首次横断面比较。

6.4 局限性与未来工作

本研究存在两项局限。一项是，研究结果在一定程度上受到这两种特定机器人设计的影响。目前版本中，手杖的系统可用性量表得分为81，低于汽车的88。最终结果确实显示参与者偏好汽车形态，但可以合理推断，若换用更易用的手杖，结果可能会产生偏差。此外，机器人设计的结构和表现也存在某些不足。汽车底部与参与者腿部之间的空间十分狭窄、有限，容易带来不适感。此外，在完全自主模式下，速度仍被认为“比预期慢”。观察发现，从部分自主切换到完全自主时，用户在进行操作（按下按钮）前会下意识地减慢速度。尽管这些缺点在一定程度上影响了体验，但它们并未被作为探究机器形态和自主性偏好的变量，因此并未实质性影响最终结论。未来，值得通过在汽车中添加一个倒L形把手，并调整自主性切换交互方式，来优化机器人设计。此外，在引导辅助机器人时，机器人控制的速度不如手动控制的速度自然，因此应进一步研究如何将手动控制速度的逻辑和模式应用于机器人控制，以实现预期的舒适体验。

另一个值得关注的问题是盲人和低视力参与者数量有限，这可能不利于从人口统计学角度进行推广。盲人和低视力群体由许多类型的盲人组成，包括导盲犬使用者、老年盲人等。由于这些群体在盲人和低视力群体中所占比例较小，因此在招募参与者时未将其作为目标对象。此外，在线招募方法也决定了这些参与者的总体特征：他们拥有稳定的工作、朋友社交圈、手机和教育背景，参加相对丰富的社会活动，并居住在城市。因此，参与者的人口统计信息具有局限性，我们需要更多样本和证据。未来的工作应重点补充更多盲人和低视力参与者数据，以巩固一般性结论。此外，建议探索参与者的人口统计指标（如年龄组、视力损伤持续时间和程度，以及出行辅助工具）如何影响他们对机器形态和自主性的偏好。

7 结论

本研究通过一项对照研究和一项实地研究，探究自主程度和机器形态对盲人认知及使用的影响。研究采用了两款可切换自主模式的引导机器人，分别呈手杖形态和汽车形态。人们认为，自己已失去大部分用于感知周围环境的感官通道，因此无法同时成为引导机器人的“跟随者”和掌控机器人的“主导者”。然而，关于自主程度偏好的研究结论表明，视力丧失者在使用引导机器人执行导航任务时，仍有控制方面的意愿和需求。随着控制感带来的满意度提高，用户会感到更加信任和安全，从而获得更好的体验。开发引导机器人时，部分自主和完全自主都不可或缺。对于承载导航功能的机器形态，汽车形态可能比仿照白手杖的形状更合适，既能带来更强的安全感，也更符合机器人设计原则。本研究所用的引导机器人仅属初步探索。未来可进一步改进共享控制算法，并完善导航系统的功能。关于自主程度和机器形态的研究发现，或可为开发更用户友好、以人为中心、服务于全人类的辅助机器人和协作机器人提供有益指导。

致谢

本项目获国家自然科学基金青年科学基金项目（62202267）资助。我们感谢本研究的所有参与者。

参考文献

[1] Mark Adamik、Karolina Dudzinska、AdrianJ Herskind 和 Matthias Rehm。2021。《信任测量与行为之间的差异：探究个性化机器人所产生的

