

# 逐向导航辅助对大尺度环境下空间记忆的影响及改进方法\*

张艳霞 李 晶

(南京师范大学心理学院, 南京 210097)

**摘 要** 科技的迅速发展使得人的行为越来越“自动化”, 借助逐向导航人们可以按照正确路线快速到达目的地, 然而如此高效率的寻路方式带来的可能是空间记忆的削弱。众多研究结果显示逐向导航辅助不利于空间知识的获取, 研究者们开始改进逐向导航或设计新的导航系统。在此基础上本文提出了逐向导航辅助对空间记忆的影响模型, 针对如何改进逐向导航提出相关建议。未来研究应改进大尺度环境下空间知识的测量方法, 探究逐向导航辅助削弱空间记忆的神经机制, 关注个体因素的影响以构建一个更全面的解释机制, 开发兼具寻路效率和空间知识获取的新导航系统。

**关键词** 逐向导航, 导航辅助, 空间记忆

**分类号** B842

## 1 引言

导航(navigation)是指个体规划路线并通过空间上的移动到达目的地(Ishikawa et al., 2008)。古时候人们根据太阳、北极星的位置或植物的生长特征等方法寻路(wayfinding), 耗费大量的时间精力才能到达目的地。科学技术日新月异, 导航辅助(navigation aids)在生活中无处不在, 如带有全球定位系统(Global Positioning System, GPS)的各种设备(Gardony et al., 2015)。基于GPS的移动导航辅助系统(GPS-based mobile navigation assistance systems)能提高寻路效率(Hergan & Umek, 2017), 极大地便利了人们的生活。现代社会人们通常不再需要掌握这些技巧, 只需要跟着导航指令走, 就能轻松到达目的地。导航系统帮助个体更快地到达目的地的同时, 也减少了寻路时的脑力劳动(Brügger et al., 2018), 但这使得个体难以学习环境的空间结构(Münzer et al., 2012)。使用导航系统

带来的长期负面影响大于好的方向感和心理旋转能力所带来的益处(Ishikawa, 2019), 随之产生的代价可能是人们对环境的空间记忆受到了损害。大尺度环境(large-scale environment)在心理学中一般指个体所生活的自然环境, 在此类环境中, 个体常常需要执行诸如寻路等空间任务, 这些任务要求他们学习和掌握环境的整体布局 and 结构; 相比之下, 小尺度环境中空间任务则更加关注对局部图形或物体的心理表征(Hegarty et al., 2006)。大尺度环境的空间记忆表征包括三部分: 地标知识(landmark knowledge), 路径知识(routes knowledge)和全局知识(survey knowledge)。其中, 地标知识主要指环境中突出的地点; 路径则将这些作为外部参照点的地标连接起来, 因此路径知识由一系列的点组成; 全局知识指在类似于地图的环境中有关地标和路线的结构的概念, 它将所有内容联系起来, 形成一个空间关系表征(Siegel & White, 1975)。在导航过程中, 路径知识比全局知识需要的认知努力更少(Van Asselen et al., 2006)。路径知识使人们能够沿着已知的路径从一个地点到达另一个地点, 而全局知识包括结构信息, 使人们能够发现地点间的捷径, 探索新路线(Chrastil & Warren, 2012)。导航辅助主要用于在未知环境

收稿日期: 2024-04-18

\* 教育部人文社会科学研究规划基金(24YJA190007), 国家重点研发计划(2021YFE0112300), 国家自然科学基金面上项目(42371444)。

通信作者: 李晶, E-mail: lij@njnu.edu.cn

中引导人们到达特定目的地(Münzer et al., 2012), 可以分为逐向导航(turn-by-turn navigation)、非逐向导航(non-turn-by-turn navigation) (Kuo et al., 2023)和纸质地图(paper map)。目前的导航软件大多采用逐向导航, 如高德地图和百度地图。本文系统梳理了有关逐向导航辅助对空间记忆的影响研究。目前研究可以分为两方面: 将逐向导航辅助与纸质地图进行比较, 旨在探讨逐向导航辅助在空间知识获取方面的影响; 设计新的不同于逐向导航的导航辅助系统, 对传统的逐向导航进行改进和创新。

## 2 逐向导航辅助的负面效应

逐向导航基于转弯点给出指令, 路线是完全预定义的(Mazurkiewicz et al., 2023)。指令一般包含转弯方向和距离信息, 有时只提供转向信息, 一个典型的逐向导航指令如“300 米后左转”。逐向导航辅助的特点在于使用 GPS 技术在移动设备上实现, 因此能够实时更新个体当前的位置。这与作为传统导航辅助工具的纸质地图不同, 纸质地图主要基于纸张和印刷技术, 是静态的, 不具备交互性(丁旭华, 2015)。逐向导航可以利用不同的界面技术来传达指令, 如增强现实技术(Augmented Reality, AR)。据此, 逐向导航可分为基于 GPS 的 2D 移动地图和基于 GPS 的 AR 移动地图(Huang et al., 2012; Mazurkiewicz et al., 2023) (图 1)。



图 1 基于 GPS 的 2D 移动地图(左)和基于 GPS 的 AR 移动地图(右) (资料来源: Mazurkiewicz et al., 2023; Qiu et al., 2023)

### 2.1 逐向导航辅助是否会削弱人的空间记忆?

大部分研究结果显示逐向导航辅助的使用不

利于空间记忆的形成。Hejtmánek 等人(2018)的研究表明逐向导航会阻碍个体获取空间知识。该实验要求被试在虚拟城市中执行来回导航任务(there-and-back navigation task), 并伴有眼动追踪, 结果发现个体在学习过程中花在 GPS 地图上的时间越多, 回忆过程中的导航表现、指向正确率以及延迟空间知识越差。Fenech 等人(2010)安排一组被试驾驶时使用语音逐向导航, 另一组被试驾驶时不提供导航辅助, 模拟驾驶结束后完成场景再认任务(scene recognition paradigm), 结果显示无导航辅助组对场景的识别能力高于语音逐向导航组, 这表明在驾驶时使用导航系统会造成注意盲视, 无法“看到”周围环境的特征。在 Gardony 等人(2013)的实验中, 被试在虚拟寻路任务中使用口头语音指令(如“稍向左, 400 英尺”)、音调指令(当转向为“向右”时, 从 90 度方位角播放合成的音调, 距离越近音量越大), 或无任何辅助手段(控制组)进行导航, 随后完成地标回忆、地图绘制和指向任务。结果表明, 尽管口头语音指令和音调指令均提高了导航效率, 但与控制组相比, 仍然在一定程度上削弱了被试的空间记忆。与纸质地图相比也是如此, 例如, 在 Xu 等人(2022)的研究中, 被试使用不提供任何指令的移动地图、纸质地图和有语音指令的移动地图在某大学完成导航任务, 结果发现移动地图的寻路效率均高于纸质地图, 然而使用不提供指令的移动地图获取的路径记忆却不如纸质地图, 不过, 三者在地标知识和全局知识方面均无显著差异。Sugimoto 等人(2022)要求人们使用手机移动地图和纸质地图学习城市环境, 结果显示使用手机移动地图的个体地标再认数更低、路线回溯表现更差, 但场景再认结果无显著差异。这与 Fenech 等人(2010)的研究结果不同, 可能是因为需要被试再认的场景数量不同导致任务难度存在差异, 前者只有 11 个(Fenech et al., 2010), 后者多达 22 个。Ishikawa 等人(2008)安排被试在某居民区使用纸质地图、逐向导航或利用直接经验进行寻路任务, 最后估计起点方向并绘制地图, 结果显示逐向导航组的方向估计误差高于直接经验组, 地图绘制精度也低于直接经验组, 与纸质地图则无差异。Ben-Elia (2021)要求司机使用纸质地图或谷歌地图提供的视听逐向导航在城市住宅区的一条路线寻路, 结果发现在寻路之前记忆纸质地图的司机在地标再认方面比遵循视听逐向导航的司机更好, 路径知

识和全局知识则无显著差异。然而, Kelly 等(2022)的研究结果却表明在虚拟环境中逐向导航并不会影响路径记忆。学习组在4次驾驶模拟中都接受了逐向导航, 测试组在前两次模拟中使用逐向导航, 在随后的两次模拟中完成路线回溯任务。48h后, 所有被试接受最终测试。结果显示与最初接受逐向导航的帮助但后来从记忆中提取路线的个体(测试组)相比, 反复遵循逐向导航(学习组)获取的路径知识并不差。

综上所述, 就地标知识而言, 部分研究表明使用2D移动地图获得的地标知识不如纸质地图(Ben-Elia, 2021; Fenech et al., 2010; Sugimoto et al., 2022), 也有研究结果表明无明显差异(Xu et al., 2022; Yount et al., 2022)。这可能是因为地标再认任务所选取的地标数量不同, 数量较少可能产生天花板效应, 从而导致任务的区分度较低。例如, Xu等(2022)的研究中地标再认数量仅为3个, 而Sugimoto等(2022)则要求被试尽可能记住路过的各种地标, 如便利店、交通信号灯等, 有的甚至多达22个(Fenech et al., 2010)。就路径知识而言, 部分研究表明从纸质地图获取的路径知识与2D移动地图无差异(Ben-Elia, 2021; Kelly et al., 2022; Yount et al., 2022), 也有研究显示优于2D移动地图(Sugimoto et al., 2022; Xu et al., 2022)。研究结果间的差异可能是由于实验环境一般为被试不熟悉的新环境, 相比于步行导航, 被试驾驶时需要避免碰撞事故的发生, 投入更多的注意资源, 此时移动导航设备的分心作用减弱。因此, 这可能导致被试驾驶时使用2D移动地图获取的路径记忆与使用纸质地图时类似。就全局知识而言, 移动地图不利于空间记忆的形成(Hejtmánek et al., 2018), 不如纸质地图(Ishikawa et al., 2008; Yount et al., 2022), 但也有研究显示并无明显差异(Ben-Elia, 2021; Xu et al., 2022)。究其原因, 可能是使用距离估计、时间估计和指向估计等方法难以全面评估个体获得的有关环境结构的记忆(Ben-Elia, 2021; Xu et al., 2022)。因此, 尽管研究结果之间存在差异, 但在空间知识的获取上逐向导航辅助要么不如纸质地图或直接经验, 要么与其无明显差异。

