arXiv:2301.02336v1 [cs.RO] 5 Jan 2023

探索盲人旅行者导航助手的控制等级

Vinitha Ranganeni 华盛顿大学 西雅图，华盛顿州，美国
vinitha@cs.washington.edu

Mike Sinclair 微软研究院 雷德蒙德，华盛顿州，美国
sinclair@microsoft.com

Eyal Ofek 微软研究院 雷德蒙德，华盛顿州，美国
eyalofek@microsoft.com

Amos Miller
独立研究员 西雅图，华盛顿州，美国
miller.amos@gmail.com

Jonathan Campbell 微软研究院 雷德蒙德，华盛顿州，美国
jon.campbell@microsoft.com

Andrey Kolobov
微软研究院 雷德蒙德，华盛顿州，美国
akolobov@microsoft.com

Edward Cutrell 微软研究院 雷德蒙德，华盛顿州，美国
cutrell@microsoft.com

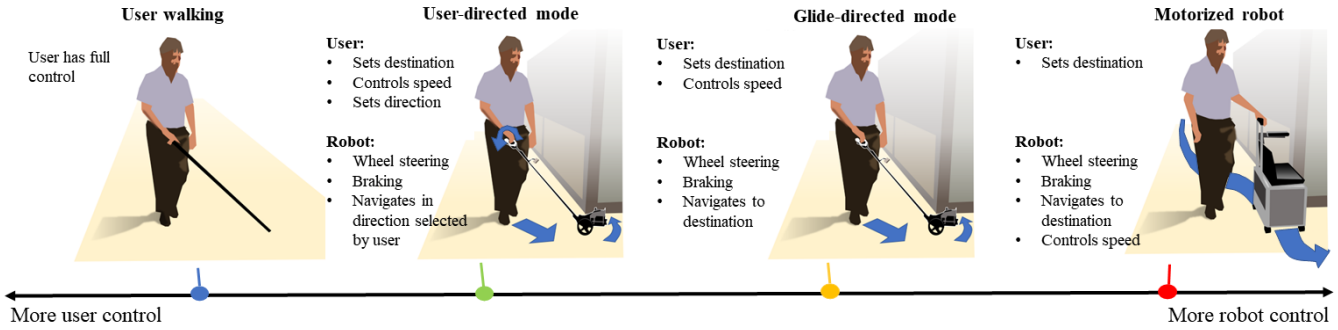

图 1：面向盲人和低视力人士的不同助行设备，在为用户提供的自主性和导航控制方面各不相同。白手杖（左）让用户完全掌控自己的行动，但其短距离感知能力使用户难以在陌生区域导航。电动机器人（最右）可以根据全局地图前往目标地点，但由于它决定了路径和步行速度，用户几乎没有控制权。我们探索了两种不同的混合控制方案，用户将所提出的*Glide*导航助手推在身前。在用户主导模式（左中），用户设定目的地，由 Glide 引导用户的行走方向。在*Glide*主导模式（右中），系统会告知用户路口可能存在转弯，并让用户对所选路径拥有更多控制权。

摘要

只有少数盲人和低视力人士使用手杖或导盲犬等传统助行设备。为解决传统助行设备的局限性，人们提出了各种辅助技术。这些设备通常将主要控制权交给用户或设备。在这项研究中，我们探讨不同控制等级如何影响用户的能动感、对设备的信任、信心和成功导航。我们介绍了 Glide，一种新型助行设备，具有两种控制模式：Glide 主导和用户主导。我们在一项研究（N=9）中使用 Glide，盲人或低视力参与者通过这两种模式在室内环境中导航。总体而言，参与者认为 Glide 易于使用和学习。尽管 Glide 目前存在局限，大多数参与者仍信任它；随着持续使用 Glide，他们的信心和表现都有所提升。用户在不同情境下对控制模式的偏好各不相同；没有哪一种模式能在所有情境中“胜出”。

允许出于个人或课堂使用目的免费制作本作品部分或全部内容的数字副本或纸质副本，但不得为营利或商业利益而制作或分发副本，且副本首页必须保留本声明和完整引文。必须尊重本作品中第三方组件的版权。其他用途请联系版权所有者/作者。*HRI '23，2023*年*3*月*13*日至*16*日，瑞典斯德哥尔摩© 2023年 版权所有者/作者所有。ACM ISBN 978-1-4503-9964-7/23/03。
https://doi.org/10.1145/3568162.3578630

CCS 概念

• **无障碍技术**； • **计算机系统** → 机器人学； •**以人为中心的计算**；

关键词

辅助导航，机器人学，用户研究

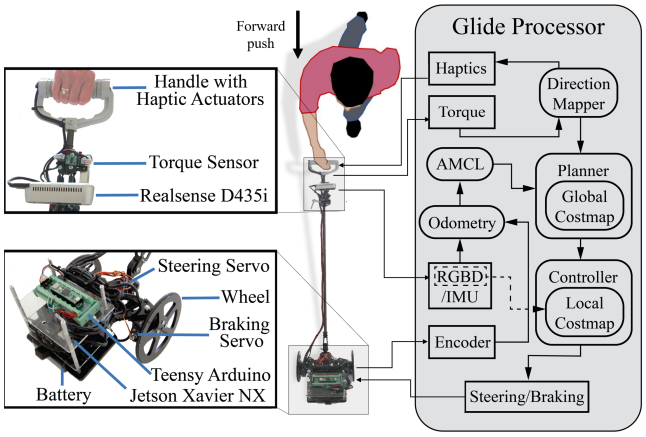

图 2：Glide 及其处理器各组件的分解示意图。用户可扭转手柄来指示期望的行进方向（扭矩传感器的输入），并向前推动机器人（编码器的输入）。Glide 会输出触觉反馈，引导用户转向，并施加／释放制动器。

ACM 引用格式：
Vinitha Ranganeni、Mike Sinclair、Eyal Ofek、Amos Miller、Jonathan Campbell、Andrey Kolobov 和 Edward Cutrell。2023年。《探索盲人旅行者导航助手的控制等级》。载于*2023*年 *ACM/IEEE* 人机交互国际会议论文集（*HRI '23*），*2023*年*3*月*13*日至*16*日，瑞典斯德哥尔摩。ACM，纽约，纽约州，美国，9页。https://doi.org/10.1145/3568162.3578630