sAppearance 对人机交互中信任的影响。载于2021年第30届IEEE机器人与人类交互通信国际会议（RO-MAN）。IEEE，880–885。[2] Dragan Ahmetovic、Uran Oh、Sergio Mascetti 和 Chieko Asakawa。2018年。右转：视力障碍人士逐向导航中的转向误差分析。载于第20届ACM SIGACCESS计算机与无障碍会议论文集。333–339。[3] Peter Aigner 和 Brenan McCarragher。1999年。应用于盲人机器人辅助设备的共享控制框架。《IEEE控制系统杂志》19卷2期（1999年），40–46。[4] Neziha Akalin、Annica Kristoffersson 和 Amy Loutfi。2019年。评估与老年人进行人机交互时的安全感与保障感。载于《社会机器人：人机交互的技术、社会与伦理层面》。Springer，237–264。[5] Negin Amirshirzad、Asiye Kumru 和 Erhan Oztop。2019年。人类对人机共享控制的适应。《IEEE人机系统汇刊》49卷2期（2019年），126–136。[6] Shiri Azenkot、Catherine Feng 和 Maya Cakmak。2016年。通过参与式设计方法使建筑服务机器人能够为盲人提供引导。载于2016年第11届ACM/IEEE人机交互国际会议（HRI）。IEEE，3–10。[7] Jinqiang Bai、Shiguo Lian、Zhaoxiang Liu、Kai Wang 和 Dijun Liu。2017年。面向视障人士的室内智能引导眼镜。《IEEE消费电子汇刊》63卷3期（2017年），258–266。[8] Andrea Bauer、Dirk Wollherr 和 Martin Buss。2008年。人机协作：综述。《国际人形机器人杂志》5卷01期（2008年），47–66。[9] Jenay M Beer、Arthur D Fisk 和 Wendy A Rogers。2014年。构建人机交互中机器人自主性分级框架。《人机交互杂志》3卷2期（2014年），74。[10] Tapomayukh Bhattacharjee、Ethan K Gordon、Rosario Scalise、Maria E Cabrera、Anat Caspi、Maya Cakmak 和 Siddhartha S Srinivasa。2020年。更高的自主性是否总是更好？探究行动能力受限用户对机器人辅助进食的偏好。载于2020年第15届ACM/IEEE人机交互国际会议（HRI）。IEEE，181–190。[11] Hannah L Bradwell、Rhona Winnington、Serge Thill 和 Ray B Jones。2021年。健康与社会照护领域社交辅助机器人的形态：对24个月仿人、仿生和机械形态设备研究的反思。载于2021年第30届IEEE机器人与人类交互通信国际会议（RO-MAN）。IEEE，376–383。[12] Robin N Brewer 和 Vaishnav Kameswaran。2018年。理解自主车辆中的控制权对视力障碍人士的意义。载于第20届ACM SIGACCESS计算机与无障碍会议论文集。185–197。[13] Julian Brinkley、Earl W Huff Jr、Briana Posadas、Julia Woodward、Shaundra B Daily 和 Juan E Gilbert。2020年。探究视力障碍人士对自主车辆的需求、偏好与顾虑。《ACM无障碍计算汇刊》（TACCESS）13卷1期（2020年），1–34。[14] J Brooke。1996年。《工业领域的可用性评估》，第SUS章：一种“快速简便”的可用性量表。[15] Adeline Chanseau、Kerstin Dautenhahn、Kheng Lee Koay 和 Maha Salem。2016年。谁在掌控？人机交互中的控制感与机器人焦虑。载于2016年第25届IEEE机器人与人类交互通信国际研讨会（RO-MAN）。IEEE，743–748。[16] Kuo-Yi Chen 和 Chin-Yuan Tsui。2021年。四足机器人导盲犬的模糊控制方法。《国际模糊系统杂志》23卷6期（2021年），1789–1796。