当研究者们发现相比使用纸质地图或利用直接经验, 使用基于GPS的2D移动地图获得的空间知识较差时, 希望借助新技术以弥补逐向导航辅助的不足。AR (Augmented Reality)是指将数字

信息与现实世界相结合, 实时呈现虚拟内容和真实内容, 其中真实的物理环境是个体AR体验的一部分(Rauschnabel et al., 2022)。AR地图正是基于现实世界显示虚拟路线的地图。

Dong等人(2021)要求被试使用AR地图或2D移动地图在某大学完成寻路任务, 结果表明两种地图的寻路效率相当, 但地图的绘制结果显示使用AR地图更难对路线形成清晰的记忆。这表明AR地图形成的全局知识不如2D移动地图。不过, Qiu等人(2023)进行了一项类似的研究, 被试使用百度地图(包含AR地图和2D移动地图两种方式)在某大学从起点前往目的地。完成场景再认和方向判断任务(scene recognition and orientation judgment task)、场景序列任务(scene-sequencing task)和结构表征任务(configurational representation task)。结果发现2D移动地图的导航效率优于AR地图, 而AR地图在地标和路径知识方面优于2D移动地图。但在全局知识获取方面, 2D移动地图与AR地图相当。有研究者以虚拟环境为背景, 系统比较了纸质地图、电子地图(E-map, 与2D移动地图类似)和AR地图(Yount et al., 2022)。在纸质地图条件下, 个体开车前学习地图, 开车时也可以参考地图; 电子地图条件下仪表盘会显示一个小的地图, 根据驾驶员位置实时更新, 提供转弯指令(例如, “在下一个十字路口右转”); AR地图条件下道路上有一条绿色的路线, 并且在转弯位置有悬浮的箭头指示转弯方向。完成导航任务后, 被试需要进行地标再认、地标排序和地图选择(即在10张地图中进行选择, 其中一张地图完美匹配, 而其他9张则各自包含了从1到9个不同程度的错误)。结果发现, 3种导航辅助方式在地标知识和路径知识上无明显差异, 不过, 使用纸质地图时所犯的地图选择错误显著少于AR地图, 而电子地图与二者则无显著差异。然而, 有研究表明在空间知识获取方面, 2D移动地图、AR地图和语音导航并无差异(Huang et al., 2012)。但需要注意的是, 该研究所使用的2D移动地图并没有提供逐向导航, 而是提供了一条虚拟的绿色路线, 语音导航提供包含语义信息的听觉指令(“直走, 经过剧院, 然后走到十字路口”), 而不是简单的逐向指令(“左转”)。

总的来说, 对于地标知识和路径知识, AR地图可能优于2D移动地图(Qiu et al., 2023), 也有研究表明两者之间并无显著差异(Yount et al., 2022)。这种

差异可能源于实验环境的不同：前者基于真实的生活环境，而后者使用的是虚拟环境，AR地图在复杂的真实环境中可能具有一定优势。此外，在Yount等人(2022)的研究中，地标再认测验的新地标图片数量较少，只有两个，而旧地标图片数量为8个，这可能导致所有被试的正确率较高。对于全局知识，AR地图可能不如2D移动地图(Dong et al., 2021)，也可能无显著差异(Qiu et al., 2023; Yount et al., 2022)。这一结果可能与不同的任务类型有关：前者采用的是草图绘制任务，而其他研究则使用地标放置任务或地图选择任务。草图绘制任务要求被试回忆并画出认知地图，能更有效地反映个体获得的全局知识。因此，关于AR地图与2D移动地图在空间知识获取方面孰优孰劣仍存在争议。

## 2.2 逐向导航辅助为何会削弱空间记忆？

逐向导航自动化了部分认知过程，导致个体未能深度加工信息，难以形成稳固的空间记忆。一次成功的导航首先需要在空间中确定自身所处位置，明确方向，接着需要根据目的地位置规划路线、执行路线，最后到达目的地(Ishikawa et al., 2008)。因此，编码、存储和识别环境视觉细节的过程是寻路的关键部分(Afrooz et al., 2018)。使用纸质地图寻路需要主动对空间信息进行处理、转换、记忆(Münzer et al., 2012)，有意地进行空间定位(Ishikawa, 2019)，付出额外的积极努力(Münzer et al., 2006)，为确定路线而决策。然而，逐向导航将这些信息处理过程主动包揽，只提供答案。例如，移动导航系统提供了定位信息，个体无需自己定位(Xu et al., 2022)，也不会努力获取空间知识，因为这些知识对于到达目的地不再是必需的(Krüger et al., 2004)。使用纸质地图时，人们需要进行心理旋转以确定正确的转弯方向，但这被移动地图消除了(Yount et al., 2022)。逐向导航还包揽了个体的决策过程，使个体从路线规划的决策者转为指令的执行者。使用纸质地图时，个体作为决策者需要了解当前位置与环境地点的空间关系，使得身体和环境之间建立关系，并做出具体的转弯决定，在更深层次上处理信息；然而，使用逐向导航辅助时，执行指令是反应性的，个体以自我中心为视角，无需对环境进行表征(Bakdash et al., 2008; Burnett & Lee, 2005)。研究发现路线决策的增加对全局知识的获取有促进作用(Lu et al., 2021)，因此，导航系统应当归还个体的路线决定权。

逐向导航呈现空间信息的方式不利于个体学习

环境结构，获取全局知识。纸质地图以非中心化的全局表征呈现空间信息，直接展示了环境结构及地点间的空间关系，有助于个体理解环境结构(Münzer et al., 2006, 2012)。然而，逐向指令与个体本身处理空间信息的方式不相容，个体并不是一个接一个地单独执行指令，而是整合信息，在寻路过程中自发地学习空间结构并建立认知地图(Schwering et al., 2017)。此外，逐向导航的交互界面呈现的信息与个体自身视角相符，有利于寻路，但环境结构信息根本没有呈现或不完整(Münzer et al., 2006, 2012)，个体失去了整合空间信息的必要性。这可能导致个体使用逐向导航时倾向于采用视觉主导的策略，使用纸质地图时倾向于采用空间主导的策略。在视觉主导的策略中，被试的寻路决策基于路途中视觉识别的决策点(如，地标)，但决策点没有整合到全局表征中；在空间主导的策略中，被试从一开始就把环境表征为一张全局地图(Aginsky et al., 1997)。这或许能解释为什么使用纸质地图可能获得更好的全局知识。

逐向导航通过分心作用减少个体与环境的交流，阻碍空间知识的获取。寻路是从建筑环境中收集信息的过程，以了解自身相对于目的地的位置及如何到达(Woyciechowicz & Shlisselberg, 1903)。使用纸质地图的驾驶员更加关注驾驶环境(Burnett & Lee, 2005)，然而遵循简单的逐向导航指令使得关注与导航任务相关的环境不再是必须的(Gramann et al., 2017)，使用GPS导航可能导致与环境的接触减少，逐渐脱离环境(Leshed et al., 2008)。具体而言，个体将注意集中在GPS导航上(Hejtmánek et al., 2018)，空间探索行为减少，导致空间知识的获取减少(Schade et al., 2023)。由于逐向导航下达的转弯指令与距离有关，而该距离由个体当前位置和下一个转弯路口的位置决定，交互界面会实时更新个体当前的位置，故指令会多次提醒个体当前余下的距离。因此，个体需要关注屏幕上不断更新的信息(Ishikawa et al., 2008)，注意不断地在移动设备和环境之间分散(Willis et al., 2009)，并且，注意的分散与空间信息的整合相冲突(Huston & Hamburger, 2023)，不利于空间记忆的形成。逐向导航一般基于移动设备使用，有研究表明，没有次任务时，导航辅助设备的存在会损害空间记忆，但当存在次任务(即个体注意被分散时)，这种影响不会更大，这说明导航设备

本身足以分散注意(Gardony et al., 2015)。综上所述, 研究者们对逐向导航为何会削弱空间记忆进行了多方面的深入探讨, 但大多数讨论仍然停留在理论层面, 未来应该对其进行实证研究, 提供数据支持。

### 3 逐向导航的改进思路

内置在汽车中的 GPS 导航系统, 以及预装在大多数智能手机上的应用程序(如谷歌地图)是目前常见的导航辅助设备(Huston & Hamburger, 2023)。研究表明逐向导航会损害个体的空间记忆(Hejtmánek et al., 2018; Lanini-Maggi et al., 2023; Qiu et al., 2023; Xu et al., 2022; Yount et al., 2022), 随着 GPS 导航使用的增加, 个体的空间认知能力可能会减弱, 进而可能影响其独立性、自主性和生活质量(Gramann et al., 2017)。因此, 许多研究者开始提出新的导航系统, 旨在通过非逐向导航的方式促进空间知识的获取。