1 引言

截至 2016 年，美国约有 700 万人报告自己是盲人或低视力人士（BLVI）[14]。对白手杖和导盲犬来说，它们是这些人的主要助行设备。白手杖会直接接触使用者前方紧邻的区域，使使用者能够感知环境、判断材料差异并探测障碍物。导盲犬会引领使用者绕过障碍物，并能在熟悉的环境中进行全局导航。使用者可以与犬互动，并提示不同的行走方向。尽管这些助行设备帮助了许多人，但要熟练掌握并有信心地使用它们需要长期训练，即便如此，迷路的风险仍然很高。安全导航的困难也会对一个人的自信产生不利影响。因此，在美国估计有 700 万盲人和低视力人士中，**只有 2% 至 8% 使用白手杖** [14]。**剩下的人中，只有约 2% 使用导盲犬** [14]。约 90% 的盲人和低视力人士高度依赖视力正常者的协助，和／或将生活限制在有限的地点和活动范围内，在许多情况下，他们几乎只待在家中。此前旨在实现盲人导航自动化的尝试，例如基于智能手机的导航应用和电动机器人，至今未能改变这一现状。

在这项工作中，我们推测，助行设备的实用性取决于一个迄今鲜少受到研究的因素——它赋予使用者的控制程度（图 1）。白手杖和智能手机导航应用将全部导航控制权交给使用者，但它们提供的信息可能不足以支持局部决策。导盲犬和电动机器人则更接近控制光谱的另一端，但跟随它们的盲人和低视力人士可能会因此感到自主性受损。为了试验不同程度的共享控制，我们开发了**Glide**（图 2），这是一种新型助行设备，旨在安全地引导使用者前往目的地，并通过一套触觉词汇传达设备滚过的表面所带来的触觉感知，同时让使用者能够设定步行速度。Glide 的设计轻巧便携。除了便于使用者将其搬上楼梯或随身携带之外，使用者还可以按照自己的喜好操控设备，以增强控制感。

Glide 通过一根带手柄的杆进行被动式动能引导，该手柄连接到一台配有可转向、可制动轮子的小型移动平台（图 2）。轮子没有动力，需要用户将设备推到身前。Glide 的传感器能够识别用户的位置以及静态和动态障碍物。Glide 利用这些信息引导用户绕过障碍物，或启动制动器使用户停下。Glide 的手柄将用户的握持与轮式平台相连，传递地面的触觉信息。手柄上配有一组触觉致动器，作为与用户沟通的另一种渠道（例如，在接近目标时提示用户减速）。这有助于用户更好地了解周围环境，并建立对环境的心理地图。

我们对 Glide 的两种操作模式进行了实验，其自主性逐步增强（图 3）。在 **Glide 主导** 模式下，用户向前推动 Glide，同时 Glide 控制用户的行进方向，使其前往目的地并避开障碍物。在 **用户主导**模式下，Glide 会在决策点（例如走廊中的交叉口）等待用户输入方向，然后控制用户沿期望的行进方向前往下一个决策点，同时避开障碍物。我们在一栋室内办公楼中测试了 Glide；该建筑中的转弯大多为 90 度，转弯之间则是笔直的走廊。

我们对九位盲人及低视力人士开展了用户研究，以评估用户在两种控制模式之间的使用进展以及整体用户体验。具体而言，我们希望了解用户对 Glide 的信任程度、使用 Glide 时的信心水平、Glide 的易用性和可学习性，以及用户使用 Glide 后表现是否有所提升。

研究结果表明，Glide 易于学习，用户也认为两种模式都易于使用。大多数参与者信任 Glide 能够避开障碍物，但系统目前快速响应能力的局限影响了其他参与者对该设备的信任。总体而言，大多数用户在使用 Glide 时都很有信心，而且随着使用时间增加，他们的信心水平也有所提升。此外，用户对模式的偏好各不相同。大多数用户对模式的偏好取决于具体情境。只有少数用户表示，他们明显更偏好其中一种模式。