[17] Tzu-Kuan Chuang、Ni-Ching Lin、Jih-Shi Chen、Chen-Hao Hung、Yi-Wei Huang、Chunchih Teng、Haikun Huang、Lap-Fai Yu、Laura Giarré 和 Hsueh-Cheng Wang。2018年。面向盲人和视障人士的行人环境深度跟踪机器人导盲犬——从虚拟和真实世界中学习。载于2018年IEEE机器人与自动化国际会议（ICRA）。IEEE，5849–5855。[18] Jack Cuzick。1985年。一种用于趋势检验的Wilcoxon型检验。《医学统计》4卷1期（1985年），87–90。[19] Apan Dastider、Bivas Basak、Md Safayatullah、Celia Shahnaz 和 Shaikh Anowarul Fattah。2017年。面向视障人士的低成本自主导航系统（e-cane）。载于2017年IEEE第10区人道主义技术会议（R10-HTC）。IEEE，650–653。[20] H Day、J Jutai 和 KA Campbell。2002年。辅助器具心理社会影响量表的开发：经验教训与未来展望。《残疾与康复》24卷1-3期（2002年），31–37。[21] Munjal Desai、Mikhail Medvedev、Marynel Vázquez、Sean McSheehy、Sofia Gadea-Omelchenko、Christian Bruggeman、Aaron Steinfeld 和 Holly Yanco。2012年。可靠性变化对机器人系统信任的影响。载于2012年第7届ACM/IEEE人机交互国际会议（HRI）。IEEE，73–80。[22] Qicheng Ding、Jiangtao Gong、Jingwei Sun、Penghui Xu、Liuxin Zhang、Qianying Wang 和 Yu Zhang。2019年。HeliCoach：一种支持视障人士方向感与移动能力训练的无人机系统。载于2019年CHI计算系统中的人为因素会议扩展摘要。1–6。[23] Connor Esterwood and Lionel P Robert. 2021. 你还信任我吗？人机信任修复策略。载于2021年第30届IEEE机器人与人类交互通信国际会议（RO-MAN）。IEEE，183–188。[24] Milton Friedman. 1937. 运用秩避免方差分析中隐含的正态性假设。美国统计学会会刊32，200（1937），675–701。[25] Jiangtao Gong, Qicheng Ding, Yu Zhang, Liuxin Zhang, Penghui Xu, Mingming Liu, Yingqing Xu, and Qianying Wang. 2020. HeliCoach：无人机三维音频空间中的自适应定向与移动训练系统。载于2020年CHI计算机系统中的人为因素会议扩展摘要集。1–8。[26] João Guerreiro, Daisuke Sato, Saki Asakawa, Huixu Dong, Kris M Kitani, and Chieko Asakawa. 2019. Cabot：为盲人设计并评估自主导航机器人。载于第21届ACM SIGACCESS计算机与无障碍国际会议。68–82。[27] Kristine Holbø, Silje Bøthun, and Yngve Dahl. 2013. 面向痴呆症患者的安全步行技术：他们想要什么？载于第15届ACM SIGACCESS计算机与无障碍国际会议论文集。1–8。[28] Tatsuya Ishihara, Jayakorn Vongkulbhisal, Kris M Kitani, and Chieko Asakawa. 2017. 面向基于智能手机的导航的信标引导运动恢复结构。载于2017年IEEE冬季计算机视觉应用会议（WACV）。IEEE，769–777。[29] Seita Kayukawa, Tatsuya Ishihara, Hironobu Takagi, Shigeo Morishima, and Chieko Asakawa. 2020. BlindPilot：引导盲人前往地标物体的机器人局部导航系统。载于2020年CHI计算机系统中的人为因素会议扩展摘要集。1–9。[30] Dae-Jin Kim, Rebekah Hazlett-Knudsen, Heather Culver-Godfrey, Greta Rucks, Tara Cunningham, David Portee, John Bricout, Zhao Wang, and Aman Behal. 