#### 3.1 对指令信息的改进——基于地标的导航

环境易读性(environmental legibility)是指城市景观的明晰程度(Kumar et al., 2023), 包括地标(landmark)、路径(paths)、节点(nodes)、边界(edges)和区域(districts)五个组成部分(Lynch, 1964)。研究表明地标能增加环境的易读性, 有助于个体对建筑环境的再认, 相比于没有内部或外部地标的路径, 有内部或外部地标的路径更容易被记住; 此外, 个体对有地标的节点的记忆比对无地标的节点更准确(Ahmadpoor et al., 2021)。一个易读的城市具有清晰的空间结构和物理形态, 使个体能够较为容易地定位和导航, 从而形成清晰的认知地图(Taylor, 2009)。地标是认知地图中最主要的城市表象(urban image)(Erçevik Sönmez & Erinsel Önder, 2019), 设置显著的地标能使环境结构更明晰, 个体更易获取空间知识。地标应当具有 3 个特点: 视觉独特性(visual distinctiveness), 指与周围环境的物理属性有所区别的客观特质; 推断独特性(inferred distinctiveness), 与其结构或形式有关, 使其从一般事物中脱颖而出; 功能独特性(functional distinctiveness), 指与个体的目标或子目标相关的显著性(May & Ross, 2006)。地标导航(landmark-based navigation)的特点在于其指令含有显著的地标信息。相比于简单的逐向导航指令(如“100 米后右转”), 含有地标信息的指令(如“请在音乐厅右转, 在这里你

可以听音乐会”)能够有效改善个体所获得的空间知识(Gramann et al., 2017; Wunderlich et al., 2023)。

研究者对地标在导航中的作用展开了一系列研究。有研究使用自发眨眼作为连续记录的脑电图(EEG)数据中的事件标记, 评估移动地图导航任务中的认知负荷, 发现有中等数量地标(即 5 个地标)的移动地图可能是支持空间学习的最佳选择, 且不会过度消耗注意资源(Cheng et al., 2023)。在十字路口显示真实的 3D 地标符号可能比抽象的 3D 地标符号更能帮助个体记住城市环境中的路线(Kapaj et al., 2022)。与没有地标的十字路口相比, 有地标的十字路口更有可能被个体准确地表征出来(Ahmadpoor & Smith, 2020)。在室内环境使用全息影像来显示虚拟语义地标有助于获取地标知识(Liu et al., 2021)。在导航环境中提供虚拟全局地标能够促进个体心理地图的形成(Liu et al., 2022)。好的地标可以显著提高个体转弯前的信心, 使用距离信息定位转弯位置则会导致更多的人看显示屏(May & Ross, 2006)。来自脑电的证据显示, 在导航指令中突出地标信息能促使个体获得显著的长期空间学习效果(Wunderlich & Gramann, 2018)。因此, 环境中地标的存在能够帮助个体获得更准确的空间知识。

在 Lakehal 等人(2023)的研究中, 基于地标的导航是指利用 GPS 跟踪个体当前的位置, 当个体接近决策点时, 会显示包含地标信息的导航指令。例如: “当你看到公交站点的时候请右转; 20 米”。被试使用智能手机或 AR 眼镜在居民区完成步行导航任务, 结果发现 AR 眼镜可以更好地记忆地标和路线。需要注意的是, 该实验研究了不同交互设备(智能手机和 AR 眼镜)用于基于地标的行人导航时如何影响空间知识的获取, 并没有与逐向导航进行比较。有研究者将逐向导航指令与地标导航指令进行了比较(Wunderlich & Gramann, 2021b), 实验要求个体按照听觉导航指令沿预定路线导航。逐向导航指令如: “下一个路口右转”; 短的地标指令只是简单地命名地标, 如: “在书店右转”; 长的地标指令提供了关于地标的额外语义信息, 如: “在书店右转, 那里每周都会举行公开读书会”。两周后, 完成线索回忆任务(cued-recall task), 即个体对地标进行再认的同时根据该地标位置判断路线方向。结果表明, 与逐向导航指令相比, 无论是短的地标指令还是长的地标指令, 所获得的地标知识和路径知识都更好。与此类似, 有研究将参照(或地标)导航(Reference-Based navigation)、方向导航

(Orientation-Based navigation)和基于 2D 地图、AR 地图的逐向导航进行了比较(Kuo et al., 2023)。被试需使用其中一种完成两个导航任务,一是辅助导航任务,导航辅助全程提供,到达目的地后,重置回到起点并完成指向任务(pointing task);二是独立导航任务,被试只有感到困惑时才可以通过虚拟手机询问导航系统,最后在虚拟城市地图上标记目的地。结果显示,与使用两种逐向导航相比,使用地标导航的个体能够高度准确地定位目的地,这表明地标导航有助于获得全局知识。此外,独立导航任务中地标导航的寻路效率与逐向导航相当,也是唯一使得被试在独立导航任务中花费的时间少于辅助导航任务的导航系统,这一结果表明地标导航能使个体能够获得足够的空间知识,增强其独立导航能力。Schwering 等(2017)提出的定向寻路(oriented path following)与地标导航本质上相似,其方向指令(如,“向市中心方向走”;“在超市左转,绕市中心一圈”)突出了地标信息,研究结果表明人们可以通过适当的定向寻路导航获取全局知识。

综上所述,地标导航在导航效率方面或许能与逐向导航匹敌,但这仍需要更多的研究支持。在空间知识的获取上地标导航可能优于逐向导航。有研究采用移动脑电图记录被试的脑电数据,在城市环境导航过程中,被试接受语音逐向导航或语音地标导航,结果显示,与接受逐向导航指令的被试相比,接受地标导航指令的被试在眨眼后 300 毫秒的时间窗口中,额-中央导联的脑电振幅显示出更高的值,后续空间任务也得到了改善,这表明按照地标指令寻路涉及更高的认知过程,且对已有信息的加工更深(Wunderlich & Gramann, 2021a)。未来应继续深入对比地标导航与逐向导航,思考如何改善地标导航的寻路效率并将其应用在移动设备上。

### 3.2 在其他方面的改进

#### 3.2.1 增强除视觉外的其他感知觉

除地标导航外,研究者们还设计了其他类型的导航以期改进或替代逐向导航。部分研究希望通过增强除视觉之外的其他感知觉来调整个体接收信息的方式,以促进空间记忆的形成。例如,Clemenson 等人(2021)提出了基于感官增强的 GPS 导航系统利用类似听觉指南针的 3D 空间音频系统(3D spatial audio system),使个体无需明确的指令即可到达目的地,这种方法鼓励个体积极参与空间导航。研究结果显示,与逐向导航辅助相比,听觉指南针导航能够激发更多的探索行为,形成更准确的认知地图。类似的还有触觉反馈步行导航系统(tactile

feedback for pedestrian navigation systems),通过振动模式提供路线指示,使个体无需借助视觉就能获取指令,从而更多地注意环境(Pielot et al., 2012);以及为盲人和视障人群提供的触觉足反馈导航系统(Velázquez et al., 2018)。

#### 3.2.2 提升导航过程的自主性

通过让导航系统归还个体探索环境和规划路线的自由促进空间知识的获取。有研究设计了一种潜在路线区域导航(Potential Route Area Navigation, PRA),其界面基于动态的潜在路线区域,该区域包含了个体愿意接受的所有可能的路线,个体可以自由选择、改变路线。结果表明,与以谷歌地图为代表的传统逐向导航辅助相比,使用 PRA 导航时,空间知识的获取和用户体验都得到了明显改善(Huang et al., 2022)。与之相似的有 Mazurkiewicz 等(2023)设计的自由选择导航(Free Choice Navigation),其核心思想是给予个体更多的自由,而非提供预先定义的路线,个体必须在路口做出决策,从而更多地投入到环境中,不过研究结果显示自由选择导航和逐向导航在空间知识获取上差别不大。

#### 3.2.3 应用增强现实技术

利用增强现实技术改进逐向导航。四轴飞行器投影导航(Quadcopter-Projected In-Situ Navigation)通过使用投影仪四轴飞行器的增强现实技术,直接在环境中呈现导航指令,进而提高个体观察现实世界兴趣点的能力(Knierim et al., 2018)。综上所述,除了改进指令信息外,还可以通过借助除视觉外的其他感官通道、增加个体对环境的探索行为或其他方式来改进逐向导航,不过新导航系统的导航效率可能不如逐向导航(Knierim et al., 2018),未来研究应关注如何在促进空间知识获取的同时提高寻路效率。

## 4 小结与展望

关于逐向导航辅助对空间记忆的影响及原因,由于不同研究选择的实验环境(城市居住区、大学校园或虚拟环境)、测量空间知识的方法和被试人群(大学生、驾驶员或其他人群)不尽相同,各研究结果间往往存在差异。然而可以确定的是,逐向导航的使用会削弱空间知识的某一方面(地标知识、路径知识或全局知识)。本文还讨论了对逐向导航系统的改进,包括地标导航和潜在路线区域导航等新导航系统。这些新导航系统相较于逐向导航能有效促进空间知识的获取,但在寻路效率