2 相关研究

我们将讨论定向与移动训练（O&M）、传统行动辅助工具及其局限性。随后，我们将介绍为弥补传统行动辅助工具的局限性而开发的各种辅助技术。

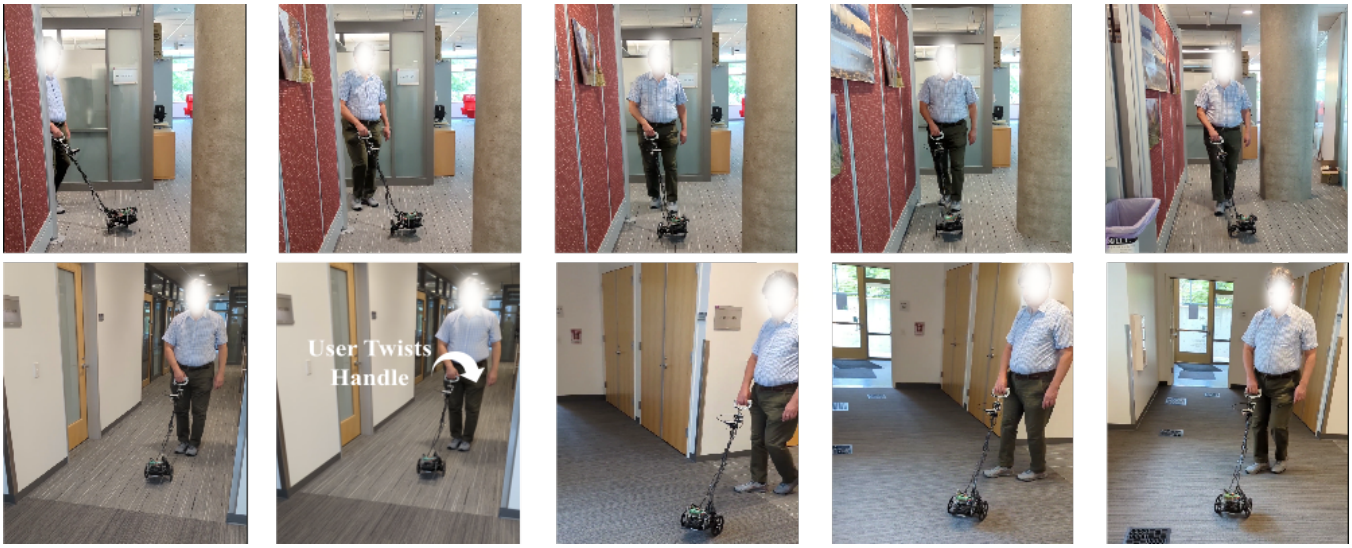

图3：（上）Glide 引导模式展示了用户在引导下绕过拐角，同时避开一根柱子。（下）在用户引导模式中，用户将手柄向左扭转，Glide 随后引导用户向左转弯。

2.1 定向与移动训练

定向与移动训练（O&M）的目的是教会视力障碍者如何在各种环境中安全出行 [8]。这类训练能帮助人们学会利用其他感官获取周围环境的新信息，并安全地进行导航。所教授的一些技巧包括保持直线行进，以及将物体归类为障碍物、线索、地标或危险。如需进一步了解定向与移动训练，请参阅 [8, 13, 19]。

定向与移动技能通常与白手杖或导盲犬等主要助行设备配合使用，而要有效使用这些设备，都需要大量训练。通常，用户必须接受超过100小时的训练，才能熟练使用白手杖。有效使用导盲犬，要求用户熟练使用手杖并具备定向与移动技能。开始与一只新的导盲犬合作可能需要长达6个月，而导盲犬的工作年限通常为6至7年。

此外，这些助行设备还有一些局限性，主要源于其作用范围局部。手杖可以用来感知用户附近的环境，但用户仍需熟悉周围环境，才能前往目的地。导盲犬则可以帮助用户前往数量有限的已知地点，同时避开障碍物。

2.2 面向盲人的辅助技术

多年来，研究人员开发了各种辅助技术，帮助视力障碍人士检测并避开障碍物、提升定向能力和虚拟寻路能力 [16]。相关探索涵盖了多种不同类型的设备，其自主性水平也各不相同。

最容易获得的辅助技术可补充定向与移动技能。这包括商业智能手机应用，例如 Google 地图 [1] 可通过视觉识别地标、提供路线指引并帮助用户重新确定方向；Soundscape [2] 则利用空间音频帮助用户导航，增强他们对周围环境以及目的地方向的感知。这两款应用都使用全球定位系统进行定位，因此仅限于户外导航。研究人员还展示了各种导航系统，可提供逐向导航辅助，帮助盲人用户步行抵达目的地 [1, 3, 5, 17]。然而，这些系统大多无法感知环境初始地图中未标示的障碍物。为帮助盲人用户避免碰撞，传统助行设备已加装传感器，通过非接触式感测来检测障碍物。WeWalk [3] 是一款商用设备，可安装在手杖上，用于检测障碍物并提供全球定位系统导航。以往的增强型白手杖能够检测用户前方的障碍物 [6]，或检测躯干及头部高度的障碍物 [15]。尽管这些设备可以提醒行人注意障碍物，用户仍须自行避开。

研究人员提出，可以用可穿戴设备取代传统助行设备。这类设备通过触觉 [21] 或音频 [4] 反馈提醒用户注意障碍物，并引导用户前往目的地。它们能够实现免手持导航，但需要定制界面，而且可能过重或不便穿戴、手持。机器人导航辅助设备可以作为可穿戴设备的替代方案。CaBot [7] 是一款完全自主的行李箱式机器人，可引导用户前往目的地。然而，该系统缺乏与用户的共享控制，因为用户只能跟随电动机器人的方向和步速。Kayukawa等人 [9] 开发了类似的平台，但用户可以选择启用自主模式，由系统通过语音或方向引导，帮助用户绕开障碍物。

[1] https://www.google.com/maps/preview [2] https://www.microsoft.com/en-us/research/product/soundscape/ [3] https://wewalk.io/en/

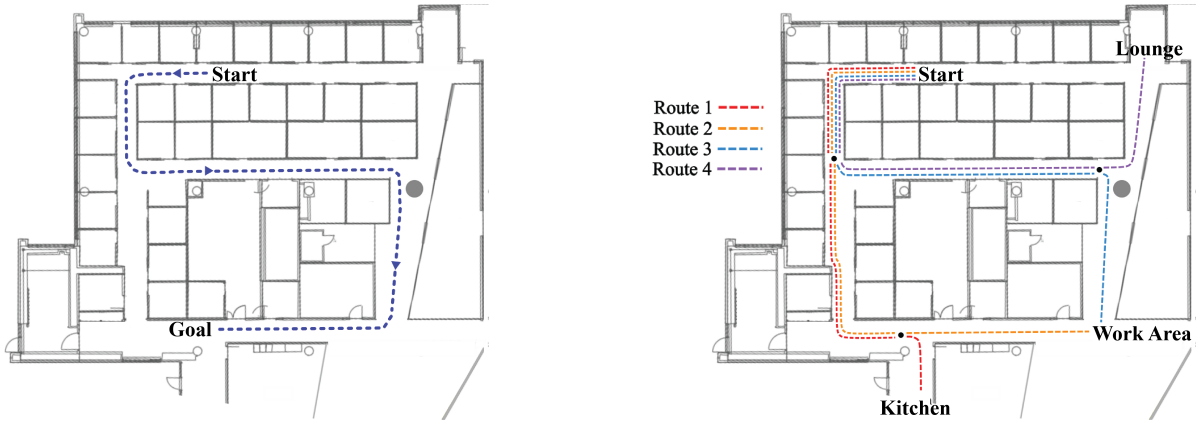

图 4：探索的共享控制方案。Glide 主导模式：（左）用户推动 Glide 行走，Glide 会设定用户的行走方向，使其沿蓝色路径前往目标点。用户主导模式：（右）系统要求用户在决策点为 Glide 指定方向（彩色路径展示了用户可选择的路线）。