2011. 自主性如何影响表现与满意度：脊髓损伤受试者使用辅助机器人的研究结果。IEEE系统、人类与控制论汇刊A辑：系统与人类42，1（2011），2–14。[31] Tae Kyun Kim. 2015. t检验作为参数统计量。韩国麻醉学杂志68，6（2015），540–546。[32] Theresa J Babbitt Kline, Laura M Ghali, Donald W Kline, and Steven Brown. 1990. 年轻、中年和老年观察者对公路标志的可视距离：图标优于文本。人为因素32，5（1990），609–619。[33] Eun Kwon and Gerard Jounghyun Kim. 2010. 人形机器人与投影仪机器人：探索人机交互的间接途径。载于第5届ACM/IEEE人机交互国际会议论文集。157–158。[34] Gerard Lacey and Shane MacNamara. 2000. 面向老年盲人的机器人移动辅助器情境感知共享控制。国际机器人研究杂志19，11（2000），1054–1065。[35] Min-Fan Ricky Lee, Fu Hsin Steven Chiu, and Chen Zhuo. 2013. 面向视障人士的新型社交移动机器人设计。载于2013年IEEE/SICE系统集成国际研讨会论文集。IEEE，161–166。[36] Young Hoon Lee and Gerard Medioni. 2014. 面向盲人的可穿戴RGBD室内导航系统。载于欧洲计算机视觉会议。Springer，493–508。[37] Young Hoon Lee and Gérard Medioni. 2016. 基于RGB-D摄像头的视障人士可穿戴导航系统。计算机视觉与图像理解149（2016），3–20。[38] Kai Wun Lin, Tak Kit Lau, Chi Ming Cheuk, and Yunhui Liu. 2012. 面向视障人士的可穿戴立体视觉系统。载于2012年IEEE机电一体化与自动化国际会议。IEEE，1423–1428。[39] Guanhong Liu, Tianyu Yu, Chun Yu, Haiqing Xu, Shuchang Xu, Ciyuan Yang, Feng Wang, Haipeng Mi, and Yuanchun Shi. 2021. 触觉指南针：通过连续方向反馈帮助视障人士沿路径行走。载于2021年CHI计算机系统中的人为因素会议论文集。1–13。[40] Shachar Maidenbaum, Shlomi Hanassy, Sami Abboud, Galit Buchs, Daniel-Robert Chebat, Shelly Levy-Tzedek, and Amir Amedi. 2014. “EyeCane”：一种新型盲人电子出行辅助设备——技术、行为与快速学习。神经康复与神经科学32，6（2014），813–824。[41] Rajesh Kannan Megalingam, Souraj Vishnu, Vishnu Sasikumar, and Sajikumar Sreekumar. 2019. 面向视障人士的自主路径引导机器人。载于认知信息学与软计算。Springer，257–266。[42] Dafne Zuleima Morgado Ramirez and Catherine Holloway. 2017. “但是，我不想要/不需要电动轮椅”——为手动轮椅提供无障碍助力辅助。载于第19届ACM SIGACCESS计算机与无障碍国际会议论文集。120–129。[43] Aaron Morris, Raghavendra Donamukkala, Anuj Kapuria, Aaron Steinfeld, Ju- dith T Matthews, Jacqueline Dunbar-Jacob, and Sebastian Thrun. 2003. 一种可提供引导的机器人助行器。载于2003年IEEE机器人与自动化国际会议（会议编号03CH37422），第1卷。IEEE，25–30。[44] Saeid Nahavandi. 2017. 人与机器人之间的可信自主性：迈向机器人与自主系统中的人在回路监督。IEEE系统、人类与控制论杂志3，1（2017），10–17。

