arXiv:2602.03054v1 [cs.HC] 3 Feb 2026

迈向体贴型具身人工智能：从抽象概念到高保真原型，协同设计情境化多场所医疗机器人

Yuanchen Bai 康奈尔科技 / 康奈尔大学 纽约 / 伊萨卡，纽约州，美国 yb299@cornell.edu

Ruixiang Han 康奈尔科技 / 康奈尔大学 纽约 / 伊萨卡，纽约州，美国 rh652@cornell.edu

Niti Parikh 康奈尔科技 纽约州纽约市，美国 ntp27@cornell.edu

Wendy Ju 康奈尔科技 纽约州纽约市，美国 wendyju@cornell.edu

Angelique Taylor 康奈尔科技 / 康奈尔大学 纽约 / 伊萨卡，纽约州，美国 amt298@cornell.edu

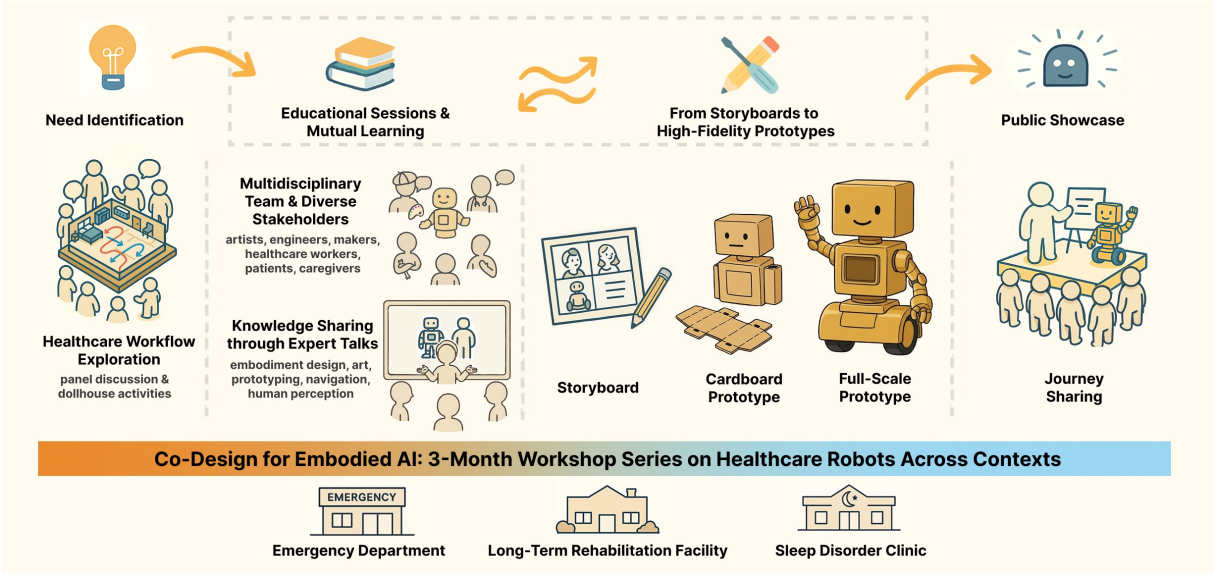


图1：医疗机器人为期三个月的共同设计工作坊系列概览，涵盖三种情境：急诊科、长期康复机构和睡眠障碍诊所。该系列从需求识别开始，经过原型制作，最终以最终公开展示收尾；教育课程贯穿始终，为迭代完善提供支持。

摘要

协同设计对于使具身人工智能（AI）系统扎根于真实世界情境至关重要，尤其是在医疗保健等高风险领域。尽管既有工作已经探索了多学科协作、迭代原型制作以及支持非技术参与者中，很少有人将这些要素融入持续的共同设计流程中。此类工作通常聚焦于单一情境和低保真阶段，从而限制了研究结果的普适性，也掩盖了参与者想法的演变过程。为应对这些局限，我们开展了为期14周的工作坊，由一支包含22名参与者的多学科团队参与，围绕具身人工智能如何减少三种医疗环境中的非增值任务负担展开：急诊科、康复机构和睡眠障碍诊所。我们发现，在教育支架的支持下，从抽象头脑风暴到高保真原型的迭代推进，使参与者能够理解现实世界中的权衡，并提出更多可部署的解决方案。我们提出了八项共同设计更体贴的具身人工智能的指导原则：契合情境、响应社会动态、关注预期，并立足于部署。

在不收取费用的情况下，允许为个人或课堂使用而复制本作品的全部或部分数字或纸质副本，但前提是不得出于营利或商业利益制作或分发副本，并且副本首页须附有本声明及完整引文。对于本作品中由作者以外的其他方拥有版权的组成部分，必须尊重其版权。注明出处后进行摘要转载是允许的。如需以其他方式复制、再版、发布至服务器或向列表重新分发，须事先获得具体许可和/或支付费用。请发送电子邮件至 permissions@acm.org 申请许可。*Conference'17*，美国华盛顿特区 © 2026年版权所有归所有者/作者所有。出版权已授权给 ACM。 ACM ISBN 978-x-xxxx-xxxx-x/YYYY/MM https://doi.org/10.1145/nnnnnnn.nnnnnnn

CCS概念
• **以人为中心的计算 → 参与式设计**。

关键词
医疗机器人、急诊科、睡眠障碍诊所、长期康复设施

ACM参考格式：
Yuanchen Bai、Ruixiang Han、Niti Parikh、Wendy Ju 和 Angelique Taylor。2026年。迈向体贴型具身人工智能：通过协同设计，将情境化多场所医疗机器人从抽象概念推进至高保真原型。载于。 ACM，美国纽约，24页。https://doi.org/10.1145/nnnnnnn. nnnnnnn

1 引言
近年来，人工智能（AI）系统的探索方向已从非具身助手逐渐拓展至更具物理基础、交互性更强的智能体，通常称为具身人工智能。这类系统能够感知周围环境，并直接参与现实世界中的行动 [39]。具身智能体（例如机器人）拓展了提供丰富服务和感官体验的潜力，同时也对感知、推理、规划和行动执行提出了更高要求，以应对现实环境的复杂性和人类需求 [39]。

面对日益增长的医疗保健需求，人们越来越希望机器人能够减轻医护人员（HCW）的负担并改善患者护理 [25, 55]。机器人的职责涵盖物流配送 [7, 52], 、康复辅助 [15, 73, 83], 和情感支持 [1, 29]。过多的文书工作、可避免的移动以及重复沟通等非增值（NVA）任务，会加重医护人员的压力，并使其难以专注于核心职责 [8, 9, 13], ，因此，人们对探索如何利用机器人减少运营低效、让医护人员重新聚焦于患者护理的兴趣日益浓厚。

然而，将机器人融入医疗保健远不止是技术自动化。临床环境错综复杂，各类设施对功能性、导航和交互都有各自独特的要求 [75]: 急诊科（EDs）节奏快且混乱 [69], ； 睡眠障碍诊所（SDC）要求研究过程采用个性化方案 [44], ； 长期康复中心（LTRs）则必须应对相互交织的医疗与情感需求 [65]。这些差异凸显了机器人系统必须具备多样且因情境而异的具身形式。此外，机器人的设计，包括可行性、成本、可接受性和可用性，都会对其应用发挥关键作用 [55, 61, 68]。应对这些因素，需要与一线利益相关者及各学科专家密切合作。

协同设计通过与利益相关者合作开展设计，促进此类参与，使研究人员能够获取情境化知识和用户偏好，从而为制定适合具体情境的设计方案提供依据[19, 57]。此前的人机交互研究已在医疗保健领域应用协同设计，以促进身体活动 [3], 、开发适用于儿科急诊科的社交机器人 [18], , 并支持痴呆照护 [47]。

然而，仍存在若干研究空白。首先，许多协同设计工作缺乏情境深度，且往往聚焦于单一医疗场景，因此难以理解机器人角色如何在不同环境中推广，或需要如何因地制宜地进行专门化。这些工作也往往强调需求识别和偏好征询，而在方案生成过程中，整合多学科输入的程度相对有限。其次，当前的协同设计工作仍停留在低保真阶段（例如故事板），未能进一步推进到更能近似真实世界部署的高保真原型。这一空白导致参与者从抽象构想发展到理解具身可行性的过程，在很大程度上仍未得到探索。第三，既有研究通常分别邀请利益相关者参与，并将综合分析留待研究人员事后完成，因此错失了医疗保健、机器人技术和设计等不同角色与学科之间开展协作交流的机会。最后，关于如何为非技术参与者提供循序渐进的教育，帮助他们理解并参与机器人设计，目前仍缺乏充分的指导。

弥补这些空白至关重要。缺乏跨情境学习，我们就无法获得足够深入的情境理解，以区分可泛化模式与情境特定需求，从而阻碍情境感知机器人系统在理论上的进步与实践中的部署。此外，高保真原型制作并非只是追求视觉真实感；它对于揭示真实世界部署中的种种矛盾至关重要，例如空间约束、导航冲突和人体不适。这些问题无法在低保真概念设计阶段得到充分感知或解决。此外，医疗机器人的功能、形态和交互风格必须体现跨学科洞见，涵盖工程学、临床实践、美学和照护伦理。从这个角度看，具身人工智能的协同设计不仅是构建机器人的方法，更是确定机器人应如何置身于具体情境中的途径。这类机器人必须做到体贴周到：对情境保持敏感，积极回应社会动态，契合情境目标，并顾及利益相关者的期望。

在此基础上，多模态推理 [81],世界建模 [87], 和边缘计算 [66] 领域的最新进展，促使各领域的研究人员（如工业建造 [64], 外科手术[5], 农业 [62]）开始探索能力更强的具身人工智能如何支持复杂的现实世界任务。这一转变反映了人们对具身人工智能更广泛的重新构想：其具身形态更加多样，交互活动更具创意，应用场景也更加丰富，遍及日常生活和工作环境。为了充分发掘这些可能性，我们现在需要考虑更广阔的具身人工智能设计空间，其中既包括工作流程适配性，也包括空间、时间和近体空间约束。这一扩展后的视角超越了以往协同设计指南（即针对固定式对话型社交机器人 [49]制定的指南）所能涵盖的范围。

为弥补这些不足，我们组织了一系列为期14周、每周一次且每次三小时的社区协同设计工作坊（见图2）。工作坊从需求识别和工作流映射开始，逐步推进迭代原型制作，从故事板延伸至高保真全尺寸原型（见图4）。我们还通过教育课程为这些活动提供支持，旨在帮助具备不同程度机器人专业知识的参与者有效参与协作设计。通过招募目标机构的医护人员并邀请跨学科参与者，我们为不同医疗环境中的三家目标机构开发了工作流适配机器人方案：急诊科、SDC和长期护理机构。

我们的研究由以下四个研究问题引导：

- **RQ1：** 在急诊科、长期护理机构和SDC中，机器人支持非增值任务时所承担的角色有哪些相同点和不同点?