2.3 穿越交叉口

此前已有研究探索交叉路口导航，例如Kuribayashi等人 [10]，提出了一款基于智能手机的应用，可提供避障路径并检测交叉路口。然而，这项研究要求用户同时手持手机和手杖，可能并不适合所有盲人出行者。Lacey等人 [11] 提出了PAM-AID，这是一款旨在帮助老年盲人及视障人士在室内安全行走的“智能助行器”。他们采用贝叶斯网络方法，将传感器信息与用户输入相结合；用户通过三个按钮选择前进、左转或右转，从而启动机器人沿所需方向自主移动。虽然这与我们的用户引导模式相似，但作者并未探讨不同的控制等级。

2.4 手杖式导航助手

GuideCane [20] 和 Robotic Cane [2],都提出了一种设计：将一根杆连接到带有被动轮的移动机器人底座上，让用户推动设备，使其绕过障碍物。这两种设备都不提供前往指定目标点的自主导航，而是引导用户避开障碍物。用户通过按下手杖上的方向按钮来指定期望的行走方向。

增强型手杖 [18] 是一种白手杖，杖尖装有全向轮，用户可以控制前进速度，而设备负责转向。该设备具备避障、室内外导航和物体定位功能，但据报告重量较大，而且不允许用户输入期望的行进方向。Co-Robotic Cane [22] 采用滚动式杖尖，并有两种工作模式：主动模式下，设备会在避开障碍物的同时引导用户朝期望的行进方向前进；被动模式下，设备的行为与白手杖相同，但还会通过语音反馈告知期望的行进方向和障碍物信息。该设备能够检测人的意图并自动切换模式，但不具备室内自主导航功能。

受这些研究启发，我们提出了 Glide 导航辅助设备：它便携、轻量化，采用灵活的控制方案，支持室内自主导航和障碍物避让，以及手动步速控制，并可通过转动手柄直观地控制行走方向。我们使用 Glide 探索导航辅助设备的不同控制等级。

3 GLIDE 系统设计

3.1 硬件

Glide 是一款采用以用户为中心的设计的机器人设备。我们设计了一种由用户推动的被动式机器人，以减轻体力负担，同时承载足够的载荷。这种设计还省去了为车轮供电所需的额外电池电量，从而显著节省电量并减轻重量。此外，用户的步行速度可能会随环境刺激而迅速变化。该设计旨在让用户能够控制自身移动，从而消除被设备拖着走的感觉。另一个重要的设计选择是让 Glide 轻量化且便于携带。这样，用户在需要时（例如上下楼梯）可以携带它，也可以轻松地拉动、转动，并按自己的意愿引导它。

Glide 有一根杆，连接着一个在地面滚动的小平台，平台配有可转向、可制动的非动力车轮。用户握住与杆相连的手柄（图 2），并将 Glide 推向身前；用户可以通过手柄感受到车轮顺应地形起伏而产生的反馈。手柄中还设有由六个振动触觉执行器（偏心旋转质量）组成的线性阵列，用于向用户的手传递直观的触觉符号。与手杖形态不同，[18], Glide 的底座约为 9×9 英寸，在地面滚动并承载大部分重量。Glide 的总重量约为 3 磅。

Glide 的传感器使其能够在环境中导航并检测障碍物。Glide 配备了惯性测量单元和车轮编码器，用于计算里程计；配备 Realsense D435i 摄像头，用于感知障碍物；配备伺服电机，用于制动和转向；配备振动触觉执行器，用于提供触觉反馈；还配备 Jetson Xavier NX，用于机载处理。Glide 还配备了 Teensy 4.1 Arduino 处理器，用于处理扭矩传感器的数据；该传感器通过检测用户扭转手柄的动作来感知用户的方向输入，并控制触觉致动器。

表1：研究参与者的人口统计信息

ID	Age	性别	视力等级	障碍持续时间	主要行动辅助工具
P1	40	Male	无功能性视力	>10 年	白手杖
P2	56	女性	无功能性视力；部分光感	>10 年	白手杖和导盲犬
P3	65	Male	无视觉	>10 年	白手杖和导盲犬
P4	56	Male	无视觉	>10 年	白手杖和导盲犬
P5	45	Male	无视觉	>10 年	白手杖
P6	19	女性	法定失明；无周边视觉；深度感知能力较差；无夜视能力	>10 年	白手杖
P7	80	Male	无功能性视力	>10 年	助行器
P8	27	女性	无功能性视力；部分光感	>10 年	白手杖
P9	30	女性	无视觉	5年	白手杖

通过手柄中的简单振动触觉空间模式向用户提供反馈，有助于减轻认知负荷 [12], 能够适应嘈杂的环境，且不会占用用户的听觉感知。手柄上分布着六个振动触觉执行器，可呈现三种振动模式：用户向左扭转手柄时，左侧三个执行器振动；用户向右扭转手柄时，右侧三个执行器振动；所有执行器同时启动则表示用户应减速。根据具体情况，还可以采用许多其他直观的触觉符号。

总而言之，用户必须推动 Glide 才能使其移动（向编码器输入信号），并可通过扭转手柄输入期望的行进方向（向扭矩传感器输入信号）。Glide 会引导用户（向转向伺服机构输出信号）、接合或松开制动器（向制动伺服机构输出二进制信号），并向用户提供触觉反馈（向振动触觉执行器输出信号）。

3.2 导航系统设计

Glide 使用 ROS2（机器人操作系统），这是一个用于机器人控制软件的开源平台。我们专门使用 ROS2 中的 Nav2 进行导航。Glide 通过融合车轮编码器、惯性测量单元（IMU）和 RGBD 相机里程计节点的传感器数据来计算里程计。它使用自适应蒙特卡洛定位（AMCL）软件包进行定位，并使用受约束的纯跟踪规划器进行局部规划。我们依赖于建筑物预先渲染的平面图作为全局地图。虽然 Nav2 支持集成全局规划器，但出于研究目的，我们离线生成了全局规划。尽管 Glide 的导航软件在闭环系统中运行，但人在回路的设计需要特殊考虑。设备无法自行移动，必须由用户推动。如果用户输入期望的行进方向，设备的导航系统就必须更改其全局规划，以纳入用户的反馈（见图 2）。