[45] Pia Petersson and Kerstin Blomqvist. 2011. 安全感——通过故事探寻其含义：瑞典健康与社会照护领域的一项参与式行动研究。International Journal of Older People Nursing 6，1（2011），25–32。[46] Irene Rae, Leila Takayama, and Bilge Mutlu. 2013. 高度对机器人中介沟通的影响。载于2013年第8届ACM/IEEE人机交互国际会议（HRI）。IEEE，1–8。[47] David B Reuben, Rebecca A Silliman, and Mark Traines. 1988. 老年驾驶：医学、政策与伦理。Journal of the American Geriatrics Society 36，12（1988），1135–1142。[48] Jaime Sánchez and Natalia de la Torre. 2010. 盲人在城市中的自主导航。载于第12届ACM SIGACCESS计算机与无障碍国际会议论文集。195–202。[49] Daisuke Sato, Uran Oh, João Guerreiro, Dragan Ahmetovic, Kakuya Naito, Hironobu Takagi, Kris M Kitani, and Chieko Asakawa. 2019. NavCog3实地应用：具备语义特征的大规模盲人室内导航助手。ACM无障碍计算汇刊（TACCESS）12，3（2019），1–30。[50] Inbo Shim and Joongsun Yoon. 2002. 一种基于交互技术的机器人手杖。载于IEEE 2002年第28届工业电子学会年度会议。IECON 02，第3卷。IEEE，2249–2254。[51] Patrick Slade, Arjun Tambe, and Mykel J Kochenderfer. 2021. 多模态感知与直观转向辅助可改善视力障碍人士的导航和移动能力。Science Robotics 6，59（2021），eabg6594。[52] Lars St, Svante Wold, et al. 1989. 方差分析（ANOVA）。Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems 6，4（1989），259–272。[53] Kristen Stubbs, Pamela J Hinds, and David Wettergreen. 2007. 人机交互中的自主性与共同基础：一项实地研究。IEEE Intelligent Systems 22，2（2007），42–50。[54] Shinji Suzuki, Yasuhisa Hirata, and Kazuhiro Kosuge. 2009. 由伺服制动器控制的智能被动式手杖的开发。载于RO-MAN 2009——第18届IEEE机器人与人类交互通信国际研讨会。IEEE，97–102。[55] Hotaka Takizawa, Shotaro Yamaguchi, Mayumi Aoyagi, Nobuo Ezaki, and Shinji Mizuno. 2012. Kinect手杖：一种基于三维物体识别的视障人士辅助系统。载于2012年IEEE/SICE系统集成国际研讨会（SII）。IEEE，740–745。[56] Ruxandra Tapu, Bogdan Mocanu, Andrei Bursuc, and Titus Zaharia. 2013. 一种用于辅助视障人士的基于智能手机的障碍物检测与分类系统。载于IEEE计算机视觉国际会议研讨会论文集。444–451。[57] Ruxandra Tapu, Bogdan Mocanu, and Titus Zaharia. 2020. 面向视障人士的可穿戴辅助设备：前沿综述。Pattern Recognition Letters 137（2020），37–52。[58] Kazuteru Tobita, Katsuyuki Sagayama, Mayuko Mori, and Ayako Tabuchi. 2018. 面向视障人士和老年人的引导机器人LIGHBOT的结构与检验。Journal of Robotics and Mechatronics 30，1（2018），86–92。[59] José Varela-Aldás, John Guamán, Belén Paredes, and Fernando A Chicaiza. 2020. 面向视障人士的机器人手杖。载于人机交互国际会议。Springer，506–517。[60] Mohd Helmy Abd Wahab, Amirul A Talib, Herdawatie A Kadir, Ayob Johari, Ahmad Noraziah, Roslina M Sidek, and Ariffin A Mutalib. 2011. 智能手杖：视障人士的辅助型手杖。arXiv预印本arXiv:1110.5156（2011）。[61] Kohei Wakita, Jian Huang, Pei Di, Kosuke Sekiyama, and Toshio Fukuda. 2011. 基于人体行走意图的全向型手杖机器人运动控制。IEEE/ASME机电一体化汇刊18，1（2011），285–296。[62] Liyang Wang, Jinxin Zhao, and Liangjun Zhang. 2021. Navdog：通过模型预测控制与人机建模实现的机器人导航导盲犬。载于第36届ACM应用计算年度研讨会论文集。815–818。[63] 世界卫生组织：WHO. 2018. 失明与视力障碍。
h
t
t
p
s://
w
ww.who.int/en/news-room/fact-sheets/detail/blindness-and-visual-impairment
[64] Anxing Xiao, Wenzhe Tong, Lizhi Yang, Jun Zeng, Zhongyu Li, and Koushil Sreenath. 2021. 机器人导盲犬：通过牵引绳引导的混合式物理交互引领人类。载于2021年IEEE机器人与自动化国际会议（ICRA）。IEEE，11470–11476。[65] Shuchang Xu, Ciyuan Yang, Wenhao Ge, Chun Yu, and Yuanchun Shi. 2020. Virtual Paving：通过振动触觉与音频反馈，为视力障碍人士呈现平滑路径。ACM交互、移动、可穿戴与泛在技术汇刊4，3（2020），1–25。[66] Ciyuan Yang, Shuchang Xu, Tianyu Yu, Guanhong Liu, Chun Yu, and Yuanchun Shi. 2021. LightGuide：利用光提示引导视障人士沿路径行进。ACM交互、移动、可穿戴与泛在技术汇刊5，2（2021），1–27。[67] Yuri DV Yasuda, Luiz Eduardo G Martins, and Fabio AM Cappabianco. 2020. 移动机器人的自主视觉导航：系统性文献综述。ACM计算综述（CSUR）53，1（2020），1–34。[68] Cang Ye, Soonhac Hong, Xiangfei Qian, and Wei Wu. 2016. 协作机器人手杖：一种面向视障人士的新型机器人导航辅助设备。IEEE系统、人类与 *Cybernetics Magazine* 2, 2 (2016年), 33–42. [69] Setareh Zafari 和 Sabine T Koeszegi. 2020年. 对归因能动性的态度：感知控制的作用。*International Journal of Social Robotics* (2020年), 1–10. [70] 张鹤和 Cang Ye. 2019年. 面向盲人机器人导航辅助设备的辅助寻路人机交互。载于*2019*年 第*12*届国际人类系统交互会议（*HSI*）。IEEE，137–142。[71] 赵宇航、Elizabeth Kupferstein、Hathaitorn Rojnirun、Leah Findlater 和 Shiri Azenkot。2020年。面向低视力人士的智能眼镜视觉与音频寻路指引的有效性。载于*2020*年 *CHI*计算系统中的人为因素会议论文集。1–14。