• **RQ2:** 来自不同学科背景和多元利益相关者群体的参与者之间持续而紧密的协作，如何影响协同设计过程和工作坊成果？• **研究问题3:** 亲身参与、迭代式的共同构思活动（即从草图过渡到纸板原型，再到全尺寸交互式原型）如何支持设计改进，并提升所提出的机器人解决方案在现实世界中的适用性?

• **研究问题4：** 如何构建教育课程，以支持具备不同技术专长水平的参与者（尤其是非技术利益相关者）参与机器人设计?

我们做出以下五项贡献：

• **情境任务分析**：我们识别并分析了三种医疗保健情境（急诊科、LTR、SDC）中的关键非增值任务，为情境自适应机器人部署奠定基础（见图*4*）。

• **跨学科协同设计**：我们考察了多学科团队如何在不同情境中协作塑造机器人设计方向，强调了共享领域理解的重要性（见表*3*）。

• **设计构想的演变**：我们分析了参与者的构想如何随着迭代原型制作（即故事板、硬纸板和全尺寸原型）而演变，并揭示了创造性协商和情境锚定的模式（见表 *3*）。

• **支架式技术参与**：我们分析了不同教育形式（如演示、技术发展史和实现演练）如何支持参与者参与技术设计，同时揭示了他们对不同形式的偏好差异（见表 *3*）。

• **体贴型具身人工智能的设计指南**：我们提出了八项协同设计指南，以支持未来围绕四个维度开发体贴型具身人工智能系统：具身需求落地、具身约束与可行性、具身素养构建，以及具身设计空间拓展（见表 *4*）。

2 背景

2.1 协助医护人员的医疗机器人：需求、努力与挑战

医疗保健系统正面临越来越大的压力，这源于人口老龄化、疾病负担加重以及医疗差错发病率上升 [61, 79]。护理需求与有限资源之间由此产生的差距加重了医护人员的工作负担，损害了他们的身心幸福感 [25, 43, 55, 60, 74], ，进而可能影响护理质量和及时性 [61, 79]。护理场所各不相同，其差异体现在患者群体、临床工作流程和建成环境等方面，这使上述问题进一步复杂化 [70]。例如，在 LTR，住户往往是老年人或存在身体或认知障碍，因此护理工作复杂且零散，医护人员既要提供日常临床护理，也要给予情感支持 [16, 65, 75, 78]。在急诊科，医护人员在管理混乱环境的同时，还承受着巨大的身心压力；压力来源包括繁重的工作负担、较高的患者危重程度、安全关键病例，以及患者等待时间等外部压力以及不断变化的任务 [12, 22, 32, 71]。在 SDC，医护人员会开展夜间和日间睡眠研究，接待患者、设置监测设备，并帮助他们适应个性化治疗 [44]。有些任务需要医护人员直接关注，但另一些任务并不需要医学培训，却会占用医护人员的时间，使其无法专注于关键的患者护理 [61]。

机器人已展现出减轻医护人员工作负担、改善患者预后的潜力。其应用涵盖物流、日常照护、康复、心理社会支持和临床操作 [61]。例如，在住院和门诊设施中，*Gary* [21]可处理家务事务，*TUG* [30] 可在各科室间运送物品，而*Moxi* [14] 则通过配送医疗用品为护士提供支持。在长期照护环境中，*Lokomat* [24]可在康复训练中提供身体辅助，*PARO* [51] 可提供社会陪伴，而*Lio* [56] 则通过娱乐活动与患者互动，同时处理日常事务。

尽管近年来取得了进展，医疗保健机器人技术的设计与应用仍面临挑战，因为机器人需要针对特定的护理场所、任务和现实环境进行定制 [55, 72]。我们的工作深入探索了急诊科、长期护理机构和 SDC 中医护人员在实际工作中的工作流程。我们识别了非增值任务，考察了这些任务在工作流程中的作用，并探索能够无缝融入现实情境的机器人解决方案，以最大限度地提高应用潜力并赋能利益相关者。跨场所分析还带来了可迁移的见解，并支持情境感知设计。

2.2 在医疗机器人设计中整合多元利益相关者视角的重要性

既有研究强调，医护人员的接受度、信任、感知易用性和运营实用性对于推广应用至关重要 [61, 75]。机器人的设计应与真实的临床工作流程和患者工作流程相契合；否则，机器人可能无意中增加工作量并引发挫败感 [75]。此外，面对面的护理不仅仅是完成任务 [75]。例如，协助患者洗澡并非单纯的功能性工作；这还能促进沟通、提供情感支持，并让医护人员监测可能表明健康状况的皮肤变化 [35]。医护人员深谙这些细致入微的护理方式，但如果机器人设计只围绕功能性展开，这些方式就可能被忽视。虽然医护人员常被纳入设计过程，但通常只是作为领域专家接受咨询，或被要求对最终设计方案提供反馈 [3, 18, 19, 53], ，参与完整周期、迭代式协同设计的机会有限。

除医护人员外，纳入其他社区成员对于医疗机器人的成功部署和更广泛接受至关重要 [17, 55, 75]。这些利益相关者带来了多样化的需求、技能和观点。例如，医护人员优先考虑患者安全，而患者可能会认为监测技术会带来被监视的感觉（即全景敞视监狱 [19, 36]）。同样，医学生强调隐私的重要性，护理学生则突出社交互动功能的价值 [75]。参与者还会分享以生活经验为基础的见解，因为每个人都是自己生活的专家 [40]。此外，提高用户的技术素养以及对机器人潜力的认识，可以进一步促进接受度和有意义的参与 [59]。

表 1：医疗机器人和临床支持机器人研究中协同设计工作坊的比较，涵盖四个方法类别（参与者/参与、制品保真度、教育支架和指导原则）以及九个分析维度。✓ = 是（空白 = 否）。MCxt. = 支持跨情境学习的多情境参与；MDisc. =多学科参与者群体；CSus. = 在需求识别、协同设计和评估阶段，持续开展跨角色、跨学科的紧密协作；Iter. = 在各工作坊之间进行迭代原型设计；Hi-Fi. =生成高保真实体制品；Scaf. =结构化教育支架；Resp. = 贯穿工作坊阶段的响应式支架；Learn. = 学习轨迹和学习成果分析；Guide. =提出明确的协同设计指南。

		参与者/参与程度			制品保真度		教育支架			指南
论文	情境	情境建模	模型讨论	共同设计	迭代	高保真。	支架	呼吸	学习	指南
Ostrowski 等人（2021） [49]	老年护理									✓
Antony 等人（2023） [3]	老年护理		✓							
Foster 等人（2023） [18]	儿科急诊		✓							
Hsu 等人（2024） [26]	老年护理				✓		✓	✓	✓	✓
Frijns 等人（2024） [19]	老年护理		✓				✓			
本论文（2026年）	急诊科/LTR/SDC	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

我们的研究拓展了先前工作，将包括医疗利益相关者、工程师和艺术家在内的多元利益相关者置于核心，他们不仅是顾问，更是积极的共同设计者。通过长期的跨学科协作，我们揭示了功能需求与照护的关系层面，从而形成更扎根于真实照护情境、也更易被接受的设计方向。

2.3 衔接视角：面向社区驱动协同构思的研讨会

在本研究中，我们采用长期协同设计工作坊来支持广泛的活动，并从参与者那里获取洞见。我们针对组织医疗保健机器人长期研讨会中的**四项研究空白**（见表1）。

情境、参与者／参与方式：需要在角色与专业知识各异的利益相关者群体之间开展长期、紧密的共同构思。以往的研讨会往往将利益相关者群体分开。例如，在为身体活动促进进行协同设计时，物理治疗师与老年人参加了不同场次[3]。在为儿科急诊科设计社交机器人时，医疗保健专业人员与护理人员也是分别征询意见的 [18]。既往研究往往让利益相关者群体参加各自独立的场次，并依赖研究人员事后将其观点综合为设计洞见 [3, 18], , 而不是从一开始就促进各群体之间的直接协作。尽管最近一项研究引入了"混合小组"形式，由住户与护理人员共同参加五场研讨会，以探索护理中的机器人技术 [19], , 但我们的工作进一步拓展了这一方向：纳入更广泛的利益相关者角色与专业知识，并维持长期、紧密整合的共同构思，由研究人员促进各场次之间的密切沟通与相互学习。此外，跨情境比较揭示了共有需求与情境特定需求，从而能够更细致地解读机器人角色，以及不同设计选择对工作流程的影响。

制品保真度：追踪多阶段制品开发中的设计演进。人机交互研究人员采用了多种方法（例如焦点小组 [34], 故事板设计 [76], 协作式制图 [37], 原型制作 [63],以及专家小组 [26]）来促进学习通过设计 [26]。我们没有依赖单一方法，也没有停留在低保真草图阶段，而是通过多个阶段（即故事板、纸板原型和全尺寸原型）逐步推进协同设计，并通过小组讨论、访谈和制品分析，分析参与者的想法如何演变。

教育支架：需要提供教育支架，以支持知情参与协同设计。要让参与者有意义地参与机器人协同设计，就需要让他们了解机器人的技术能力。然而， [19]指出，当前普遍采用的做法是介绍预先设定的机器人具身形态和应用场景，这可能会限制参与者对机器人角色的想象。为拓展创造性思维，他们转而探索介绍技术模块化组件，例如对话式人工智能和计算机视觉。我们的工作更进一步，在多个领域（如美学、原型制作和机器人技术能力）开设专门的教育课程，并分析这些课程如何影响参与者的预期、共同构思能力，以及他们对具体演示与开放式探索之间权衡的认知。