4 Glide 的模式

4.1 Glide 主导

定向与移动训练中教授的一项技能是路线规划：学习如何获取目的地的信息，以及如何到达那里。这项技能的一部分是先建立关于周围环境的心理地图。在陌生环境中初次导航时，如果没有心理地图，使用手杖或导盲犬可能会很困难。Glide 主导模式旨在通过引导用户从当前位置前往目的地并避开障碍物，减轻这一难题。在此模式下，Glide 会生成一条通往目标的全局规划。用户推动 Glide 时，局部控制器会引导用户沿全局规划前行并避开障碍物。当用户距离目标 2 米时，六个振动触觉执行器会向用户提供反馈，提示其减速；用户到达目标后，制动器便会启动。请注意，此模式与增强型手杖和 CaBot 提供的功能类似。不过，我们采用的反馈模态有所不同。

请注意，出于本研究的目的，我们预先设定了目的地。用户目标设定不在本研究范围内，因为我们的目标是评估 Glide 引导用户前往目的地的有效性，而不是找出设定目标的最佳交互方式。未来的工作中，我们将探索目标设定的交互方式。

4.2 用户主导

定向与移动训练期间教授的另一项技能是独立移动：利用地标和线索，帮助使用者了解自己在特定路线上的位置。这有助于视力障碍者学习新路线。在此模式下，当使用者到达路口时，我们会口头告知他们可选择的行进方向（未来，Glide 将提供这些信息）。通过描述路口，使用者可以学习不熟悉的路线，之后也可以选择使用主要助行设备而非 Glide 进行导航。此模式与 GuideCane、Robotic Cane 和 Co-Robotic Cane 类似，使用者可以控制自己希望前往的方向；不同之处在于，此模式允许使用者在室内环境中导航至已知的特定目的地。

当用户到达交叉口时，Glide 会启动制动器，使用户停下来。随后，用户可以选择左转、右转或直行。用户可以向左或向右扭转手柄，表示想要转向的方向。手柄扭转时，我们会将手柄上扭矩传感器的数值映射为两个离散方向（左和右）。Glide 收到手柄扭转指令后，会通过左侧三个振动触觉执行器发出左转触觉通知，或通过右侧三个执行器发出右转触觉通知，以确认用户输入。提供振动触觉反馈后，制动器会解除，Glide 会规划

表2：各模式下参与者的试验时间（分钟）。

Mode	试验	平均值	标准差	Min	Max
Glide 主导	1	4.84	3.32	3.25	6.17
Glide 主导	2	4.62	1.39	3.78	6.67
Glide 主导	3	4.37	0.89	3.01	6.17
用户主导	1	3.18	1.09	2.27	5.0
用户主导	2	2.95	1.19	1.97	3.57
用户主导	3	3.15	1.07	2.52	4.0

表3：各模式下参与者的错误数量。

Mode	试验	平均值	标准差	Min	Max
Glide 主导	1	3.33	3.32	0	10
Glide 主导	2	2.25	1.39	0	4
Glide 主导	3	1.25	0.87	0	3
用户主导	1	0.44	0.73	0	2
用户主导	2	0.25	0.46	0	1
用户主导	3	0.71	0.76	0	2

一条通往下一个交叉口的全局路径。用户可以开始行走，控制器会引导用户沿着全局规划前进。用户可能遇到三种类型的交叉口：

- **T形路口**：只能左转或右转。制动器将保持启用状态，直到用户向左或向右扭转手柄。
- **L形路口**：只能直行、左转或右转。由于 Glide 默认会规划一条通往下一个路口（如果存在）的向前全局规划，用户无需明确输入即可开始向前行走。如果用户将手柄扭转到没有可行路径的方向，制动器将启用一段固定时间，随后解除，让用户可以按需向前行走。
- **四岔路口**：用户可以直行、左转或右转 .

5 用户研究

我们对 9 位盲人和低视力人士参与者开展了用户研究。主要目标是：1）了解用户是否信任 Glide；2）了解用户使用 Glide 时是否有信心；3）评估用户的表现是否随时间提升（即错误数量是否减少）；4）了解 Glide 是否易于使用和学习。

5.1 参与者

我们招募了 9 位盲人或低视力人士参与这项研究（表 1）。参与者的纳入标准是没有功能性视力。大多数参与者认为自己在熟悉的路线*(Mdn=5，标准差=0.48)*上出行时有信心，而在不熟悉的路线*(Mdn=2，标准差=0.66)*上则没有信心，评分范围从完全没有信心 (1) 到极有信心 (5)。我们承认，9 人的样本量对于定量研究来说太小，因此开展了一项定性研究，着重呈现参与者无法量化的体验。

5.2 研究设计

我们的研究经机构审查委员会（IRB）批准。我们首先征得了所有参与者的知情同意，介绍了研究概况，并说明了如何操作 Glide。我们告知用户，实验人员会始终在附近保障他们的安全，只有在必要时才会介入。

我们将研究分为三个部分。第一部分旨在评估 Glide 引导模式：用户从固定的起始位置出发，由 Glide 引导至预先设定的目标地点。每位参与者都完成了三次步行路线（图 4）。由于系统目前存在局限，我们建议参与者放慢步伐行走。我们告诉他们：“走路时，就像一步一步地把一只脚放到另一只脚前面。”

我们记录了参与者是否完成路线，以及完成路线所用的时间。此外，我们还测量了错误次数，包括参与者与 Glide 未对齐的次数（即用户没有正好站在 Glide 正后方），以及可能发生碰撞的次数（实验人员在碰撞发生前进行了干预）。参与者完成路线三次后，我们请他们对一系列陈述表示认同程度（图 5），并在 7 点李克特量表上回答 NASA 任务负荷指数（TLX）。此外，他们还回答了三个开放式问题：（1）您最喜欢这种模式的哪些方面？（2）您最不喜欢这种模式的哪些方面？（3）您觉得自己会在什么时候使用这种模式？