方面可能有所欠缺, 因此有望进一步提高其导航效率, 成为除逐向导航外的另一选择。

#### 4.1 逐向导航辅助对空间记忆的影响模型

结合目前研究结果(Ahmadpoor et al., 2021; Dong et al., 2021; He & Hegarty, 2020; Ishikawa et al., 2008; Leshed et al., 2008; Parush et al., 2007; Schwering et al., 2017), 本文提出了逐向导航辅助对空间记忆的影响模型, 重点解释了逐向导航辅助对空间记忆的影响, 并探讨了其他导航辅助, 如纸质地图和地标导航的影响(图 2)。

##### 4.1.1 个体差异在 GPS 逐向导航辅助中的作用

个体差异可以分为三类因素。稳定的、不可变的因素, 如性别和年龄等个体自身固有的特征。相对稳定、可变的因素, 它们具有一定可塑性, 可以通过后天训练获得改善, 如方向感、空间视角采择能力、心理旋转能力和空间焦虑等因素。与个体经验有关的因素, 这与个体的生活经历和习惯有关, 如电子游戏经验、GPS 导航依赖和 GPS 使用等。

随着年龄增长, 使用 GPS 导航的可能性降低。研究调查了 456 名 25 岁至 84 岁的健康成人, 发现年龄增长负向预测 GPS 导航使用, 而视空间工作记忆则正向预测 GPS 导航使用(Muffato et al., 2022)。这可能是因为研究采用的被试年龄跨度较大, 因此具有更好的视空间工作记忆的个体更可

能积极地使用技术辅助工具。在性别差异方面, 总体而言, 男性在空间导航能力方面表现出显著优势(Nazareth et al., 2019; 张凤翔 等, 2023)。男性的方向感、心理旋转能力和空间视角采择能力优于女性, 而且空间焦虑水平更低(He & Hegarty, 2020; Ishikawa, 2019; Ruginski et al., 2019)。Miola 等人(2023)发现, 在男性中, 空间自我效能感(寻路自我效能感和方向感)在成长心态和定向行为之间起着中介作用。相信自己的寻路能力可以提高个体的自我效能感, 从而使其更多地探索环境、更少地使用 GPS。而在女性中, 虽然这种间接效应仍然显著, 但与男性不同的是, 成长心态与 GPS 使用和探索倾向之间的直接关系不再显著。这表明女性对 GPS 的使用和环境探索倾向更多地受到空间自我效能感的影响, 而不是直接受到成长心态的影响。

方向感(sense of direction)是指对当前方向的感知和确定(许琴 等, 2010), 研究中通常使用圣巴巴拉方向感量表(Santa Barbara Sense of Direction Scale)测量个体的方向感(Hegarty & Richardson, 2002)。方向感好的个体更可能将地标知识和路径知识整合成全局知识(Wen et al., 2011), 绘制草图的准确性更高(Dong et al., 2021)。研究发现, 在独立导航任务中, 方向感越好的被试任务完成时间

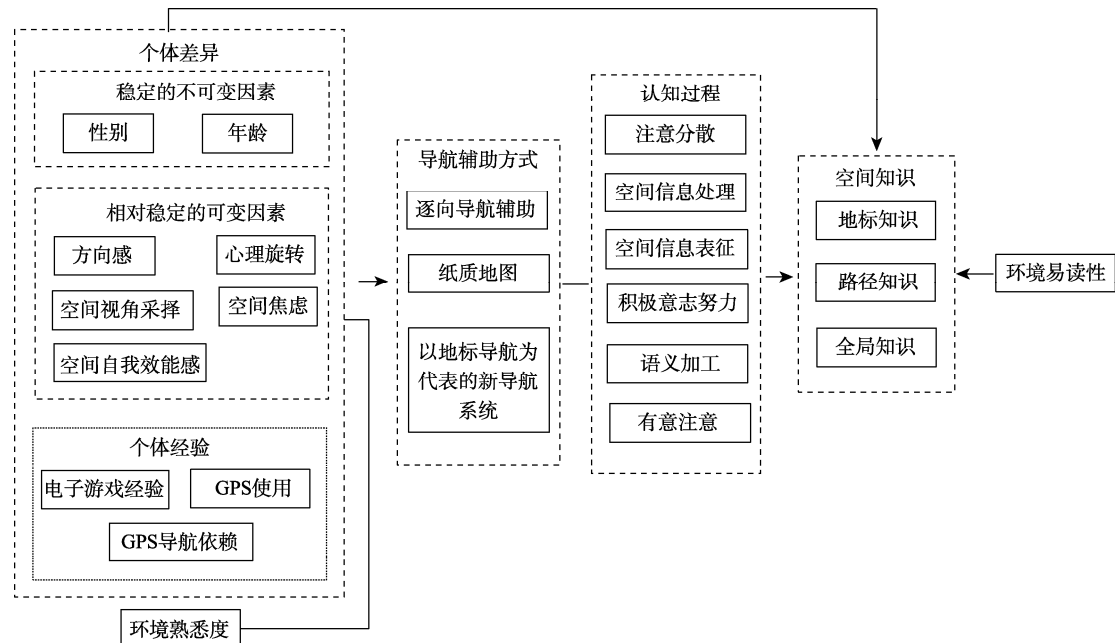


图2 逐向导航辅助对空间记忆的影响模型



较短。然而,当被试在辅助导航任务中使用地标导航而非逐向导航时,即使方向感较差,其任务完成时间也能与方向感较好的被试相似(Kuo et al., 2023)。这表明地标导航在一定程度上能够帮助方向感较弱的人提高寻路效率,而逐向导航则无法提供这种帮助。

He 和 Hegarty (2020)还研究了空间焦虑的作用。模型拟合结果显示,空间焦虑较高的个体不太可能主动探索环境,对 GPS 导航的依赖也更强,从而导致导航能力(方向感)较差。相反,对于方向感较佳的个体,其空间焦虑水平较低,对 GPS 的依赖程度较低,并且更倾向于探索环境。Ruginski 等人(2019)探讨了心理旋转和视角采择的影响。研究在控制了导航能力(方向感)后发现,心理旋转和视角采择能力共同中介了 GPS 使用对被试环境学习(虚拟 SILCton 任务)的影响。这表明,长期使用 GPS 会通过降低心理旋转和视角采择能力,间接且负面地影响个体的环境学习能力。然而,当心理旋转和视角采择共同预测 GPS 使用,再进一步预测环境学习能力时,模型拟合结果与前者一致。因此, GPS 使用和个体导航能力之间的因果关系似乎难以确定。一种可能是,导航是一种“用进废退”的技能(McKinlay, 2016),放弃自主导航转而寻求 GPS 导航的帮助可能会导致导航能力的退化。Ishikawa (2019)的模型显示,尽管心理旋转能力正向预测寻路效率,方向感负向预测指向错误,但长期使用车载导航系统会在更大程度上影响个体的空间记忆,其负面影响可能超过更好的方向感和更高的心理旋转能力所带来的益处。一项纵向研究显示(Dahmani & Bohbot, 2020),低方向感与 GPS 使用时间增加之间的相关性并不显著,这表明经常使用 GPS 的个体可能并不是因为方向感较差而使用;习惯于使用 GPS 导航的个体在完成独立导航任务时,会表现出较差的空间记忆。这可以作为进一步支持 GPS 使用与空间记忆较差之间因果关系的证据。然而,由于样本量仅为 13,这一结论需谨慎看待。尽管相比使用其他导航辅助,使用 GPS 导航可能导致更差的空间记忆,使个体在真实场景下完成独立导航任务中的导航表现更差(Sugimoto et al., 2022),但大部分研究为横向研究,难以反映 GPS 长期使用对个体导航能力带来的影响。

过度依赖导航系统可能会导致个体对环境“漠

不关心”,无法发展寻路和定位技能,也无法在导航系统失效时获得可能需要的空间知识(Parush et al., 2007)。而游戏经验可能有助于缓解 GPS 导航依赖带来的负面影响。研究表明, GPS 依赖性得分较高的被试在完成目标寻找任务(target finding task)时,需要花费更多的时间和精力来观察和记忆目标及其周围环境。然而,游戏时间对这一影响具有调节作用,高频游戏个体相比非高频游戏个体受到的负面影响更小(Yan et al., 2022)。Yavuz 等人(2024)使用多元线性回归模型分析了性别、GPS 导航依赖和每周视频游戏时间对被试完成海上英雄探险任务(sea hero quest task)的寻路距离的影响。结果显示, GPS 依赖与寻路距离无显著相关,这表明 GPS 依赖并不会导致更差的寻路表现。每周视频游戏时间越长,寻路距离越短,而性别效应不显著。然而,当不考虑游戏时间时,性别效应显著,即男性的导航表现更好。这表明视频游戏体验对导航表现的促进作用可能强于性别效应。这也表明 GPS 导航依赖并不总是与空间导航能力负相关。可能的原因是目标寻找任务反映了个体的心理旋转能力,而海上英雄探险任务则更侧重于评估个体的空间导航技能。然而,值得注意的是,尽管 Yavuz 等人(2024)使用的任务更能有效反映个体的空间导航能力,但其本质为电子游戏形式,与真实的导航环境差异较大,且会受到个体游戏经验的影响。因此,未来研究应使用环境更为真实的任务对 GPS 导航依赖的影响进行研究。

此外,对环境的熟悉程度可能在方向感和 GPS 逐向导航使用之间起到调节作用。熟悉环境的人在草图绘制任务中通常能绘制更多的地标(Zhu et al., 2022),对环境结构的表征更加清晰。有研究结果显示,与高方向感的个体相比,低方向感的个体更倾向于使用 GPS 进行逐向导航。然而,随着对环境的熟悉程度增加, GPS 逐向导航的使用也在减少(Topete et al., 2024)。