指导原则：针对医疗保健人机交互情境提出长期协同设计指南。现有的长期协同设计指南（例如与老年人共同开展的设计 [44]）大多聚焦于对现有社交机器人的交互层面进行改进，例如在自由度较低的平台上迭代对话或行为设计。我们的工作将范围拓展至低风险和高风险医疗环境中的长期协同设计，并将多个情境（SDC、急诊科、LTR）与保真度从低到高不断演进的制品结合起来。借助更先进的具身人工智能能力，我们的多阶段流程得以更充分地构想功能、活动和具身形态，并长期追踪参与者的学习过程与想法演变。综合这些洞见，我们提出了可迁移的多维指南，将学习、共同构思、制品改进和工作坊组织融入具身人工智能共同设计之中。

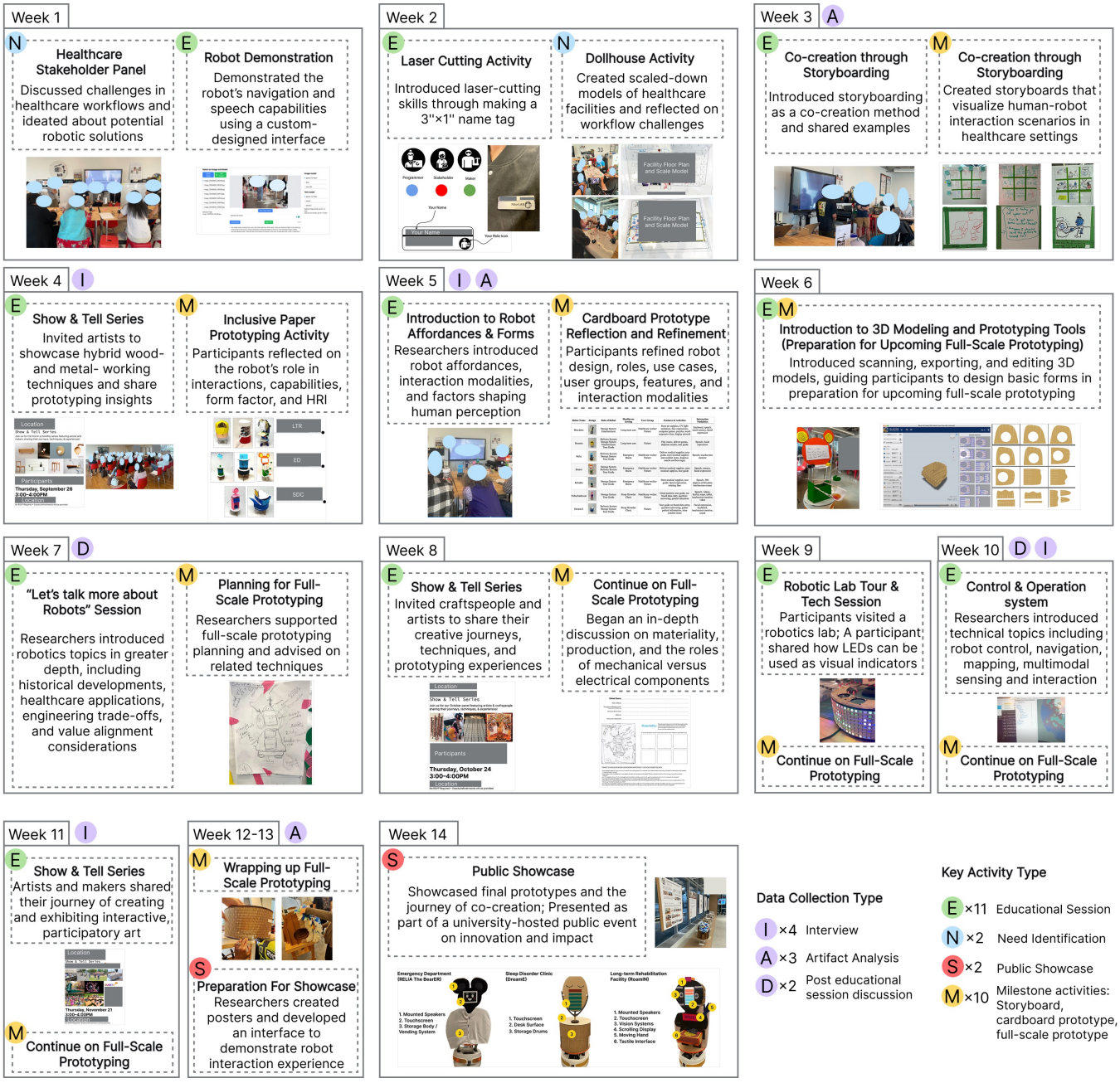


图2：研讨会概览。每周活动涵盖多种形式，包括教育课程（E）、需求识别（N）、里程碑活动（M）（例如故事板、纸板原型、全尺寸原型）以及公开展示（S）。每张活动卡片左上角的彩色标签标明了关键活动类型。此外，我们为每周标注了相关的数据收集类型，包括访谈（I）、人工制品分析（A）和教育环节后的讨论（D），以突出通过共同创造开展研究的整合。

3 方法

我们开展了一系列经机构审查委员会批准（IRB 编号：IRB0145631）的工作坊，为期 14 周，其灵感来自一个社区协作共创团体 [86]，该团体位于位于全球北方某大型都会区的一所大学校园内的 MakerLab 空间。研讨会共提供了 42 小时的面对面动手协同构思（每周 3 小时）。我们的目标是为急诊科、LTR 和 SDC 制作医疗机器人的原型，让参与者有机会为

表2：研讨会参与者、其自我认定的角色、适用情况下自述的医疗保健工作者（HCW）经验，以及分配给他们的设施情境协同设计团队（ED、LTR、SDC）。医疗保健工作者经验完全按照参与者的自我认定进行报告。星号（*）表示该医疗保健工作者直接在其团队所设计的设施内工作。

ID	性别	年龄	Role	医疗保健工作者专业领域与经验	Team
P1	女性	30–40岁	**医护人员** / 程序员	微生物学与免疫学；0–5年	ED
P2	女性	50–60岁	**HCW***	睡眠医学主任； >20年	SDC
P3	Male	60–70岁	程序员	N/A	ED
P4	女性	20–30岁	**医务工作者*** / 程序员	睡眠医学专业的医学生研究经验；5–10年	SDC
P5	女性	>70	艺术家	N/A	LTR
P6	女性	50–60岁	**医护人员** / 艺术家	长期照护者；15–20年	LTR
P7	女性	20–30岁	程序员	N/A	ED
P8	Male	50–60岁	建筑师 / 艺术家 / LTR 患者	N/A	LTR, SDC
P9	Male	60–70岁	艺术家	N/A	LTR, SDC
P10	女性	30–40岁	创客	N/A	ED
P11	Male	60–70岁	创客 / LTR 患者	N/A	LTR
P12	女性	60–70岁	艺术家	N/A	LTR
P13	女性	50–60岁	**HCW***	LTR 艺术治疗师； >20 岁	LTR
P14	Male	20–30岁	程序员	N/A	ED
P15	Male	20–30岁	程序员／创客	N/A	SDC
P16	女性	20–30岁	程序员	N/A	ED
P17	Male	60–70岁	**HCW***	内科医师； >20年	ED
P18	Male	30–40岁	程序员／创客	N/A	LTR
P19	女性	40–50岁	创客	N/A	LTR
P20	Male	50–60岁	**HCW**	未注明； >20岁	LTR
P21	Male	20–30岁	程序员／创客	N/A	ED
P22	Male	未披露	**HCW***	临床急诊医学；10–15 年	ED

他们最感兴趣的环境设计机器人。我们组织了迭代式设计活动（例如故事板设计、原型制作），并通过支架式教育课程、灵活的出勤安排和有组织的小组分享予以支持，以促进有充分依据的构思、跨学科参与、相互学习，并营造一个以协作和包容为特点的共创环境。来自大学 MakerLab 和机器人实验室的两到三名团队成员组织并主持了所有工作坊会议。

3.1 研讨会参与者招募与人口统计学特征

我们通过口耳相传、大学邮件列表广告以及专业人脉招募参与者。在研讨会开始前，我们专门招募了直接在机器人设计所针对的机构（急诊科、SDC、长期居住照护机构）工作的医护人员，确保协同设计过程以他们的情境经验和工作流程知识为基础。由于这项研究需要长期投入，我们提前沟通了目标和预期，以确保医护人员能够全程参与系列研讨会。其他参与者则在系列研讨会期间持续招募。我们欢迎能够贡献多元视角的社区成员，包括医护人员、患者、艺术家、创客和程序员。参与者在入组时提供人口统计信息，共有22名参与者完成了人口统计信息登记（表2）。其中包括11名女性和11名男性，年龄为20-70+。5名参与者是艺术家，6名是创客，9名是程序员，8名是医护人员。关于目标机构，两名医护人员是在急诊科工作的医生。两名医护人员在SDC工作（睡眠医学主任和一名医学生）。长期居住照护机构的一名医护人员是艺术治疗师，另有两名参与者是该机构的住户/患者。所有参与者均自愿参加研究，且未获得任何报酬。

3.2 研讨会平台与设备

机器人平台： 系列研讨会围绕为 TIAGo 移动底座机器人增添新的具身形态，以适应医疗环境展开 [50]。TIAGo 非常适合用于研讨会活动，因为它是一款自主移动平台，有效载荷能力为 154.3 磅，最高速度为 2.24 英里/小时，底座尺寸为直径 21.3 英寸、高 11.8 英寸，足以搭载新的机器人身体原型。这款机器人为构建多种具身形态和附加装置（例如，4 个 USB 2.0 端口、2 个 USB 3.0 端口、以太网端口、GPIO引脚、扬声器）提供了基础，还具备计算能力（英特尔酷睿i5处理器、256 GB 固态硬盘）和传感能力（例如，激光扫描仪），可执行各种机器人任务。我们通过加装 Jetson XAVIER图形处理器 [48] 和 OAK-D 摄像头 [41]，为机器人增添了额外的计算和传感功能，以展示机器人借助多种算法（例如，计算机视觉）实现态势感知和响应的潜力。为支持具身协同设计，我们选择 TIAGo 作为移动底座，以帮助参与者构想移动机器人的