在第二部分中，我们评估了用户引导模式。我们让用户自行选择并完成三条路线（图4）。目的地有三个：休息室、工作区和厨房。在每个路口，我们都会告知用户可以朝哪些方向前往不同的目的地。例如，我们会说：“直走可以前往工作区或厨房，左转可以前往工作区或休息室。”之后，用户可以通过转动手柄选择所需方向，接收触觉反馈后开始行走。我们记录的指标以及开放式问题的回答与第一部分相同。

在最后一部分，参与者填写了退出问卷，反馈他们使用各种模式的体验，并提出了改进 Glide 的建议。请注意，我们没有对各部分进行平衡顺序安排，因为我们的目标不是比较这两种模式，而是分别对每种模式进行总体分析。

6 研究结果

对 Glide 的信任–我们将信任定义为用户对系统可靠性的评估。约 70% 的参与者信任 Glide 在 Glide 引导模式下引导他们绕开障碍物（图5），约 60% 的参与者在用户引导模式下信任 Glide（图5）。总体而言，用户信任 Glide，因为其控制器在大多数情况下能够安全地引导用户绕开障碍物并避开墙壁。目前系统的一项局限是，用户必须位于 Glide 正后方的中央位置，并以较慢的速度行走，才能给控制器留出足够的时间和空间进行有效引导。如果用户没有对准位置或行走过快，控制器有时无法将用户引导回全局路线。一些参与者表示，他们不喜欢 Glide 撞上墙壁或擦着墙壁行进；这影响了他们对 Glide 的信任。

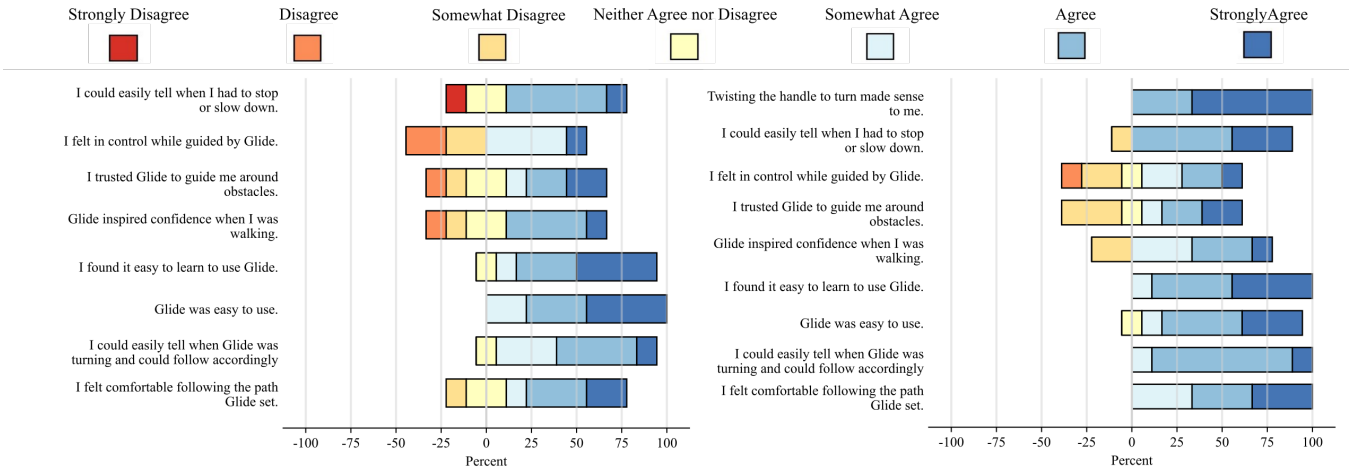

图5：参与者对 Glide 引导模式（左）和用户引导模式（右）的可学习性、易用性、舒适度、信任和信心的认同陈述。

使用 Glide 时的信心–我们将信心定义为用户对自身有效使用系统能力的评估。约 70% 的参与者认同，在 Glide 引导模式下行走时，Glide 让他们更有信心；在用户引导模式下，认同这一点的参与者略多于 75%（图5）。一位参与者提到，从 Glide 引导模式切换到用户引导模式需要经历一段学习过程，并表示自己在用户引导模式下信心有所增强：“*[Glide 主导]* 模式下，我主要是在学习如何使用 *Glide*；到了 *[用户主导]* 模式时，我觉得自己准备得更充分。”此外，在用户引导模式下，用户可以通过扭转手柄选择行进方向，这也增强了信心：“*[用户主导]* 模式让我更有动力，比在 *[Glide 主导]* 模式下走得更快。*[Glide 主导]* 模式让我觉得更迟疑，因为我不知道自己要往哪里走。”更具体地说，从系统层面来看，扭矩传感器处理的手柄扭转动作，以及系统为确认用户输入而提供的触觉反馈，都增强了用户的信心。

可学习性、易用性与舒适度–约95%的参与者认为，Glide 引导模式易于学习；在用户引导模式下，持相同看法的参与者达到100%（图5）。100%的参与者认为，Glide 引导模式易于使用；在用户引导模式下，约95%的参与者持相同看法（图5）。参与者认为 Glide 操作直观，并且喜欢其运动轻松度：“移动起来毫不费力；感觉并非被强行带动，而是很自然。”约95%的参与者认为，在 Glide 引导模式下，他们能够判断 Glide 何时转弯并相应跟随；在用户引导模式下，持相同看法的参与者达到100%（图5）。许多参与者特别指出，他们喜欢 Glide 的转弯方式：“我喜欢它转弯的方式，我很容易判断自己什么时候该转弯。第一次试用时，我甚至没意识到它在给我信号，只是下意识地跟着它转了。”，“我喜欢它缓缓转弯，而不是一下子转*90*度。”在系统层面，全局规划的形状影响了参与者所描述的行为。全局规划采用了较大的转弯半径，使转弯更加平缓。此外，约75%的参与者认为，他们对路径感到舒适在 Glide 引导模式下，Glide 设定的路径；在用户引导模式下，持相同看法的参与者达到100%（图5）。具体而言，在用户引导模式下，用户能够选择 Glide 在交叉口之间设定的全局规划方向，这提高了他们的舒适度。