#### 4.1.2 逐向导航辅助对空间记忆影响的认知机制

由于需要查看指令信息及当前位置,使用逐向导航时个体可能频繁地从关注外界环境转为关注移动设备,这种注意的分散可能导致个体未能充分获取环境信息;逐向导航辅助帮助个体省去了费时费力的自我定位和路线规划过程,这导致个体无需付诸意志努力,缺乏对周围环境信息的处理;逐向导航移动设备的交互界面所呈现的导



航视角通常与个体当前的方位保持一致,且分段逐次下达的指令可能导致个体获取的环境信息不连续,这使得个体更可能形成自我中心式的空间记忆,不利于环境结构学习。以上四方面都使得逐向导航辅助不利于获取空间知识,长远来看,这可能会阻碍空间导航能力的发展。相比逐向导航辅助,纸质地图直接呈现了环境的整体结构,个体需要主动付出认知努力从周围环境获取方位信息,对周围环境信息进行加工处理,进而规划路线,这使个体更有可能获取有关环境结构的知识。地标导航将有意义的地标信息提供给个体,促进深层次的语义加工,同时,其指示语使得个体对环境中地标的有意注意增多,将环境刺激信息输入工作记忆进行加工处理,从而形成稳固的空间记忆。除此之外,环境易读性也会影响空间记忆,清晰的环境结构能促进认知地图的形成。

#### 4.2 改进逐向导航的建议

天有不测风云,人有旦夕祸福。空间知识可以用于重新定位、判断距离和回忆地点,当移动导航设备意外丢失或毁坏时,如何依靠从环境获得的空间知识脱离困境至关重要(Aslan et al., 2006)。因此,如何改进逐向导航以促进空间知识的获取可以关注以下几点建议。

对逐向导航指令的内容进行改进,加入有意义的信息。例如,可以加入显著的地标信息。环境的独特特征(即地标,如餐馆,教堂等)对认知地图的形成非常重要(Burnett & Lee, 2005)。当人们在一个新的环境中学习路线时,会求助那些突出的地标(Miller & Carlson, 2011),研究表明地标可以有效地用于行人导航辅助设备(Goodman et al., 2005)。Lanini-Maggi 等人(2023)要求被试使用叙事指令和标准指令完成虚拟空间导航任务,叙事指令如:“当你到达这家餐馆时,迎面扑来了美食的香气,让你心情愉悦。突然间,你发现朋友们已经在那里等候,准备和你一起庆祝生日!用餐结束后,其中一位朋友准备回家,你决定一起。从餐馆出发,左转直行,一直走到朋友家为止!”标准指令如:“请到你面前的照相馆拍照,左转去银行。”结果表明基于叙事的导航指令能够提高个体对地标顺序的记忆。

根据测试效应和前向测试效应,在导航过程中可以多次施加空间知识测试以巩固个体的空间记忆。测试效应(testing effect)指学习某一内容时,进行测试比额外学习能更好地提高后来对它的记忆保持

水平,即便在测试无反馈时也是如此(张锦坤 等, 2008)。在前向测试效应中,参加测试可以增强对后续学习材料的记忆(Cho et al., 2017)。研究表明大尺度环境中也同样存在测试效应(Kelly et al., 2015)和前向测试效应(马小凤 等, 2022),因此,可以通过多次测试个体所获得的空间知识促进路线学习。

设计旨在锻炼空间导航能力的游戏模式。研究表明,经验丰富的视频游戏玩家在虚拟导航任务中表现更佳,特别是那些玩包含导航元素游戏的玩家(Murias et al., 2016)。视频游戏作为一种基于视听设备的游戏形式,它对感知、注意和记忆等认知加工过程的关键阶段具有积极影响(石祝,尚俊杰, 2024)。例如,游戏俄罗斯方块能够提高个体的心理旋转能力(Martin-Gutierrez et al., 2009)。Lin 等人(2014)开发了一款空间寻宝游戏,发现该游戏能够在短时间内有效增强个体的空间定向能力和空间记忆,同时也有助于缩小女性与男性在空间定向能力方面的差距。有研究者设计了一个具有游戏化元素(如任务、统计数据和社交竞争)的移动应用程序,个体需要主动对环境采取探索行为来发现地图,感受游戏带来的快感,进而强化其空间知识(Schade et al., 2023)。鉴于此,未来可以在导航软件中加入促进空间导航能力的游戏模块,以减轻过度依赖GPS导航可能带来的不利影响。

提供适应性服务,以满足个体的多样化需求。适应性服务(Adaptable services)允许用户更改服务的功能,从而让用户保持控制权(Richter et al., 2010)。导航系统应考虑个体的旅行目的——是优先导航效率还是优先探索环境(Kuo et al., 2023)。高自动化水平的导航系统行为指系统自动执行认知过程,而低自动化水平的导航系统行为则指系统将决策过程交给个体(Brügger et al., 2019)。对于需要高导航效率的个体,应提供高自动化导航系统,例如提供逐向指令、短路线和跟踪地图模式(track-up map)。对于倾向探索环境的个体,应提供低自动化导航系统,例如提供突出地标信息的指令、多种路线和北上地图模式(north-up map),从而促使个体与环境有更多交流,获取空间知识。此外,不熟悉环境的个体偏好图像地标符号,而熟悉环境的个体偏好文本地标符号。研究者据此设计了顾及不同用户熟悉度的行人导航地图,使用该地图时,地图缩放次数显著少于使用2D移动地图(Zhu et al., 2022)。因此,对于初次或不熟悉环境的个体,导航软件可以提供具有

显著视觉特征的地标地图,从而降低环境适应的难度。同时,为了满足老年用户的需求,导航界面的设计除了应简洁、大方外,还应注重色彩的影响。研究指出,与冷色调或暖色调的虚拟环境相比,他们在中性色调的虚拟环境中的寻路时间更长,转弯错误更多,路径记忆也更差(Süzer & Olguntürk, 2018)。因此,在设计适用于老年群体的导航模式时,应优先考虑采用冷色调或暖色调的配色方案。

个体应当有培养自身独立导航的意识,避免过度依赖移动辅助设备。GPS系统虽然能让我们的生活变得更轻松,但它往往被用来自动执行原本完全由我们的大脑执行的功能(Clemenson et al., 2021)。一个存在争议但已被广泛接受的共识是,导航辅助设备使用的增加与导航技能(即认知技能)和社会互动的下降有关(Huston & Hamburger, 2023),长远来看,习惯于被动遵循导航会改变个体的空间意识,使情况变得更糟(Ishikawa, 2021)。不过个体不需要避免使用逐向导航辅助设备,而是应该谨慎行事,避免盲目听从指令(Kuo et al., 2023)。

#### 4.3 未来研究方向

目前研究仍然存在不足,未来可以关注以下几个方面。

改进大尺度环境下空间知识的测量方法。部分研究者仅探讨了空间记忆的某一方面(Kelly et al., 2022),然而,大尺度环境下个体的空间记忆包含多个层次(地标知识,路径知识,全局知识)。即便大部分研究者对这3种空间知识都进行了测量,但测量方法往往不尽相同,存在很大的差异。例如,对于路径知识的测量,采用地标排序任务(Lanini-Maggi et al., 2023)、路线回溯任务(Sugimoto et al., 2022)或场景再认与方向判断任务(Qiu et al., 2023)等;对于全局知识的测量,使用指向任务(Ben-Elia, 2021)、距离估计任务(Ruginski et al., 2019)、空白地图任务(Hejtmánek et al., 2018)或地图绘制任务(Ahmadpoor & Smith, 2020; Dong et al., 2021)等。这些方法虽然都能测量路径记忆或全局知识,但无疑难以反映其全貌,不同的测量方法产生的测量误差也不同。因此,如何建立一个有效且能全面测量个体空间知识的范式至关重要。未来研究应当尽量使用统一的测量方法,或者采用多种不同的方法对同一种空间知识进行测量。

探究逐向导航辅助削弱空间记忆的神经机制。尽管大多行为实验表明逐向导航不利于空间知识的

获取,但其神经生理学证据仍然有限。海马体后部可能与个体对环境的空间表征有关(Maguire et al., 2000)。研究发现,随着出租车司机导航经验的增加,海马右侧后部灰质体积增加,而前部灰质体积减少(Maguire et al., 2006)。一项由Woollett和Maguire(2011)进行的纵向研究表明,在成功获得出租车驾驶资格证的被试中,其后部海马区的灰质体积在4年内显著增加,而对照组未出现类似的大脑结构变化。这表明日常导航经验会导致大脑结构发生变化,但关于日常逐向导航经验是否同样会导致海马体体积变化的问题,目前仍有待探究。Fajnerová等人(2018)要求实验组被试连续3个月佩戴装有OsmAnd应用程序(具有GPS逐向导航功能)的AR眼镜进行日常导航,而对照组在导航过程中则不使用任何GPS设备。尽管两组在虚拟导航任务上的表现相似,但实验组在右侧海马区的功能连接出现了显著减少,而对照组的右侧海马功能连接则有所增强。综上所述,未来研究应进一步探讨日常GPS逐向导航使用对海马的影响,以更全面地了解逐向导航对大脑功能和行为的潜在影响。