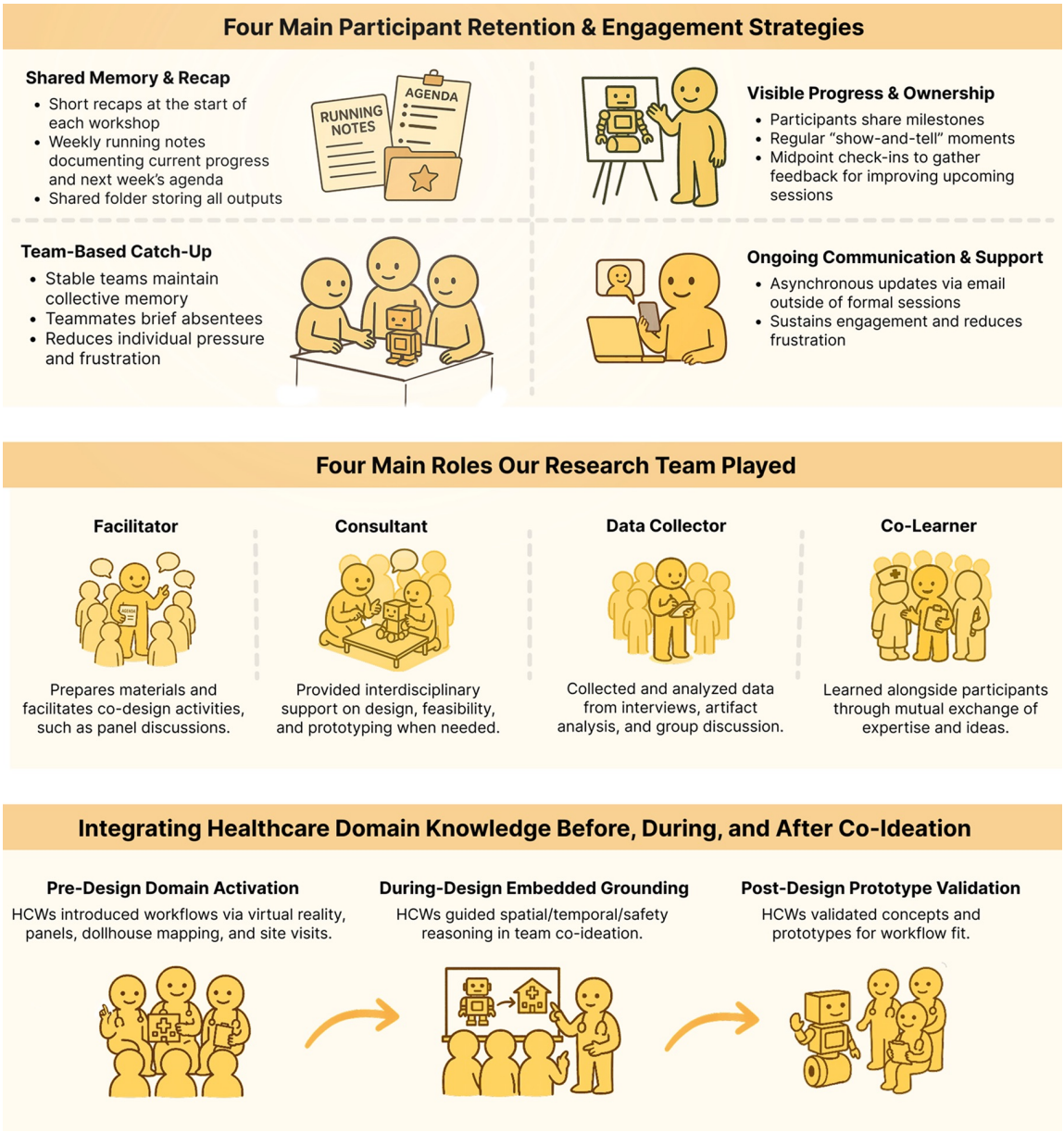


图 3：研究期间长期参与、研究人员参与和医疗保健专业知识的具体落实方式概览：（1）四种参与者留存策略，支持各场次之间的连续性、重新参与和持续推进；（2）研究团队承担的四种角色（即引导者、顾问、数据收集者和共同学习者），用于规范参与方式并维持恰当的界限；（3）在设计前、设计期间和设计后融入医疗保健领域知识，以指导设计推理并为原型改进提供依据。

多种具身形态和交互能力。参与者可以根据医疗保健情境，将新的机器人形态取放到底座上，并以此为起点进行共同构思。

MakerLab 设备：MakerLab 是一个开放共享的空间，便于使用各种工具，从最初的草图到完善的原型，设计、制作并测试新想法。研讨会中使用的设备帮助参与者快速制作并随着构想从草图逐步发展为全尺寸设计，我们不断完善实体原型，所使用的工具包括3D打印机、二氧化碳激光切割与雕刻机、电烙铁、手持式3D扫描仪以及各种木工工具。

3.3 标准研讨会流程

3.3.1 参与者留存与出勤记录。鉴于研究的长期性以及参与者日程可能较为繁忙，我们预期在准备阶段可能会出现偶尔缺席的情况。因此，为确保缺席某次研讨会的参与者能够在不丧失情境信息的情况下重新参与设计过程，我们实施了四项留存机制（见图3）。每次研讨会开始时，我们都会简要回顾前几次会议的内容。稳定的团队配置进一步支持了回顾环节，因为队友可以相互帮助补上进度，并维持正在发展的设计构想的连续性。为强化集体所有感，我们在整个研讨会期间都将不断演进的成果保持在可见状态，这有助于参与者重新联系此前的贡献，并跟踪小组的进展。此外，会议间的异步沟通能够及时提供更新，减少因日程限制而产生的挫败感。关于出勤记录，本研究中的设计工作本质上是以小组为基础开展的：各团队在集体协作中共同发展、完善并协商设计构想。对于每次会议，我们都记录团队制品、照片，以及原型和讨论的视频，从而能够追踪每个小组在为期14周的过程中的设计构想演变。这些小组层面的记录在留存机制的支持下，既捕捉了构想的集体演变，也在个人出勤情况出现波动时提供了补充信息。

3.3.2 研究者角色与影响力澄清。 研究团队承担了四种角色，以支持研讨会，同时确保其参与程度及潜在影响保持透明（见图3）。在不同环节，研究团队主持小组讨论、应要求提供跨学科阐释、记录互动与制品，并在参与者进行协作推理任务时与他们共同学习。这些角色边界支持参与者主导设计构想的生成与完善，而研究人员仅在必要时提供结构化引导，以维持富有成效的参与，并阐明已确立的机器人能力（例如，在特定情境中的导航、言语和非言语交互）。

3.3.3 参与者角色、专业知识与团队分配。 我们根据参与者的兴趣和专业知识，将他们分配到急诊科、LTR或SDC共同设计团队。

1）目标医护人员与领域知识驱动的共同设计。 从目标机构招募的医护人员被分配到与其临床背景相符的团队（例如，急诊科临床医生加入急诊科团队；睡眠医学临床医生和研究人员加入SDC团队；LTR艺术治疗师加入LTR团队）。我们组织各项活动，使其领域知识贯穿设计过程的所有阶段（见图3）：设计前激活（即专题讨论、玩具屋活动环境建图）、设计中领域知识融入（即故事板设计、纸板原型制作、全尺寸机器人原型制作）以及设计后验证（即反复审查不断演进的原型，包括功能表和摘要）。

2) 其他医护人员与非医护人员的多学科贡献。 除目标医护人员外，其他医护人员也根据自身兴趣加入各团队，提供了更多临床视角。非医护人员参与者，包括艺术家、创客、程序员，以及康复住院人员，带来了创造性、技术性和经验性视角，补充了医护人员的推理与需求评估。他们主要留在单一机构团队中以保持连续性，但在相关情况下也会跨团队分享其专业技能。例如，P9是一位专业插画师兼戏剧设计师，在LTR团队制作了故事板，随后为SDC团队提供了助眠环境的灯光与氛围概念支持。P8是一位具有建筑学训练的LTR住户，为LTR团队贡献了亲身经历见解，并在需要额外支持时协助进行SDC原型制作。这些多学科贡献拓展了设计空间，并丰富了跨团队协作。

3.4 工作坊活动

为支持迭代式协同设计，并促进不同利益相关者群体的参与，我们围绕四类关键活动组织了为期14周的社区系列研讨会（见图2）：**需求识别**、**教育课程**、**里程碑活动**以及最后的**公开展示**。这些活动经过策略性安排并相互交织，以促进相互学习、持续参与和有意义的贡献。

1) 在早期阶段，我们开展了两场**需求识别** 活动，以发掘不同利益相关者群体面临的挑战。第一场（第1周）是医护人员利益相关者小组讨论，参与者向来自三家利益相关者机构的代表提问并分享见解。第二场（第2周）是玩偶屋活动，参与者共同探索3D打印微型护理环境，并借助按比例制作的物件讨论日常运营中的空间与工作流程挑战。这些活动帮助设计扎根于真实情境。

2) 我们还安排了三项**里程碑活动** ，以推动协同构思并促进设计反思。这些活动包括故事板制作、纸板原型制作，以及高保真全尺寸原型制作，参与者通过这些活动将想法具象化并反复完善。这些活动作为共同的参照点，有助于保持参与度并直观呈现进展。

3)为了支持来自不同技术和专业背景的参与者，我们设计了一系列**教育课程** ，涵盖机器人技术、设计、制造和艺术等关键领域。这些课程不仅旨在介绍机器人技术，也鼓励参与者分享各自领域的知识。例如，我们的“展示与分享”系列邀请了艺术家和创客，分享他们的创作过程、原型制作实践和制造方法。研究人员还主持了有关故事板和设计技术的课程，以支持里程碑活动。

鉴于该项目以机器人技术为核心，我们特别强调了**机器人教育**，逐步引入关键概念，以适应参与者不断发展的参与程度。第1周通过动手演示TIAGo机器人，展示了集成导航和语音功能。第5周，我们介绍了机器人可供性和物理形态的概念，以支持纸板原型制作。之后的课程进一步深化了相关讨论。例如，“让我们进一步谈谈机器人技术”课程涵盖了发展历史、编程、价值对齐和医疗保健应用等主题。在第9周和第10周，参与者探索了机器人导航和环境建图。