A 附录：受控研究路径跟随方法

借助 HTC VIVE定位系统，服务器笔记本电脑可以按固定频率更新机器人位置。每次更新后，它都会计算机器人与预设路线之间的最短距离、当前路径区段的方向以及实时航向角，并向电机发出转向脉冲指令，使机器人回到路线。我们计算引导机器人的前进角和路径角，并通过比较两者设置了三个区域（见图 A1），每个区域都有相应的转向脉冲指令。我们通过先发送转向速度（这也意味着开始转向），随后设置时间延迟，最后发送停止转向指令，来定义一个长度固定的转向脉冲。在低速区域，机器人会接收到低速转向脉冲，使其缓慢靠近路径。同样，在高速区域会发送速度更高的转向脉冲，让机器人迅速回到路线。特别是，在反向速度区域，服务器电脑会沿相反的转向方向发送转向脉冲，以防止转向过度。此外，值得一提的是，每个区域的转向速度都能根据机器形态和前进速度自动调整，无论机器人处于部分自主还是完全自主状态。

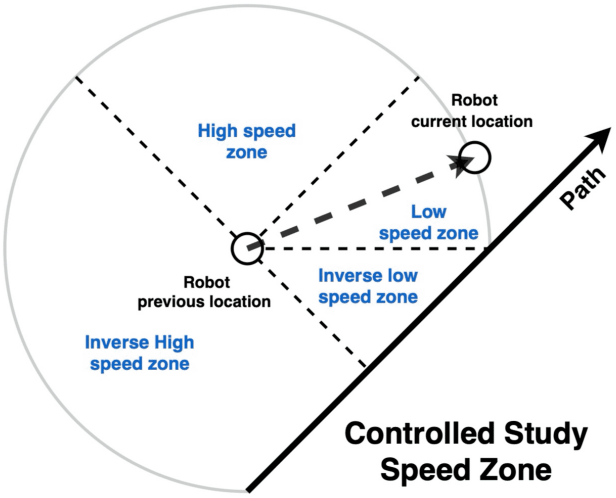

图 A1：受控研究中机器人路径跟随方法的演示。每个速度区域负责提供机器人转向指令。

B 附录：受控研究访谈

- 以下引导辅助方式中，您偏好哪一种：白手杖、普通推车、部分自主机器人手杖、完全自主机器人手杖、部分自主机器人车，还是完全自主机器人车?
- 你最不喜欢的那个，原因是什么?
- 你最喜欢的那个，原因是什么?
- 你对手杖形态和汽车形态的感受有何不同吗?
- 你对完全自主、部分自主和基线的感受有何不同吗?
- 使用这些机器人时，你感受到的控制程度是否有所不同?你最喜欢哪种机器人带给你的掌控感？为什么?
- 如果在日常生活中使用这些机器人，你会感到尴尬吗?
- 除了上述问题之外，使用不同自主性水平和机器形态的引导机器人时，你的感受还有其他差异吗?