关注个体因素的影响以建立一个更全面的解释机制,如性别、方向感、空间焦虑水平和视角采择能力等。研究表明,空间记忆存在性别差异(Chen et al., 2020),方向感好的个体更可能将地标知识和路径知识整合形成全局知识(Wen et al., 2011)。目前许多研究并未测量个体的方向感(Ben-Elia, 2021; Cheng et al., 2023; Hejtmánek et al., 2018; Lanini-Maggi et al., 2023; Yount et al., 2022),部分研究将个体的方向感作为额外变量进行控制(Lakehal et al., 2023; Qiu et al., 2023),也有研究将方向感或空间焦虑与导航辅助一同视作实验因子(Dong et al., 2021; He & Hegarty, 2020; Ishikawa, 2019; Kuo et al., 2023),但仅有少数研究同时考虑了多种个体因素。例如,研究发现在控制个体现有的导航能力(即方向感)后,逐向导航的使用对心理旋转和视角采择能力仍然存在消极影响(Ruginski et al., 2019)。因此,未来研究应将个体因素考虑在内,以扩大研究结果的适用范围。

新的导航系统应尽可能在寻路效率和空间知识获取方面都达到较高水平。在导航效率与环境结构的学习之间似乎存在某种程度的折衷:纸质地图以鸟瞰图显示寻路信息,与稳定的外部参考框架相关,有利于结构学习,但这种优势以牺牲准确的寻路为

代价来促进全局知识的获取(Münzer et al., 2012), 其寻路效率通常不如移动地图(Hergan & Umek, 2017)。使用逐向导航使个体可以通过最佳(例如, 最快、最简单、最容易、最安全)的方式到达目的地(Schwering et al., 2017), 寻路效率较高, 但不利于获取空间知识。地标导航也是如此, 其寻路效率通常略逊色于逐向导航, 但有助于个体获取空间知识。因此, 如何设计一个导航效率高, 又能促进空间记忆形成的导航系统是目前有待解决的难题。

## 参考文献

- 丁旭华. (2015). 浅析传统纸质地图的转型. *测绘通报*, (12), 105-107.
- 马小凤, 李甜甜, 贾瑞红, 魏婕. (2022). 空间路线学习中的前向测试效应. *心理学报*, 54(12), 1433-1442.
- 石祝, 尚俊杰. (2024). 视频游戏对空间能力的影响与作用机制. *中国电化教育*, 5, 32-44.
- 许琴, 罗宇, 刘嘉. (2010). 方向感的加工机制及影响因素. *心理科学进展*, 18(8), 1208-1221.
- 张凤翔, 陈美璇, 蒲艺, 孔祥祯. (2023). 空间导航能力个体差异的多层次形成机制. *心理科学进展*, 31(9), 1642-1664.
- 张锦坤, 白学军, 杨丽娟. (2008). 国外关于测试效应的研究概述. *心理科学进展*, 16(4), 661-670.
- Afroz, A., White, D., & Parolin, B. (2018). Effects of active and passive exploration of the built environment on memory during wayfinding. *Applied Geography*, 101, 68-74. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2018.10.009>
- Aginsky, V., Harris, C., Rensink, R., & Beusmans, J. (1997). Two strategies for learning a route in a driving simulator. *Journal of Environmental Psychology*, 17(4), 317-331. <https://doi.org/10.1006/jev.1997.0070>
- Ahmadpoor, N., & Smith, A. D. (2020). Spatial knowledge acquisition and mobile maps: The role of environmental legibility. *Cities*, 101, 102700. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2020.102700>
- Ahmadpoor, N., Smith, A. D., & Heath, T. (2021). Rethinking legibility in the era of digital mobile maps: An empirical study. *Journal of Urban Design*, 26(3), 296-318. <https://doi.org/10.1080/13574809.2020.1777847>
- Aslan, I., Schwalm, M., Baus, J., Krüger, A., & Schwartz, T. (2006). Acquisition of spatial knowledge in location aware mobile pedestrian navigation systems. *Proceedings of the 8th Conference on Human-Computer Interaction with Mobile Devices and Services* (pp. 105-108). Association for Computing Machinery, New York. <https://doi.org/10.1145/1152215.1152237>
- Bakdash, J. Z., Linkenauger, S. A., & Proffitt, D. (2008). Comparing decision-making and control for learning a virtual environment: Backseat drivers learn where they are going. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting* (Vol. 52, No. 27, pp. 2117-2121). Association for Computing Machinery, New York. <https://doi.org/10.1177/154193120805202707>
- Ben-Elia, E. (2021). An exploratory real-world wayfinding experiment: A comparison of drivers' spatial learning with a paper map vs. turn-by-turn audiovisual route guidance. *Transportation Research Interdisciplinary Perspectives*, 9, 100280. <https://doi.org/10.1016/j.trip.2020.100280>
- Brügger, A., Richter, K. -F., & Fabrikant, S. I. (2018). Distributing attention between environment and navigation system to increase spatial knowledge acquisition during assisted wayfinding. In P. Fogliaroni, A. Ballatore, E. Clementini (Eds.), *Lecture Notes in Geoinformation and Cartography: Proceedings of Workshops and Posters at the 13th International Conference on Spatial Information Theory* (pp.19-22). Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-63946-8\\_5](https://doi.org/10.1007/978-3-319-63946-8_5)
- Brügger, A., Richter, K. -F., & Fabrikant, S. I. (2019). How does navigation system behavior influence human behavior? *Cognitive Research: Principles and Implications*, 4, 5. <https://doi.org/10.1186/s41235-019-0156-5>
- Burnett, G. E., & Lee, K. (2005). The effect of vehicle navigation systems on the formation of cognitive maps. *International Conference of Traffic and Transport Psychology* (pp. 407-418). Elsevier, Oxford. <https://doi.org/10.1016/B978-008044379-9/50188-6>
- Chen, W., Liu, B., Li, X., Wang, P., & Wang, B. (2020). Sex differences in spatial memory. *Neuroscience*, 443, 140-147. <https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2020.06.016>
- Cheng, B., Lin, E., Wunderlich, A., Gramann, K., & Fabrikant, S. I. (2023). Using spontaneous eye blink-related brain activity to investigate cognitive load during mobile map-assisted navigation. *Frontiers in Neuroscience*, 17, 1024583. <https://doi.org/10.3389/fnins.2023.1024583>
- Cho, K. W., Neely, J. H., Crocco, S., & Vitrano, D. (2017). Testing enhances both encoding and retrieval for both tested and untested items. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(7), 1211-1235. <https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1175485>
- Chrastil, E. R., & Warren, W. H. (2012). Active and passive contributions to spatial learning. *Psychonomic Bulletin & Review*, 19(1), 1-23. <https://doi.org/10.3758/s13423-011-0182-x>
- Clemenson, G. D., Maselli, A., Fiannaca, A. J., Miller, A., & Gonzalez-Franco, M. (2021). Rethinking GPS navigation: Creating cognitive maps through auditory clues. *Scientific Reports*, 11, 7764. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-87148-4>
- Dahmani, L., & Bohbot, V. D. (2020). Habitual use of GPS negatively impacts spatial memory during self-guided navigation. *Scientific Reports*, 10, 6310. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62877-0>
- Dong, W., Wu, Y., Qin, T., Bian, X., Zhao, Y., He, Y., Xu, Y., & Yu, C. (2021). What is the difference between