这些课程经过精心安排，旨在弥补知识空白，并逐步加深参与者的理解。

4) 最终的**公开展示**邀请参与者展示他们的全尺寸原型，并回顾共同创造的历程。此次活动是更广泛的大学层面倡议的一部分，旨在促进学生社群和创业者社群中的创新与社区参与，进一步提升这项工作的知名度和影响力。

3.5 数据收集

由于我们的系列研讨会包含安排紧凑的环节和种类繁多、不断演变的活动，我们采用了多种数据收集方式。我们在整个研讨会期间录制了音频和视频，并通过各种结构化材料记录参与者的参与情况，例如工作表、活动表格、协作笔记和电子邮件。我们的分析主要基于以下三个来源：

1) 实物分析。我们分析了三类制品（即故事板设计、纸板原型制作和全尺寸原型制作），以探究参与者的想法如何随时间演变，以及他们的设计概念如何逐步完善。

2）访谈。我们在工作坊的不同阶段共开展了四次半结构式访谈，可分为两类。前两次为正式的一对一访谈，根据参与者的时间安排，于第4周和第5周在安静的环境中进行。为确保良好的体验并避免干扰原型制作工作，参与完全遵循自愿原则。例如，P20谢绝了邀请，但推荐了P19，认为对方能够提供更相关的见解。因此，本阶段共访谈了11名参与者。访谈样本涵盖三个设施团队（急诊科、LTR、SDC）的参与者，包括医护人员、患者／住户以及艺术家／创客／工程师。访谈聚焦于参与者对利益相关者小组会议的反思、他们在多学科协作中的经历，以及对整体工作坊组织的看法。由于时间有限，且参与者在后续阶段全身心投入动手制作，我们无法安排更多一对一访谈。因此，剩余两次为非正式的焦点小组式访谈，于第10周和第11周的原型制作环节中开展；期间我们走访了三个小组（即急诊科、LTR、SDC）的工作空间，并在他们进行原型制作时与其开展小组讨论。

3) 教育课程后的讨论。我们分析了紧接两场关键教育课程后开展的讨论：(1) “让我们进一步谈谈机器人技术”（第7周）和 (2) “控制与操作系统”技术环节（第9周）。这些课程为参与者在掌握基础知识后进行反思、澄清和交流观点提供了空间。

3.6 数据分析。

1) RQ1我们分析了设计产物的三个阶段：故事板、纸板原型和最终的全尺寸原型。每组的故事板均根据参与者和引导者的注释进行记录。对于纸板原型，我们准备了一张表格，列出机器人角色、交互模态、活动和特征等属性，供参与者填写（灵感源自先前的机器人协同设计工作 [47]），并与小组成员讨论这些要素以进行完善。全尺寸原型则汇总在海报上，并根据参与者的书面记录（例如电子邮件）和会中叙事添加注释。所有成果均由参与者审阅并确认，以确保准确性。在对机器人解决方案进行跨情境比较时，故事板记录了早期的发散式头脑风暴，内容相对抽象；纸板原型则经过一轮迭代，并纳入了对模态、特征和用户考量的详细讨论。相比之下，全尺寸原型体现了对各项构想的优先整合，但受时间限制，每个团队只能完成一个整合后的设计。因此，我们的主要分析聚焦于纸板原型，因为这一阶段既平衡了抽象性与具体性，也保留了构想的多样性。与 [47]，类似，我们将这些制品和表格中的视觉信息及注释归纳为六个主题（涵盖医疗环境中的四种机器人角色、机器人外观与具身，以及机器人交互模态）。第一作者进行了初步主题构建，另外两位作者对其进行审阅和讨论，直至达成完全共识。

2) RQ2–RQ4。我们对访谈和教育课程后讨论的文字记录进行了主题分析编码 [10]，以考察参与者对多学科协作（RQ2）的不断变化的观点、他们如何通过迭代完善构想以打造更高保真度的原型（RQ3），以及他们的学习曲线和对教育课程的反思（RQ4）。第一作者通过反复审阅文字记录制定初始编码。第二作者独立对部分数据进行了编码。经过协作讨论后，双方共同制定了编码本。随后，两位作者将该编码本应用于完整数据集，并使用科恩卡帕系数评估编码者间的一致性。之后，双方协作将编码综合归纳为更高层级的主题。对于 RQ2，分析得出两个主题和两个子主题（$\kappa = 0.91$）；对于 RQ3，得出两个主题和三个子主题（$\kappa = 0.94$）；对于 RQ4，得出三个主题和五个子主题（$\kappa = 0.71$）。所有数值均表明一致性达到较高至近乎完美的水平。

4 结果

4.1 RQ1：跨情境协同设计制品分析

我们展示了各设计阶段的制品，并考察这些制品如何反映三个医疗环境中的共通见解与情境特定见解。

4.1.1 各阶段的设计产物。参与者在三个医疗环境中共创作了**19 个机器人角色故事板**：急诊科设定了 6 个角色，涵盖登记和引导患者、提供物资、给予安慰以及支持出院流程等；LTR设定了 4 个角色，聚焦于识别患者身份、检索日程安排、提供娱乐以及跟踪治疗性互动；SDC则探索了 9 个角色，包括迎接和引导患者、提供个性化教育、收集夜间反馈、支持技师、管理数据以及协助完成离场流程。

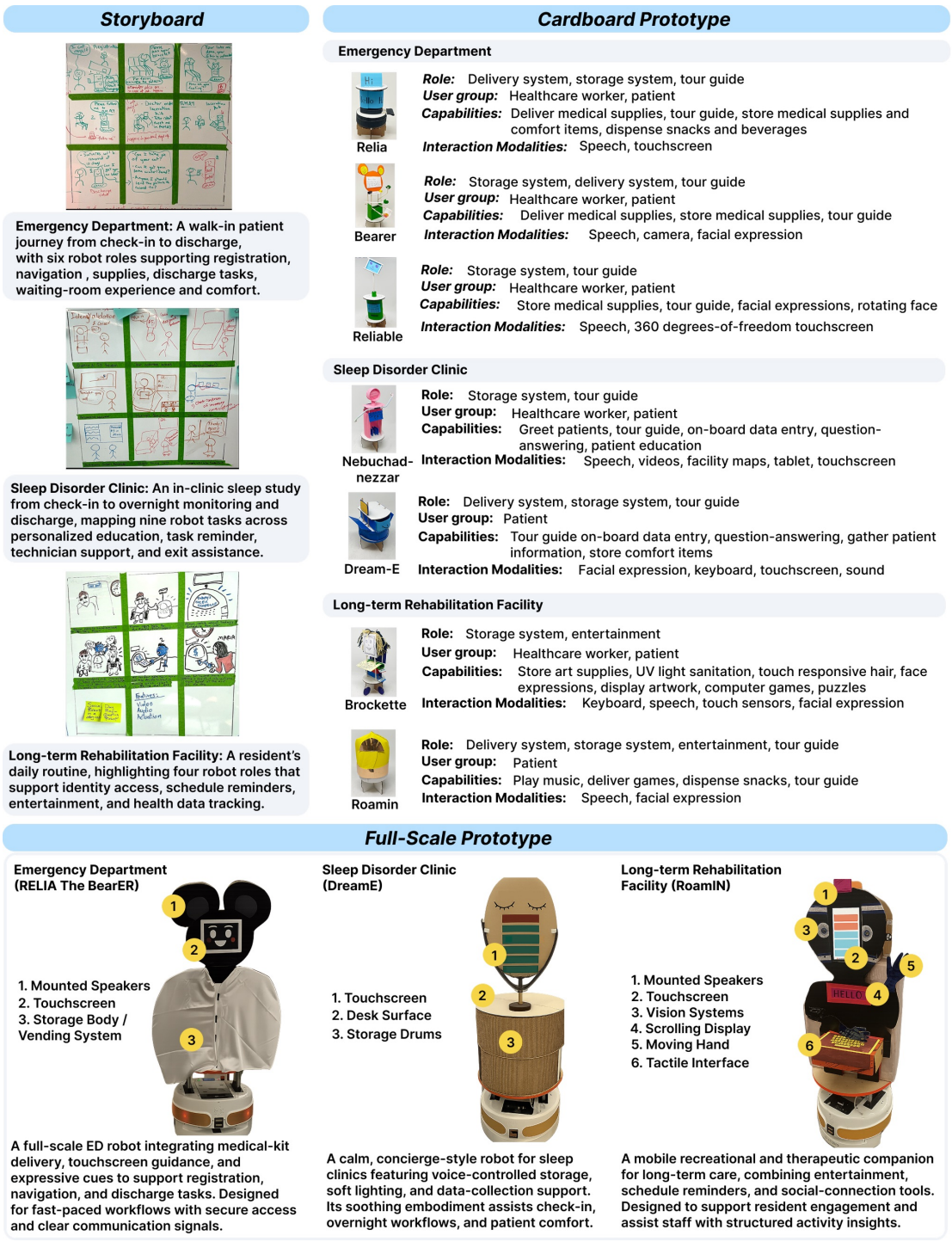


图4：共同构思在三个阶段中的演变：故事板展示了急诊科（上）、SDC（中）和LTR（下）中的机器人辅助场景；→纸板原型详细阐述了各情境所设想的机器人角色、用户群体、能力及交互方式，分别对应急诊科（上）、SDC（中）和LTR（下）；→参与者为急诊科（左）、SDC（中）和LTR（右）开发的全尺寸原型。跨医疗环境的机器人角色比较：1）递送角色在急诊科、SDC和LTR中均被设想（共享，但目的各异）；2）存储角色出现在急诊科、SDC和LTR中（共享，但目的各异）；3）导览角色在急诊科、SDC和LTR中均出现（共享但情境上有所区别，强调程度不同）；4）舒适/娱乐角色为LTR所独有。

在随后的纸板原型制作阶段，各团队在三个医疗场所共制作了**七个纸板原型**（急诊科：3个，SDC：2个，LTR：2个）。每个原型都进一步阐明了预期用户群体、任务专属功能（例如卫生清洁、配送、数据录入）以及交互方式，如语音、面部表情、触摸屏显示器和实体输入设备。