性能——我们根据错误次数和完成一次试验所用的时间来衡量性能。当用户与 Glide 未能保持对齐，可能导致碰撞时，即视为发生错误。表2和表3展示了所有参与者在两种模式下的错误次数和试验完成时间。在 Glide 引导模式下，随着用户继续使用 Glide，两种模式中的错误次数以及试验完成时间均有所下降。由于用户选择的路线长度各不相同，我们无法比较用户引导模式下的试验时间。总体而言，参与者的表现随着时间推移而提升，这是因为他们能够出于上述原因迅速学会如何使用 Glide。

对移动的控制——我们为 Glide 设计了被动轮，让用户能够控制自己的步行速度。我们注意到，有些用户会根据 Glide 的行进方向调整速度。例如，Glide 转弯时，有些用户会比直行时走得更慢。此外，如果 Glide 擦碰到墙，用户可以停下、后退并重新调整 Glide 的方向。有一位用户尤其能够通过回声定位感知自己与障碍物的距离，并会在靠近障碍物时放慢速度。与电动机器人不同，这种设计让用户可以按照自己的意愿调整速度，并在感到不安全时停下和／或重新调整方向。

来自 Glide 的反馈–随着参与者继续使用 Glide，他们对减速时的触觉反馈和制动越来越适应。约 75% 的参与者表示，他们能轻松判断何时需要在 Glide 引导模式下停下或减速；在用户引导模式下，约 90% 的参与者表示认同（图5）。100% 的参与者认为，在用户引导模式下通过扭转手柄来转向的操作对他们来说很合理。总体而言，大多数参与者表示喜欢扭转这一动作。一位参与者说：“我觉得扭转手柄很直观，不需要费太

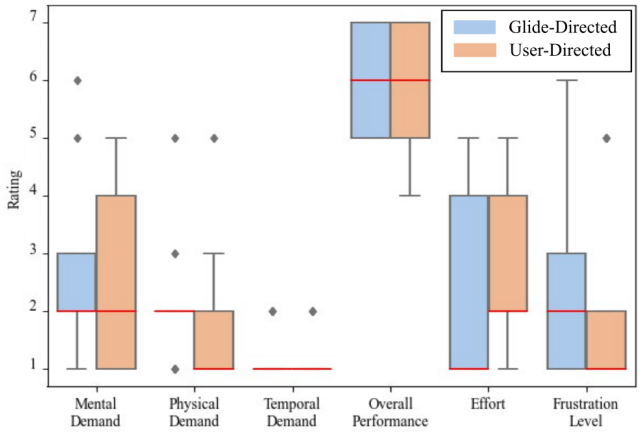

图6：参与者的 NASA-TLX 评分范围为（1）低至（7）高。红线表示中位数。

多力，也不用改变设备的朝向。我喜欢制动器启动前收到的触觉反馈，这样我就知道该减速了。”

任务工作负荷–每探索一种模式后，都会评估任务负荷指数，图6展示了所有参与者评分的中位数。总体而言，各模式下的身体和时间需求都较低，参与者认为自己在两种模式下的表现都很好。参与者认为，用户引导模式比 Glide 引导模式在心理上要求更高：“ *[用户主导]* 模式更具挑战性，因为我必须做决定”,“在 *[Glide* 主导*]* 模式下，我不需要思考，但在 *[*用户主导*]* 模式下，我得思考更多，也要做更多选择。”

Glide 引导模式的用途–四位参与者表示，他们会在陌生或拥挤的区域使用 Glide 引导模式：“在拥挤且陌生的环境中很有用。手杖需要通过撞到障碍物来确定障碍物的位置，而这种模式会直接帮你避开障碍物”，“在陌生的酒店里，与其寻求帮助，让别人带我去会议室，不如让 *Glide* 引导我。”，“在公园、节庆活动或农贸市场等拥挤区域时，我会使用它。”，“我能想象自己去餐厅时会使用它。”一位参与者表示自己绝不会使用它，另有两位参与者表示会一直使用它。一位参与者建议将 Glide 与购物车结合起来，这样他们就能把食品杂货推回家。一位参与者表示不确定自己会在什么时候使用这种模式。

用户主导模式的用途——四位参与者表示，他们会在室内使用用户引导模式。其中两位参与者特别指出，他们会在陌生的室内环境中使用该模式：“我会在陌生环境中使用它；如果我想独立前往特定房间或地点，也会使用。”，“我会在室内使用它，以便通过语音反馈了解自己可以去哪里。”一位参与者表示，过马路时会在室外使用该模式。但另一位参与者指出，在室外使用这种模式会很困难：“我通常去某个地方时需要跟着 *Google* 地图走。我不知道该怎么同时拿着 *Glide* 和手机。我觉得在室外时需要付出更多努力。”一位参与者表示，在想要选择路线时会使用 Glide。另一位参与者表示，在他们不想与他人或导盲犬互动时，会使用 Glide。一位参与者表示，他们不确定自己会在什么时候使用这种模式。

7 局限性与未来工作

速度–我们要求用户以较慢的速度行走，以应对所用控制器的延迟问题。如果用户走得太快，控制器就无法及时做出反应。用户会离墙太近，控制器也无法找到合适的轨迹来避开墙壁。在这些情况下，我们不得不要求用户停下并后退。许多用户表示，他们希望能够走得更快。

与 Glide 的对齐–参与者表示，很难始终正好走在 Glide 后方。一位用户说：“我想试试把机器人放在身边，而不是前面。”Glide 需要能够适应用户相对于它的各种位置。此外，当用户没有位于 Glide 正后方时，他们往往会偏向墙壁。Glide 会通过将轮子转向远离墙壁的方向来进行补偿，但这会导致“之”字形移动。

全局地图–目前 Glide 依赖于环境的全局地图。在未来的迭代中，我们希望 Glide 能够同时绘制环境地图并在其中导航。

复杂环境–目前，Glide 只能在单一、平坦的室内平面布局中运行。我们希望 Glide 能够在更复杂的环境中运行，包括有悬挑结构、楼梯、电梯、坡道等的环境。此外，我们还希望 Glide 能够在室外运行。