- augmented reality and 2D navigation electronic maps in pedestrian wayfinding? *Cartography and Geographic Information Science*, 48(3), 225–240. <https://doi.org/10.1080/15230406.2021.1871646>
- Erçevik Sönmez, B., & Erinsel Önder, D. (2019). The influence of GPS-based navigation systems on perception and image formation: A case study in urban environments. *Cities*, 86, 102–112. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2018.12.018>
- Fajnerová, I., Greguš, D., Hlinka, J., Nekovářová, T., Škoch, A., Zítka, T., ... Horáček, J. (2018). Could prolonged usage of GPS navigation implemented in augmented reality smart glasses affect hippocampal functional connectivity? *BioMed Research International*, 2716134. <https://doi.org/10.1155/2018/2716134>
- Fenech, E. P., Drews, F. A., & Bakdash, J. Z. (2010). The effects of acoustic turn-by-turn navigation on wayfinding. *Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting*, 54(23), 1926–1930. <https://doi.org/10.1177/154193121005402305>
- Gardony, A. L., Brunyé, T. T., Mahoney, C. R., & Taylor, H. A. (2013). How navigational aids impair spatial memory: Evidence for divided attention. *Spatial Cognition & Computation*, 13(4), 319–350. <https://doi.org/10.1080/13875868.2013.792821>
- Gardony, A. L., Brunyé, T. T., & Taylor, H. A. (2015). Navigational Aids and spatial memory impairment: The role of divided attention. *Spatial Cognition & Computation*, 15(4), 246–284. <https://doi.org/10.1080/13875868.2015.1059432>
- Goodman, J., Brewster, S., & Gray, P. (2005). How can we best use landmarks to support older people in navigation? *Behaviour & Information Technology*, 24(1), 3–20. <https://doi.org/10.1080/01449290512331319021>
- Gramann, K., Hoepner, P., & Karrer-Gauss, K. (2017). Modified navigation instructions for spatial navigation assistance systems lead to incidental spatial learning. *Frontiers in Psychology*, 8, 193. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00193>
- He, C., & Hegarty, M. (2020). How anxiety and growth mindset are linked to navigation ability: Impacts of exploration and GPS use. *Journal of Environmental Psychology*, 71, 101475. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2020.101475>
- Hegarty, M., Montello, D. R., Richardson, A. E., Ishikawa, T., & Lovelace, K. (2006). Spatial abilities at different scales: Individual differences in aptitude-test performance and spatial-layout learning. *Intelligence*, 34(2), 151–176. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2005.09.005>
- Hegarty, M., Richardson, A. E., Montello, D. R., Lovelace, K., & Subbiah, I. (2002). Development of a self-report measure of environmental spatial ability. *Intelligence*, 30(5), 425–447. [https://doi.org/10.1016/S0160-2896\(02\)00116-2](https://doi.org/10.1016/S0160-2896(02)00116-2)
- Hejtmánek, L., Oravcová, I., Motýl, J., Horáček, J., & Fajnerová, I. (2018). Spatial knowledge impairment after GPS guided navigation: Eye-tracking study in a virtual town. *International Journal of Human-Computer Studies*, 116, 15–24. <https://doi.org/10.1016/j.ijhcs.2018.04.006>
- Hergan, I., & Umek, M. (2017). Comparison of children's wayfinding, using paper map and mobile navigation. *International Research in Geographical and Environmental Education*, 26(2), 91–106. <https://doi.org/10.1080/10382046.2016.1183935>
- Huang, H., Mathis, T., & Weibel, R. (2022). Choose your own route – supporting pedestrian navigation without restricting the user to a predefined route. *Cartography and Geographic Information Science*, 49(2), 95–114. <https://doi.org/10.1080/15230406.2021.1983731>
- Huang, H., Schmidt, M., & Gartner, G. (2012). Spatial knowledge acquisition with mobile maps, augmented reality and voice in the context of GPS-based pedestrian navigation: Results from a field test. *Cartography and Geographic Information Science*, 39(2), 107–116. <https://doi.org/10.1559/15230406392107>
- Huston, V., & Hamburger, K. (2023). Navigation aid use and human wayfinding: How to engage people in active spatial learning. *Künstliche Intelligenz*. <https://doi.org/10.1007/s13218-023-00799-5>
- Ishikawa, T. (2019). Satellite navigation and geospatial awareness: Long-term effects of using navigation tools on wayfinding and spatial orientation. *The Professional Geographer*, 71(2), 197–209. <https://doi.org/10.1080/00330124.2018.1479970>
- Ishikawa, T. (2021). Spatial thinking, cognitive mapping, and spatial awareness. *Cognitive Processing*, 22(1), 89–96. <https://doi.org/10.1007/s10339-021-01046-1>
- Ishikawa, T., Fujiwara, H., Imai, O., & Okabe, A. (2008). Wayfinding with a GPS-based mobile navigation system: A comparison with maps and direct experience. *Journal of Environmental Psychology*, 28(1), 74–82. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2007.09.002>
- Kapaj, A., Lin, E., & Lanini-Maggi, S. (2022). The effect of abstract vs. realistic 3d visualization on landmark and route knowledge acquisition. In A. Susanne (Series Ed.) & T. Ishikawa (Vol. Ed). *15th International Conference on Spatial Information Theory* (Vol. 240, pp. 15:1–15:8). Schloss Dagstuhl – Leibniz-Zentrum für Informatik, Wadern. <https://doi.org/10.4230/LIPICS.COSIT.2022.15>
- Kelly, J. W., Carpenter, S. K., & Sjolund, L. A. (2015). Retrieval enhances route knowledge acquisition, but only when movement errors are prevented. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 41(5), 1540–1547. <https://doi.org/10.1037/a0038685>
- Kelly, J. W., Lim, A. F., & Carpenter, S. K. (2022). Turn-by-turn route guidance does not impair route learning. *Journal of Applied Research in Memory and Cognition*, 11(1), 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.jarmac.2021.06.001>
- Knierim, P., Maurer, S., Wolf, K., & Funk, M. (2018, April).

- Quadcopter-projected in-situ navigation cues for improved location awareness. *Proceedings of the 2018 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (No. 433, pp. 1–6). Association for Computing Machinery, New York. <https://doi.org/10.1145/3173574.3174007>
- Krüger, A., Aslan, I., & Zimmer, H. (2004). The effects of mobile pedestrian navigation systems on the concurrent acquisition of route and survey knowledge. In S. Brewster & M. Dunlop (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science: Mobile Human-Computer Interaction—MobileHCI 2004* (Vol. 3160, pp. 446–450). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-28637-0\\_54](https://doi.org/10.1007/978-3-540-28637-0_54)
- Kumar, S., Hajela, A., & Singh, E. (2023). Legibility in a city: An overview of the factors affecting perceptions of way-finding in the built environment. In R. A. Khaddar, S. K. Singh, N. D. Kaushika, R. K. Tomar, S. K. Jain (Eds.), *Lecture notes in civil engineering: Recent developments in energy and environmental engineering* (Vol. 333, pp. 475–482). Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-99-1388-6\\_37](https://doi.org/10.1007/978-981-99-1388-6_37)
- Kuo, T. -Y., Chang, Y. -J., & Chu, H. -K. (2023). Investigating four navigation aids for supporting navigator performance and independence in virtual reality. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 39(12), 2524–2541. <https://doi.org/10.1080/10447318.2022.2078926>
- Lakehal, A., Lepreux, S., Efstratiou, C., Kolski, C., & Nicolaou, P. (2023). Spatial knowledge acquisition for pedestrian navigation: A comparative study between smartphones and AR glasses. *Information*, 14(7), 353. <https://doi.org/10.3390/info14070353>
- Lanini-Maggi, S., Hilton, C., & Fabrikant, S. I. (2023). Limiting the reliance on navigation assistance with navigation instructions containing emotionally salient narratives for confident wayfinding. *Journal of Environmental Psychology*, 91, 102151. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2023.102151>
- Leshed, G., Velden, T., Rieger, O., Kot, B., & Sengers, P. (2008, April). In-car GPS navigation: Engagement with and disengagement from the environment. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 1675–1684). Association for Computing Machinery, New York. <https://doi.org/10.1145/1357054.1357316>
- Lin, C. -H., Chen, C. -M., & Lou, Y. -C. (2014). Developing spatial orientation and spatial memory with a treasure hunting game. *Educational Technology & Society*, 17(3), 79–92.
- Liu, J., Singh, A. K., Wunderlich, A., Gramann, K., & Lin, C. -T. (2022). Redesigning navigational aids using virtual global landmarks to improve spatial knowledge retrieval. *Npj Science of Learning*, 7(1), 17. <https://doi.org/10.1038/s41539-022-00132-z>
- Lu, J., Han, Y., Xin, Y., Yue, K., & Liu, Y. (2021). Possibilities for designing enhancing spatial knowledge acquirements navigator: A User Study on the role of different contributors in impairing human spatial memory during navigation. In Y. Kitamura, A. Quigley, K. Isbister & T. Igarashi. *Extended Abstracts of the 2021 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (No. 295, pp. 1–6). Association for Computing Machinery, New York. <https://doi.org/10.1145/3411763.3451641>
- Lynch, K. (1960). *The image of the city*. Massachusetts: The MIT Press.
- Maguire, E. A., Gadian, D. G., Johnsrude, I. S., Good, C. D., Ashburner, J., Frackowiak, R. S. J., & Frith, C. D. (2000). Navigation-related structural change in the hippocampi of taxi drivers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 97(8), 4398–4403. <https://doi.org/10.1073/pnas.070039597>
- Maguire, E. A., Woollett, K., & Spiers, H. J. (2006). London taxi drivers and bus drivers: A structural MRI and neuropsychological analysis. *Hippocampus*, 16(12), 1091–1101. <https://doi.org/10.1002/hipo.20233>
- Martin-Gutierrez, J., Luis Saorin, J., Martin-Dorta, N., & Contero, M. (2009). Do video games improve spatial abilities of engineering students? *International Journal of Engineering Education*, 25(6), 1194–1204.
- May, A. J., & Ross, T. (2006). Presence and quality of navigational landmarks: Effect on driver performance and implications for design. *Human Factors*, 48(2), 346–361. <https://doi.org/10.1518/001872006777724453>
- Mazurkiewicz, B., Kattenbeck, M., & Giannopoulos, I. (2023). Free choice navigation in the real world: giving back freedom to wayfinders. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 12(2), 27. <https://doi.org/10.3390/ijgi12020027>
- McKinlay, R. (2016). Technology: Use or lose our navigation skills. *Nature*, 531, 573–575. <https://doi.org/10.1038/531573a>
- Miller, J., & Carlson, L. (2011). Selecting landmarks in novel environments. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(1), 184–191. <https://doi.org/10.3758/s13423-010-0038-9>
- Miola, L., Meneghetti, C., Muffato, V., & Pazzaglia, F. (2023). Orientation behavior in men and women: The relationship between gender stereotype, growth mindset, and spatial self-efficacy. *Journal of Environmental Psychology*, 86, 101952. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2022.101952>
- Muffato, V., Borella, E., Pazzaglia, F., & Meneghetti, C. (2022). Orientation experiences and navigation aid use: A self-report lifespan study on the role of age and visuospatial factors. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(3), 1225. <https://doi.org/10.3390/ijerph19031225>
- Murias, K., Kwok, K., Castillejo, A. G., Liu, I., & Iaria, G. (2016). The effects of video game use on performance in a virtual navigation task. *Computers in Human Behavior*, 58, 398–406. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.01.020>
- Münzer, S., Zimmer, H. D., & Baus, J. (2012). Navigation assistance: A trade-off between wayfinding support and