随后，每个团队都开始为每个场所制作一**个全尺寸原型**（共三个）。这些最终原型整合了早期故事板和纸板原型中的精选构想，将优先级最高的角色、功能和交互方式融合为全尺寸具身形态。它们包括：1）*RELIA the BearER*（急诊科）：一款面向急诊科的医疗套件配送机器人。它配备患者端显示屏、条形码验证功能和自动售货机式机身，旨在简化出院和套件取用流程。2）*DreamE*（SDC）：一款睡眠诊所接待助手兼放松助手。DreamE 配有舒缓灯光、镜面触摸屏和语音交互，营造宁静的护理体验，并协助工作人员执行配送任务。3）*RoamIN*（LTR）：一款面向长期护理的多功能治疗辅助机器人，聚焦娱乐、日程显示和家庭联络。它配备固定式扬声器、触摸屏、人脸识别摄像头和触觉文字界面等组件。

图4展示了协同设计过程中开发的制品概览。故事板描述、原型组件标注及功能性的详细信息见附录A。

4.1.2 比较不同医疗机构中的机器人角色。根据图4所示的研究结果，我们将原型归纳为四类机器人使用场景主题：（1）机器人作为配送系统；（2）机器人作为储存系统；（3）机器人作为导览员；（4）用于舒适与娱乐的机器人。这些主题还可进一步分为支持患者的机器人（即以患者为中心）和协助医护人员的机器人（即以医护人员为中心），用于工作场所。分析发现，不同医疗机构存在共同需求，同时也因患者群体和服务情境的差异而各有侧重。

机器人作为配送系统（急诊科、SDC 和 LTR）。配送与储物主题密切相关，因为参与者设计的机器人都配备了移动底座，而且配送任务本身就需要储物空间。为清晰起见，本主题聚焦于配送；及时运输对于避免工作流程延误至关重要。急诊科和 SDC 组都构想了具有配送角色、分别面向患者和医护人员的机器人。在急诊科，患者护理往往需要紧急处理，因此配送通常至关重要。例如，以医护人员为中心的 Bearer-ED 旨在医生到达之前，将医疗包直接送到房间，确保治疗流程顺畅："当患者在筛查室时，机器人可以取来医生 *[*订购的*]* 医疗包，并把它送到需要的房间。医生可以 *[*随后*]* 与患者会面，同时确保医疗包已准备好放在该房间里"（*P1*）。对于 SDC，以医护人员为中心的 Dream-E-SDC 旨在将电极或口罩等物资运送给技师，免去他们"跑回储藏室的麻烦（*P2*）"。Dream-E-SDC 配备了加大的储物舱，可装载必需设备和较大件的物资。

机器人作为储物系统的角色（急诊科、SDC 和 LTR）。虽然这三家机构的机器人设计方案都纳入了某种形式的储物功能，但以储物为重点的支持在 LTR 场景中最为突出，并融入患者的日常惯例。例如，Brockette-LTR（一款艺术治疗机器人）的底部设有三个隔间，用于存放"物资、游戏或任何必要的东西"（*P6*），提供灵活且个性化的支持。相比之下，在急诊科和 SDC 中，Relia-ED 或 Dream- E-SDC 等机器人上的储物隔间并非独立功能，而是与其配送职责紧密结合，用于运送医疗包、检测用品或数据录入设备，以支持节奏紧张、以医护人员为中心的工作任务。例如，Relia-ED 可以响应医护人员传递物品的请求："那个房间里的临床医生会说：'哦，你能把这个送给另一位临床医生吗？'然后储物单元就会打开、关闭，前往另一位临床医生那里，并通知对方：'有个包裹送给你。'接着它就会打开。"（*P21*）

机器人作为导览员的角色（急诊科、SDC 和 LTR）。以患者为中心的机器人作为导览员的角色，在 SDC 中最为突出，因为患者接待引导给医护人员带来了重复性的负担。由于患者分批次抵达，并且需要详细的空间定向，"技师会因为必须出去迎接患者、核实到场人员，然后一遍又一遍地解释接下来会发生什么而被打断。技师已经在执行非常机械化的任务了"（*P3*）。为减轻这一负担，预计 Nebuchadnezzar- SDC 将"帮助患者适应并熟悉所在位置，以及安全功能和即将面对的不确定性，了解他们接下来要做什么"（*P3*）。在急诊科，Relia-ED 等机器人同样充当患者引导，但其导向更为紧迫，并更侧重于目的地。它们的主要功能是高效地护送患者穿过临床空间，例如"从候诊室前往下一个房间"（*P21*），从而最大限度地减少诊疗路径中的延误。相比之下，在 LTR 环境中，患者已经熟悉周围环境，因此导览员这一角色受到的强调较少。尽管 Roamin-LTR 等机器人可以"护送"患者，但其主要功能是休闲和治疗，而不是进行结构化的空间定向。

舒适与娱乐方面的机器人角色（LTR）。只有LTR组的参与者强调了机器人在娱乐与社交互动中以患者为中心的角色。该设施被描述为相当于"*11*个足球场"，拥有500多名居民，因此医护人员没有足够的时间提供所有这些互动。例如，Roamin-LTR被设计用于协助娱乐活动，如分发零食和播放音乐，因为"所有工作人员都忙于医疗事务或记录工作，而患者非常想进行社交。"（*P5*）。一些参与者还设想将机器人融入治疗情境，例如艺术治疗；对休闲活动的数据追踪可能有助于监测患者心理状态。这一想法出现在故事板绘制阶段："艺术治疗师在一天结束时会从机器人处收到一份互动记录。"（*LTR*故事板注释）。

4.1.3 医疗设施中的机器人具身形态与交互方式。**机器人具身形态：亲切的外观与易于使用的交互方式**。在所有场景中，参与者都强调，亲切、友好的机器人外观有助于提升交互舒适度和社会接受度。在急诊科，Bearer-ED采用泰迪熊般的外观，旨在营造一种"可爱的具身形态，让患者感到自在"（*P1*）。P21还特别提到，Reliable-ED配备了360度屏幕，可从任意角度显示信息，确保患者无论身处何处都不会错过重要信息。在LTR场景中，Brockette-LTR配备了交互式

功能，例如可触摸的“头发”，其毛绒柔软的质感旨在带来舒适感和情感慰藉。触摸时，“头发”会摆动或亮起，并伴有友好的语音提示，例如“嗨，你今天怎么样？”（*P6*）。为确保卫生，LTR组还建议每次使用后用紫外线灯对表面进行消毒。在SDC场景中，Nebuchadnezzar-SDC带有笑脸表情，以“打破僵局”（*P3*），并在引导人们进行设施导览时说“跟我来”。

机器人交互模态。在七个硬纸板原型的创作者明确提及的交互方式中，语音是最常被提及的模态（6/7），其次是面部表情和触摸屏（均为4/7）。其他模态还包括声音、摄像头、设施地图、平板电脑、教育视频流媒体和键盘。语音因其用途广泛且为各项任务所必需而得到广泛应用，使其能够与用户顺畅沟通。每个设施中至少有一个原型采用了面部表情，这对于促进社交互动、提升机器人的亲和力和接受度发挥了关键作用。触摸屏为需要用户输入的任务提供了便捷的界面，例如Dream-E-SDC 收集患者的问卷反馈，或让医护人员操作抽屉等机器人实体设备。除了这些常用模态外，一些独特功能还针对特定场景而设计。例如，Nebuchadnezzar-SDC 集成了设施地图和视频，用于定制化教育，提供信息丰富的导览和教育内容。Brockette-LTR 上的键盘则用于娱乐目的（例如内置游戏或拼图）。

4.2 RQ2：多学科协作对协同设计动态的影响

本节展示了紧密、持续的多学科协作如何促进持续的知识交流与观点分享，从而带来更丰富、更具集体性的贡献，超越职业头衔和利益相关者标签的界限。

4.2.1 1）持续协作学习优化解决方案并建立信心。访谈揭示了持续协作学习的两个关键维度：不同专业知识之间的交流和团队间的创意分享。

跨专业知识学习：为设计提供依据并建立信心。十一位受访者中有八位强调，紧密协作促进了知识交流，使他们不断相互学习；这不仅使共同设计流程立足于实践知识，也增强了参与者贡献自身想法的信心。参与者通过利益相关者小组和玩具屋练习等互动活动，对医疗工作流程和专业实践获得了具体认识：“我以前从不知道医生的视角，也不知道他们在那一天会做些什么。”（*P21*）与此同时，医护人员也重视艺术家、工程师、创客、患者和护理人员的视角。正如P17所说：“几十年来，我一直与患者谈论他们在医疗保健中的经历。每个人的经历中总有一些东西会被带入互动，而在一群拥有不同人生经历和不同角色的人中，你总能从每个人身上学到一些东西。”这种协作式学习也增强了参与者进行贡献的信心，当他们发现自己的想法与与专业人士的想法相一致。P6解释道：“这让我觉得，我的想法不仅富有创意，而且也很有用，毕竟这些人是在如此专业的水平上工作的。”

跨团队知识交流：启发并优化解决方案。11位受访者中有两位特别强调，看到其他人关于机器人功能或外观的创意，激发了他们的灵感，并促使他们改进自己的工作。P6很看重每周进度回顾和可视化记录（如照片和录音），这些帮助她反思自己的进展，并从他人的设计方案中汲取灵感。她兴奋地表示：“试*[着]*这些新创意。”同样，从LTR组转而协助SDC组的艺术家P9指出，人员在各组之间流动有助于激发新创意：*“P6*去了另一个组，带来了不同的视角。其他艺术家也为不同的组带来了不同的视角。现在我在*SDC*组工作，但我还是想和*LTR*组交流。”

4.2.2 2）多重身份与拓展贡献。深度访谈显示，11 位参与者中有 6 位通过多重身份作出了贡献，其身份超出了主要职业头衔（如医护人员、工程师、艺术家）或利益相关者标签（如护理人员、患者）的范畴。这些交融的视角丰富了协同设计流程，使参与者能够在不同观点之间搭建桥梁。例如，LTR 设施的一位住户 P8 分享说，他同时也是一名持证建筑师和艺术家，因此既能表达住户的需求，也能为原型制作作出贡献。类似地，艺术家 P6 运用了自己约 *18* 年来照护发育障碍人士的经验；而 P5 则将艺术家的职业身份、曾任休闲治疗师的经历，以及作为慢性病伴侣的护理人员所积累的亲身经历结合起来：“我的人生伴侣患有慢性病，所以在自己没生病的时候，我常常花很多时间坐在急诊室里，只是为了观察那里发生的事情。因此，我能作出的贡献是多方面的。”我们发现，一些参与者虽然正式归属于特定的利益相关者群体（如医护人员），但他们所提供的视角远远超出了这一身份。例如，医护人员在运用专业知识的同时，也内化了患者和护理人员的观点，因此能够提出更具综合性和多元性的见解。一位拥有数十年患者诊疗经验的医护人员 P17 解释道：“你需要了解人性，以及患者的感受。十个人身处同一种情境，也会有十种不同的亲身经历——他们会觉得哪些事情好、哪些不好，哪些有所缺失、哪些遭到了误传，哪些令人受伤或构成微侵犯。你需要敞开心扉、竖起耳朵、打开心灵去倾听，并将这些观点融入护理之中。”