交互模态–我们承认，本研究存在一些局限性，因为我们没有与现有的交互方式（如基于音频的交互）进行比较。不过，我们限制了交互机制，以免给用户造成过多负担。尽管我们已尽力如此，仍有一些用户指出，使用交互功能最多的用户主导模式时，心理工作负荷较高，并且他们更倾向于 Glide 引导模式（图 6）。

8 讨论与结论

本文探讨了 Glide 所提供的辅助导航控制等级。研究证实，Glide 易于使用和学习。大多数用户信任 Glide，但当前系统的一些局限性影响了其余用户对 Glide 的信任。随着用户持续使用 Glide，他们变得更加自信，表现也有所提升。

一个关键发现是，用户对模式的偏好以及所需的自主性程度各不相同。此外，用户还会根据所处情境使用不同的模式。未来可以探索的一个方向是定制化。设计一种能够满足所有用户偏好的单一模式是不可能的。用户应该能够选择自己想要使用的模式。

此外，用户对于希望 Glide 提供何种交互和反馈各有不同看法。例如，一些用户表示希望获得音频反馈，而另一位用户则表示，相较于音频反馈，他们更偏好更丰富的触觉词汇。没有哪一种交互技术或反馈类型必然更有用。在未来的工作中，我们计划尝试

其他交互技术和反馈方式，并让用户从各种选项中进行选择。

参考文献

[1] D. Ahmetovic, C. Gleason, C. Ruan, K. Kitani, H. Takagi, and C. Asakawa. 2016. NavCog：面向盲人的导航认知助手。载于移动设备与服务人机交互会议。90–99。[2] P. Aigner and B. McCarragher. 1999. 应用于盲人机器人辅助设备的共享控制框架。控制系统 19, 2 (1999), 40–46。[3] N. Fallah, I. Apostolopoulos, K. Bekris, and E. Folmer. 2012. 将用户作为传感器：利用触觉地标引导视力障碍用户在室内空间中导航。载于*CHI '12*。425–432。[4] A. Fiannaca, I. Apostolopoulous, and E. Folmer. 2014. Headlock：帮助盲人手杖使用者穿越大型开放空间的可穿戴导航辅助设备。载于*SIGACCESS*计算机与无障碍会议。ACM，19–26。[5] G. Fusco, S.A. Cheraghi, L. Neat, and J.M. Coughlan. 2020. 利用计算机视觉和标志识别的室内导航应用。载于帮助特殊需求人士的计算机会议。施普林格，485–494。[6] S. Gallo, D. Chapuis, L. Santos-Carreras, Y. Kim, P. Retornaz, H. Bleuler, and R. Gassert. 2010. 配备多模态触觉反馈的增强型白手杖。载于机器人与自动化学会及生物医学工程学会生物医学机器人与生物机电一体化会议。电气电子工程师学会，149–155。[7] J. Guerreiro, D. Sato, S. Asakawa, H. Dong, K. M Kitani, and C. Asakawa. 2019. Cabot：面向盲人的自主导航机器人的设计与评估。载于*SIGACCESS*计算机与无障碍会议。ACM，68–82。[8] W.H. Jacobson. 1993. 为视力障碍人士教授定向与移动的艺术与科学。美国盲人基金会。[9] S. Kayukawa, T. Ishihara, H. Takagi, S. Morishima, and C. Asakawa. 2020. 通过理解附近行人的步行行为，引导盲人行人在公共空间中通行。交互式、移动式、可穿戴及普适技术论文集4, 3（2020），1–22。[10] M. Kuribayashi, S. Kayukawa, J. Vongkulbhisal, C. Asakawa, D. Sato, H. Takagi, and S. Morishima. 2022. Corridor-Walker：帮助盲人在室内行走、避开障碍物并识别交叉口的移动式室内步行辅助。人机交互论文集6, MHCI（2022），1–22。[11] G. Lacey and S. 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。*Robotics Research* 19, 11 (2000), 1054–1065。[12] M. Martinez, A. Constantinescu, B. Schauerte, D. Koester, and R. Stiefelhagen. 2014. 短距离导航任务中触觉与音频反馈的认知评估。载于残障人士计算机会议。施普林格，128–135。[13] R. Mettler. 1998. 认知学习理论与手杖出行指导：一种新范式。DIANE Publishing。[14] 美国全国盲人联合会。2019年。美国全国盲人联合会：失明统计数据。https://nfb.org/resources/blindness-statistics [15] R. Pyun, Ye. Kim, P. Wespe, R. Gassert, and S. Schneller. 2013. 具有障碍物高度和距离反馈功能的先进增强型白手杖。载于国际康复机器人会议。电气电子工程师学会，1–6。[16] U.R. Roentgen, G.J. Gelderblom, M. Soede, and L.P. De Witte. 2008. 视力障碍人士电子移动辅助设备目录：文献综述。视觉障碍与失明 102, 11 (2008), 702–724。[17] D. Sato, U. Oh, J. Guerreiro, D. Ahmetovic, K. Naito, H. Takagi, K. M Kitani, and C. Asakawa. 2019. NavCog3实地应用：具有语义特征的大规模盲人室内导航助手。无障碍计算汇刊（*TACCESS*）12, 3（2019），1–30。[18] P. Slade, A. Tambe, and M.J. Kochenderfer. 2021. 多模态感知与直观转向辅助可改善视力受损人士的导航与移动能力。*Science Robotics* 6, 59 (2021), eabg6594。[19] M. Swobodzinski and M. Raubal. 2009. 盲人室内路径规划算法：开发及与视力正常者路径规划算法的比较。地理信息科学杂志 23, 10 (2009), 1315–1343。[20] I. Ulrich and J. Borenstein. 2001. GuideCane——将移动机器人技术应用于视障人士辅助。系统、人类与控制论*A*辑：系统与人类 31, 2 (2001), 131–136。[21] H-C. Wang, R.K. Katzschmann, S. Teng, B. Araki, L. Giarré, and D. Rus. 2017. 通过可穿戴视觉反馈系统实现视障人士自主导航。载于国际机器人与自动化会议。电气电子工程师学会，6533–6540。[22] C. Ye, S. Hong, X. Qian, and W. Wu. 2016. Co-robotic cane：一种新型视障人士机器人导航辅助器。系统、人类与控制论2, 2 (2016), 33–42。