- configural learning support. *Journal of Experimental Psychology: Applied*, 18(1), 18–37. <https://doi.org/10.1037/a0026553>
- Münzer, S., Zimmer, H. D., Schwalm, M., Baus, J., & Aslan, I. (2006). Computer-assisted navigation and the acquisition of route and survey knowledge. *Journal of Environmental Psychology*, 26(4), 300–308. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2006.08.001>
- Nazareth, A., Huang, X., Voyer, D., & Newcombe, N. (2019). A meta-analysis of sex differences in human navigation skills. *Psychonomic Bulletin & Review*, 26(5), 1503–1528. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01633-6>
- Parush, A., Ahuvia, S., & Erev, I. (2007). Degradation in spatial knowledge acquisition when using automatic navigation systems. In S. Winter, M. Duckham, L. Kulik, & B. Kuipers (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science: Spatial information theory* (Vol. 4736, pp. 238–254). Springer, Berlin, Heidelberg. [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74788-8\\_15](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74788-8_15)
- Pielot, M., Poppinga, B., Heuten, W., & Boll, S. (2012). PocketNavigator: Studying tactile navigation systems in-situ. *Proceedings of the SIGCHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (pp. 3130–3140). Association for Computing Machinery, New York. <https://doi.org/10.1145/2207676.2208728>
- Qiu, X., Yang, Z., Yang, J., Wang, Q., & Wang, D. (2023, January). Impact of AR navigation display methods on wayfinding performance and spatial knowledge acquisition. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 40(10), 2676–2696. <https://doi.org/10.1080/10447318.2023.2169524>
- Rauschnabel, P. A., Felix, R., Hinsch, C., Shahab, H., & Alt, F. (2022). What is XR? Towards a framework for augmented and virtual reality. *Computers in Human Behavior*, 133, 107289. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2022.107289>
- Ruginski, I. T., Creem-Regehr, S. H., Stefanucci, J. K., & Cashdan, E. (2019). GPS use negatively affects environmental learning through spatial transformation abilities. *Journal of Environmental Psychology*, 64, 12–20. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2019.05.001>
- Schade, E., Savino, G. -L., Niess, J., & Schöning, J. (2023). MapUncover: Fostering spatial exploration through gamification in mobile map apps. In A. Schmidt, K. Väänänen, T. Goyal, P. O. Kristensson, A. Peters, S. Mueller, J. R. Williamson & M. L. Wilson (Eds), *Proceedings of the 2023 CHI Conference on Human Factors in Computing Systems* (No. 678, pp. 1–13). Association for Computing Machinery, New York. <https://doi.org/10.1145/3544548.3581428>
- Schwering, A., Krukar, J., Li, R., Anacta, V. J., & Fuest, S. (2017). Wayfinding through orientation. *Spatial Cognition & Computation*, 17(4), 273–303. <https://doi.org/10.1080/13875868.2017.1322597>
- Siegel, A. W., & White, S. H. (1975). The Development of spatial representations of large-scale environments. In H. W. Reese (Ed.), *Advances in Child Development and Behavior* (Vol. 10, pp. 9–55). JAI Press. [https://doi.org/10.1016/S0065-2407\(08\)60007-5](https://doi.org/10.1016/S0065-2407(08)60007-5)
- Sugimoto, M., Kusumi, T., Nagata, N., & Ishikawa, T. (2022). Online mobile map effect: How smartphone map use impairs spatial memory. *Spatial Cognition & Computation*, 22(1–2), 161–183. <https://doi.org/10.1080/13875868.2021.1969401>
- Süzer, Ö. K., & Olguntürk, N. (2018). The aid of colour on visuospatial navigation of elderly people in a virtual polyclinic environment. *Color Research & Application*, 43(6), 872–884. <https://doi.org/10.1002/col.22272>
- Taylor, N. (2009). Legibility and Aesthetics in Urban Design. *Journal of Urban Design*, 14(2), 189–202. <https://doi.org/10.1080/13574800802670929>
- Topete, A., He, C., Protzko, J., Schooler, J., & Hegarty, M. (2024). How is GPS used? Understanding navigation system use and its relation to spatial ability. *Cognitive Research: Principles and Implications*, 9, 16. <https://doi.org/10.1186/s41235-024-00545-x>
- van Asselen, M., Fritschy, E., & Postma, A. (2006). The influence of intentional and incidental learning on acquiring spatial knowledge during navigation. *Psychological Research*, 70(2), 151–156. <https://doi.org/10.1007/s00426-004-0199-0>
- Velázquez, R., Pissaloux, E., Rodrigo, P., Carrasco, M., Giannoccaro, N., & Lay-Ekuakille, A. (2018). An outdoor navigation system for blind pedestrians using gps and tactile-foot feedback. *Applied Sciences*, 8(4), 578. <https://doi.org/10.3390/app8040578>
- Wen, W., Ishikawa, T., & Sato, T. (2011). Working memory in spatial knowledge acquisition: Differences in encoding processes and sense of direction. *Applied Cognitive Psychology*, 25(4), 654–662. <https://doi.org/10.1002/acp.1737>
- Willis, K. S., Hölscher, C., Wilbertz, G., & Li, C. (2009). A comparison of spatial knowledge acquisition with maps and mobile maps. *Computers, Environment and Urban Systems*, 33(2), 100–110. <https://doi.org/10.1016/j.compenvurbsys.2009.01.004>
- Woollett, K., & Maguire, E. A. (2011). Acquiring “the knowledge” of London’s layout drives structural brain changes. *Current Biology*, 21(24), 2109–2114. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2011.11.018>
- Woyciechowski, A., & Shliselberg, R. (2005). Wayfinding in public transportation. *Transportation Research Record*, 1903(1), 35–42. <https://doi.org/10.1177/0361198105190300105>
- Wunderlich, A., & Gramann, K. (2018). Electrocortical evidence for long-term incidental spatial learning through modified navigation instructions. In S. Creem-Regehr, J. Schöning, & A. Klippel (Eds.), *Lecture Notes in Computer Science: Spatial Cognition XI* (Vol. 11034, pp. 261–278). Springer,

- Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-96385-3\\_18](https://doi.org/10.1007/978-3-319-96385-3_18)
- Wunderlich, A., & Gramann, K. (2021a). Eye movement - related brain potentials during assisted navigation in real-world environments. *European Journal of Neuroscience*, 54(12), 8336–8354. <https://doi.org/10.1111/ejn.15095>
- Wunderlich, A., & Gramann, K. (2021b). Landmark-based navigation instructions improve incidental spatial knowledge acquisition in real-world environments. *Journal of Environmental Psychology*, 77, 101677. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2021.101677>
- Wunderlich, A., Grieger, S., & Gramann, K. (2023). Landmark information included in turn-by-turn instructions induce incidental acquisition of lasting route knowledge. *Spatial Cognition & Computation*, 23(1), 31–56. <https://doi.org/10.1080/13875868.2021.2022681>
- Xu, Y., Qin, T., Wu, Y., Yu, C., & Dong, W. (2022). How do voice-assisted digital maps influence human wayfinding in pedestrian navigation? *Cartography and Geographic Information Science*, 49(3), 271–287. <https://doi.org/10.1080/15230406.2021.2017798>
- Yan, W., Li, J., Mi, C., Wang, W., Xu, Z., Xiong, W., ... Wang, S. (2022). Does global positioning system-based navigation dependency make your sense of direction poor? A psychological assessment and eye-tracking study. *Frontiers in Psychology*, 13, 983019. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.983019>
- Yavuz, E., He, C., Gahnstrom, C. J., Goodroe, S., Coutrot, A., Hornberger, M., Hegarty, M., & Spiers, H. J. (2024). Video gaming, but not reliance on GPS, is associated with spatial navigation performance. *Journal of Environmental Psychology*, 96, 102296. <https://doi.org/10.1016/j.jenvp.2024.102296>
- Yount, Z. F., Kass, S. J., & Arruda, J. E. (2022). Route learning with augmented reality navigation aids. *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 88, 132–140. <https://doi.org/10.1016/j.trf.2022.05.019>
- Zhu, L., Shen, J., Zhou, J., Stachoň, Z., Hong, S., & Wang, X. (2022). Personalized landmark adaptive visualization method for pedestrian navigation maps: Considering user familiarity. *Transactions in GIS*, 26(2), 669–690. <https://doi.org/10.1111/tgis.12877>

## The effect of turn-by-turn navigation on spatial memory in large-scale environments and ways to improve it

ZHANG Yanxia, LI Jing

(School of Psychology, Nanjing Normal University, Nanjing 210097, China)

**Abstract:** With the rapid development of science and technology, human behavior has become increasingly automated, and turn-by-turn navigation allows people to reach their destinations quickly by following the correct routes. However, such an efficient way of finding one's way can lead to a weakening of spatial memory. Numerous studies have shown that turn-by-turn navigation is detrimental to the acquisition of spatial knowledge, and researchers have begun to improve turn-by-turn navigation or design new navigation systems. Based on this, we propose a model of the effect of turn-by-turn navigation aids on spatial memory and make relevant suggestions for improving turn-by-turn navigation. Future research should improve the measurement of spatial knowledge in large-scale environments, investigate the neural mechanisms by which turn-by-turn navigation aids impair spatial memory, focus on the influence of individual factors to construct a more comprehensive explanatory mechanism, and develop new navigation systems that combine wayfinding efficiency and spatial knowledge acquisition.

**Keywords:** turn-by-turn navigation, navigation aids, spatial memory