4.3 研究问题3：迭代作为完善与提升现实世界相关性的途径

本节考察了迭代式、动手实践的共同构思活动如何帮助参与者将抽象想法转化为日益具体的高保真机器人原型。随着机器人原型的保真度提高，参与者不断完善外观和触觉性，以提升利益相关者接受度，明确设想的使用场景，并且随着构建工作量增加，开始优先考虑核心设计需求。

表 3：针对三个研究问题（RQ2–RQ4）确定的主题和子主题。关于设计过程演变，研讨会包含三个迭代阶段：故事板 → 硬纸板原型 → 全尺寸原型（为简洁起见，表中分别称为阶段 1→ 阶段 2 → 阶段 3，表示子主题最突出的出现阶段）。

维度	主题	子主题
多学科协作 (RQ2)	1) 持续协作学习优化解决方案并建立信心	1.1) 跨专业知识学习：为设计提供信息并建立信心 1.2) 跨团队知识交流：启发并完善解决方案
	2) 多重身份与拓展的贡献	
设计过程演变 (研究问题3)	1) 从草图到高保真原型：具身与设想的使用场景中的迭代转变	1.1) 以亲和外观和触觉性为设计目标（阶段 1 → 阶段 2） 1.2) 调整设计方案，以实现人体工学与空间契合（2 → 阶段 3） 1.3）部署规划与预期功能（2 → 阶段 3）
	2）从探索到聚焦：通过迭代进行设计优先级排序，并考量现实世界约束(阶段 1 →阶段 3)	
教育课程 (研究问题4)	1) 协同学习机器人设计考量：探索权衡与人机协作	1.1) 从创意概念到约束感知权衡 1.2) 人机协作
	2) 新兴的工程导向推理：从运动模块到现实世界的挑战	
	3) 引发与现实生活的联系：整合日常生活与工作的洞见	3.1）对空间约束的切身体认 3.2）安全性与功能性之间的权衡 3.3）专业视角促发批判性反思

4.3.1 1）从草图到高保真原型：具身与设想的使用场景的迭代转变。**面向亲和外观与触觉性进行设计（从故事板到纸板原型）**。当参与者从故事板过渡到纸板原型时，他们开始注重让机器人显得友好、亲和，而不是令人畏惧。许多改进只有在抽象想法被具身化之后才显现出来："你心里有一些想法，但当你开始把它组装起来时，感觉却不太对。所以我们对一些地方做了调整，但我认为我们基本保留了故事板及其完整性。"（*P19*）这些调整通常集中在美学和触觉性方面：在LTR团队中，P19指出，"我们希望它不要让人害怕，而是显得亲和。"ED团队同样将机器人从一种基本的实用形式转变为更具亲和力的形态，正如P1回忆道："我们一开始只有一个头部和一个底座。后来有人建议把它做得更友好一些，不要只是像家具。所以我们把它的轮廓做得更圆润，让它看起来更像一只熊。"

调整设计以实现人体工学与空间契合（从硬纸板原型到全尺寸原型）。随着原型从硬纸板模型放大到全尺寸，参与者调整了设计，以满足空间适配和人体工学需求。LTR团队的P19回忆道："之前我们的设计尺寸稍微小了些。后来组装时，我们意识到可以留出更多余量，于是增加了内部空间，还把抽屉做大了。"SDC团队也对原型进行了改造，使其更易于使用。P2提到："我们调换了抽屉的顺序。这样抽屉就在视线高度，技术人员不用弯腰了。"

部署规划与预期功能（卡纸原型到全尺寸原型）。在全尺寸阶段，参与者的视野超越了原型本身，开始预想集成需求，并构想扩展功能。在SDC团队中，P2强调了基础设施要求："*iPad*的电子设备需要电源。"他们也着眼于拓展功能。正如P2所解释的："功能性是我们面临的最大问题。我们希望为技术人员配备可移动的储物空间，并为患者提供信息来源。最终，我们希望能与电子病历（*EMR*）集成，实现数据接口。"工作流程协调也是关注重点。P2解释说，机器人应该"把所有东西都整齐地备齐"，并"具备某种能够为患者提供指导的界面"，从而让技师专注于"计算机无法完成的任务"。

4.3.2 2）从探索到聚焦：在约束条件下确定设计方案的优先级（贯穿整个研讨会）。 随着原型从草图逐步发展为硬纸板模型和全尺寸模型，参与者面临的时间、协调和技术投入方面的要求也越来越高。

这些日益严峻的挑战让他们将这一过程视为真实开发压力的映射，促使他们艰难地权衡项目范围与优先事项。

在LTR团队中，P19解释了资源有限如何促使团队更加聚焦："我们的资源更少，所以必须专注于一件事。"一位来自ED团队的医护人员也指出，他们评估了在资源限制下哪些设计方案值得推进，并表示："我们更有可能把钱花在 *[*某些功能*]*上。"（*P17*）另一位ED团队成员P1描述了早期头脑风暴如何产生许多想法，但经过优先级排序后，范围缩小到临床医生认为最有用的方案："我们一开始有很多不同的想法，后来根据医生认为最有用的功能，只专注于其中一项。"因此，团队将重点放在物资配送机器人上，并暂时搁置了签到助手等选项。

优先级排序还包括整合早期头脑风暴中出现的相似概念。LTR团队的P19回忆道："我们先聚在一起，后来又分散开来。故事板催生了相似的想法。"整合有助于团队精简重复的想法，并将有限的时间和精力集中在更可行的设计方向上。

4.4 研究问题4：构建教育课程，促进包容性的技术参与

本节阐述了教育课程如何支持技术经验较少的参与者，使他们能够通过围绕设计权衡开展协同学习，将抽象概念与现实生活经验联系起来，进而参与工程推理。

4.4.1 1）协同学习机器人设计考量：探索权衡与人机协作。参与者就机器人应如何在各种现实场景中发挥作用展开了热烈讨论。课程并未将讨论引向非此即彼的判断（例如，某项设计是否可行），而是邀请参与者根据不同的应用场景，探讨机器人如何才能实用、适宜或有助于协作。

从创意概念到兼顾限制条件的权衡。在引导式对话中，参与者最初提出的构想往往体现出不受限制的创造力，例如设想一款"飞行天使"（*P12*）机器人，或一款"在天花板轨道上运行"的机器人（*P17*）。这些想法展现了头脑风暴的开放性，却很少顾及技术或环境约束。作为研究人员，我们借此引导大家讨论设计权衡，并通过机械臂执行抓取与放置任务等示例，说明效率、安全性与任务目标如何相互影响 [42]。随着讨论深入，参与者开始纳入对限制条件的考量，例如建议机器人遇到障碍物时应"寻找备用路线"（*P17*）。重要的是，这些交流并非单向讲授：参与者也实时地在彼此的想法基础上继续拓展。例如，P8评论"飞行天使"这一提议时说："噪音让人无法忍受"，从而从技术可行性的角度重新审视了这一构想。

人机协作。参与者并未将机器人视为替代者，而是被鼓励将其视为协作者，发挥机器人精度高、耐力强的优势，同时结合人的适应能力和判断力 [82]。这种人机协作理念在关于配送和物资分发的讨论中变得具体。参与者设想由机器人处理常规物流任务，而人类负责监督并发挥灵活性。P6 描述了为机器人设定简单、可重复行为的价值："例如，机器人经过编程后，每隔 *35* 英尺或每隔 *15* 英尺就停下来。然后它继续前进。这对机器人来说，似乎是一组合理的指令和能力。" 与此同时，P9 强调了虽轻量但必不可少的人类参与："物资已经送到了，*[*一个人*]* 可以在机器人过来时把 *[*物资*]* 递出去。" 最后，P6 强调了有人在场所带来的灵活性，并指出："*[*假设*]* 托盘都在那里，'哦，不，我不想要苹果酱'，那工作人员就不用把它放上去。非常简单。"这些反思共同展现出一种转变：从设想完全自主的系统，转向设想由机器人处理常规物流任务、人类提供灵活性和情境判断力的人机协作。

4.4.2 2）逐渐形成的工程导向推理：从运动模块到现实世界的挑战。虽然前面的主题聚焦于设计权衡和对情境的适切性，本主题强调参与者如何开始思考机器人行为背后的技术机制。尽管许多参与者没有技术背景，但他们逐渐展现出以结构化、工程导向的方式进行推理的能力——思考机器人功能如何实现、复用或调整，以适应不同的应用场景。在功能层面，他们设想机器人运动如何改用于其他任务。例如："如果它能上下运动，也许还可以左右运动。"（*P12*）P17 同样设想了复用抽屉的推拉动作："如果抽屉能推入和拉出，理论上就可以用它来按自动门上的按钮。"

在更广泛的系统层面，参与者将思考延伸至教育内容之外，预想机器人在现实世界中会面临的挑战。例如，在讨论避障之后，P5 指出空间限制可能会妨碍机器人的移动："机器人停下来，后退，然后转弯，但可能没有地方可以转。它可能会跑进别人的房间，或是跑到不该去的地方。"其他参与者则设想了传感器反馈如何影响决策："装一个传感器，提示有人来了。那么如果我是机器人，我就应该停下来，让那个人先通过。"（*P6*）或者"想象一下，传感器提示：这里没人。"（*P11*）谈到地图构建问题时，尽管我们的演示展示了机器人在静态、无杂物的实验室中运行，参与者仍预想到了机器人在更动态环境中可能面临的挑战。P8 问道："如果我把一堆凳子挪来挪去，会怎么样？地图能那么快更新吗？"P2 则对机器人尺度与地图分辨率不匹配表示担忧："如果你只把范围绘制到 *1* 英尺，而我们现在要造一台 *4* 英尺高的机器人，它还是可能撞到东西，或者有一部分超出范围。"尽管参与者没有使用专业术语，他们的思考表明，他们理解环境感知导航和地图更新等核心机器人学挑战；这些挑战也与基于二维激光雷达（激光探测与测距）的同步定位与建图 [85] 以及动态位姿图同步定位与建图技术 [80]的相关研究所关注的问题相符。