C 附录：实地研究访谈

- 回顾参与者出行时的行为，并提出后续问题。
- 对于完全自主和部分自主，你的感受有差异吗？（例如在满意度、安全性、信任、尴尬、控制等方面）
- 对于手杖形态和汽车形态，你的感受有差异吗？（例如在满意度、安全性、信任、尴尬、控制等方面）
- 哪些因素影响了你的速度？在什么情况下你会加速或减速？在安全的环境中，你会走得更快吗?
- 是什么因素影响了您对自主程度的选择？您更倾向于在什么情境下使用完全自主模式？又更倾向于在什么情境下使用部分自主模式？（客观上和主观上）
- 您更倾向于在什么情境下使用手杖形机器人？又更倾向于在什么情境下使用汽车形态机器人?
- 除了上述问题之外，使用不同自主性水平和机器形态的引导机器人时，您的感受还有其他差异吗?

D 附录：量表

本节包含受控研究中使用的 PIADS 和系统可用性量表（SUS）。

表 D1：修订版辅助设备心理社会影响量表（PIADS）

			-3	-2	-1	0	1	2	3
1	胜任力	做好重要事情的能力 这些事情是你生活中需要完成的							
2	幸福感	愉悦、快乐；对生活感到满意							
3	独立性	不依赖或不总是需要 他人或某事物的帮助							
4	适应能力	能够应对生活中的各种情况，以及 处理小危机							
5	困惑	无法清晰思考、果断行动							
6	效率	有效管理日常任务							
7	自尊	你对自己的感受，以及你是否喜欢 作为一个人的自己							
8	生产力	能够在一天内完成更多事情							
9	安全感	感到安全，而非脆弱 或不安全							
10	挫折感	因未能实现愿望而感到沮丧 ；感到失望							
11	有用性	对自己和他人都有帮助；能够 把事情办成							
12	自信	自立；对自己及自身能力的信任							
13	专长	在某一领域或职业中的知识							
14	熟练度	能够展现你的专长；出色地完成任务							
15	幸福感	感觉良好； 对自己的生活和未来抱有乐观态度							
16	能力	感觉自己更有能力；能够应对							
17	生活质量	你的生活有多好							
18	表现	能够展示你的技能							
19	力量感	内心力量感；感觉自己拥有 对自己生活的重大影响力							
20	控制感	感觉自己能够随心所欲地行动于 自己的环境中							
21	对这种感觉的满意度的控制	对你上面评定的这种控制感的满意度							
22	尴尬	感到局促或羞愧							
23	信任	对辅助器具感到信任							
24	冒险意愿	愿意承担一些风险；愿意迎接 新挑战							
25	参与能力	与他人一起参加活动的能力							
26	尝试新事物的热情	勇于冒险并乐于接受 新体验							
27	适应.....的能力 日常生活活动	应对变化的能力；能够让 基本任务变得更易处理							
28	善于利用 机会	能够在出现机会时迅速而自信地采取行动 改进某件事							
29	请为以下内容的可信度打分： 你的回答（1-5）								

表 D2：系统可用性量表（SUS）

	1	2	3	4	5
1. 我认为自己会愿意经常使用这个系统					
2. 我觉得这个系统过于复杂，没必要					
3. 我觉得这个系统易于使用					
4. 我认为需要技术人员的支持才能使用该系统					
5. 我发现该系统中的各项功能整合得很好					
6. 我认为该系统存在太多不一致之处					
7. 我想大多数人都会很快学会使用该系统					
8. 我发现该系统使用起来非常繁琐					
9. 使用该系统时，我感到非常有信心					
10. 我需要先学习很多东西，才能开始使用这个系统					