4.4.3 3) 引发与现实生活的联系：融入日常生活和工作中的见解。教育环节也促使非技术参与者将机器人设计与他们的日常生活及专业

实践联系起来。这些切身反思帮助他们更好地理解设计挑战，同时拓宽了他们对机器人设计的认识。

对空间约束的切身认知。技术背景较少的参与者从日常经验出发，强调机器人必须适应人类环境。艺术家 P5 回忆起校园里一台机器人挡住狭窄人行道时，自己产生了“顿时不喜欢它”的感觉，不得不走到草地上：“环境和机器人必须相互匹配、协同工作。”其他人则结合自己在医疗保健领域的观察，指出急诊科空间在繁忙时会动态变得狭窄：“忙起来时，过道会变窄，轮床排满了走廊”（*P5*），以及“有时连护士都得侧着身子走”（*P12*）。

安全性与功能性之间的权衡。技术背景较少的参与者将个人观察转化为对现实环境中安全性与功能性之间权衡的思考。P8 是一位艺术家，居住在长期居住照护机构。他回忆起与一位技术人员的谈话，对方解释了为什么某些机器出于安全风险考虑需要有人监督：“机器有运动部件，如果有人走上前去，部件夹住了他们的肢体，那就会带来真正的安全风险。”P8 将这一认识应用于医疗机器人的设计，并思考道：“从医疗保健的角度来看……机器人的机构中运动部件越少 *[], []*越好。即使是简单的往复运动，比如抽屉滑动，也可能带来隐患。”这表明，个人见解如何转化为设计逻辑，进一步凸显了采用更安全的机器人运动模式的必要性。另一方面，P5 提到了朋友乘坐自动驾驶出租车的经历，并分享了对安全设计过度复杂、导致实用性降低的担忧：“出租车检测到障碍物就停在那里……乘客坐在车里，车却一动不动”（*P5*）。

专业视角提示批判性反思。在教育课程中，我们在受控的实验室环境里演示了一台机器人，但参与者很快指出，现实中的设施还包括淋浴间等潮湿空间。在 SDC 工作的 P2 凭借其专业经验，提出了一些容易被忽视的挑战。她指出，他们的设施包含开放式卧室和浴室，也设有残障人士使用的潮湿淋浴间，并质疑机器人能否在这些环境中可靠运行：“机器人能防水脱离吗？如果它进入有水的表面会怎样？”（*P2*）P2 并未被动接受演示，而是积极运用自己的专业视角，揭示了团队原本可能忽略的环境挑战。

5 讨论

5.1 研究发现总结

通过在急诊科、SDC 和 LTR 情境中开展为期 14 周的多学科协同设计工作坊，我们探讨了参与者如何构想适用于不同医疗保健情境的机器人解决方案（RQ1），以及多学科协作（RQ2）、迭代设计（研究问题3）和教育组成部分（研究问题4）如何塑造共创过程。

对于 RQ1，参与者设想的机器人角色和交互方式既展现出明显的跨情境共性，又因设施需求而有所不同。在急诊科、SDC 和 LTR 中，大多数团队强调机器人应当友好、平易近人且易于交互，主要通过基于语音的交互来实现；这几乎出现在所有原型中，同时还包括面部表情和触摸屏界面。然而，各种场所的特点塑造了不同的角色优先级；例如，急诊科和 SDC 原型聚焦于配送，以支持快节奏的临床任务，而 LTR 的机器人设计则强调储物空间和舒适度／娱乐性，以支持住户的日常生活。即使是共同的角色，其设想也各不相同：在急诊科，导览员旨在帮助快速导航；而在 SDC，导览员则用于引导新入住者并提供信息。这些模式表明，机器人的角色应与设施特定的优先事项相契合，同时兼顾情境细微差异。

对于 RQ2，我们发现，与各自单独贡献相比，参与者在同一团队中密切协作时，他们的专业视角、个人经验和设计构想会持续互动、相互激发。这不仅促进了知识共享和相互学习，还通过反复交流增强了参与者的信心与投入度，营造出积极且不断强化的协作氛围。

对于研究问题3，我们发现，从低保真原型到高保真原型的演进，不仅体现在外观和触觉性日益逼真，也体现在思维方式的不断变化。早期的故事板支持发散式头脑风暴；中期的纸板原型促使参与者思考如何将机器人具象化并置于真实环境中；全尺寸原型则要求参与者面对尺度、人体工学和未来部署等实际限制条件。这些阶段相辅相成：低保真阶段支持广泛探索，而高保真阶段则推动整合与完善。

对于研究问题4，我们发现，融入其中的教育课程帮助非技术参与者从想象式头脑风暴转向更能考虑限制条件、以工程为导向的推理，同时也促使他们将机器人设计与日常生活经验及专业实践联系起来。这拓宽了他们对人机协作、设计挑战和技术可行性的理解，使他们能够做出更加切合实际的设计判断。与此同时，这些植根于日常生活和工作经验、以用户为中心的视角也丰富了技术参与者的认识，进一步促进了多学科团队内部的双向知识构建。

5.2 医疗具身人工智能长期共同设计工作坊中的可迁移指南

我们的分析将为期十四周、涵盖多种情境的工作坊成果提炼为一个四维框架（共八条指导原则），以共同阐明何为具身协同设计，并确定具身人工智能所需的设计支架（见表 4）。这些维度强调：（1）以人们切身经历的具身需求为设计根基；（2）随着保真度提高，依据显现出的物理与社会约束，通过反思完善构想；（3）提升参与者的具身素养，以促进更有依据的共同构思；（4）通过整合多学科团队中多样的具身感知，拓展设计空间。

维度 *1*：具身需求落地。（*G1.1*） 具身人工智能的协同设计应从问题和需求出发，而非

表 4：从为期14周的多情境研究中提炼出的四个具身人工智能特定的共同设计维度和八项指导原则。这些指导原则阐明了具身协同设计的特点：将设计扎根于身体日常惯例和空间现实；通过物理与社会约束揭示可行性；逐步培养利益相关者的具身素养；并拓展设计空间，朝着面向部署的推理迈进。每项指导原则都配有来自系列研讨会中急诊科（ED）、长期康复（LTR）和睡眠障碍诊所（SDC）情境的示例。

维度 1：具身需求落地	
指南	**示例**
G1.1 识别超越非具身系统所能察觉的具身需求—— **无法满足的需求**：需要具身临场感、空间感知、移动能力或现场互动的表层需求，而不是默认采用技术锤式假设。	例如，来自 SDC 的医护人员设想的角色（热情迎接、引导陪同、发放问卷、回答问题、运送物品、查看患者状况），这些都是当前固定式信息亭无法充分满足。
G1.2 绘制真实工作流程和情境化物理环境 **设计基础**：记录物理设置、空间约束，环境线索和塑造具身智能体适配位置的工作流模式。具身智能体必须适配其中。	例如，现场设施考察；对房间进行虚拟现实／照片漫游以及走廊；通过娃娃屋活动映射患者流动和工作人员移动，以及真实工作流程序列。
维度 2：具身约束与可行性	
G2.1 通过迭代揭示限制条件，逐步迈向更高 **保真度原型**：逐步从低保真转向高保真具身形态，以呈现外观、触觉性、空间-空间适配、人体工学及交互协调因素，而这些因素只有在想法被物理实体化时才会显现。	例如，故事板 → 硬纸板 → 全尺寸促使反思-对不具威胁感的外观、触觉舒适度、人-机在LTR中的协作，以及调整抽屉高度，以便在SDC中实现人体工学弯曲。
G2.2 反思可行性约束以引导收敛 **优先级排序**：突出决定性的可行性因素（例如，工程-投入、成本、部署可行性），以帮助参与者在期望功能与现实资源限制之间取得平衡。	例如，ED团队将快速工具传递和患者沟-通优先列为急症护理的高影响力事项，在认识到高保真完善所需的工程工作量（用作现实场景部署成本考量的类比）。
维度 3：具身素养构建	
G3.1 通过具体演示衔接抽象概念 **与生活经验反思**：将技术概念具象化为具体的机器人行为，并创造讨论空间，让参与者……参与者将其与日常工作／生活见解联系起来。	例如，现场演示和情景片段；促使进行如下反思如机器人在参与者之后避免个人空间侵犯分享了在狭窄通道中被挤到一边的经历。
G3.2 使技术深度适配保真度阶段及不断演变的理- **解**：逐步增加技术细节，同时使用反馈与反思，以便根据能引起共鸣的内容来调整内容，对象是参与者。	例如，访谈期间参与者要求了解的机器人历史；引-入导航、避障、感知限制以及全尺寸原型制作期间的自主性。
维度4：具身设计空间拓展	
G4.1 融合多元具身感知，拓展 **设计空间**：结合艺术家、医护人员、护理人员、工程师的以及患者的具身直觉，发掘任何单一视角都无法独自揭示的机遇。	例如，艺术家突出材料的温暖感；医护人员强调工作流程适配性；工程师优化稳定性和传感；护理人员注意安抚性提示。
G4.2 采用优势导向的方法，拓展创意贡 **献**：邀请参与者分享亲身经历、技能和个人故事，从只关注需求转向创造价值的共同创造。	例如，通过访谈发掘参与者未被发现的技能和贡贡献，激发新的共同创造方向。

从现有技术能力出发（即一种"技术锤子"方法）。例如，来自SDC的P2指出，他们目前的固定式信息亭不足以在入职引导参观期间迎接并引导患者在设施内走动，也不足以支持沟通与更新，并且他们需要更友好的外观，以及体现在机器人的实体形态中的更丰富功能。*(G1.2)* 我们还发现，理解此类需求如何定位至关重要

在真实环境和工作流程中：实地考察、现场走查和玩具屋活动帮助大家共同理解人们何时、为何在何处移动。正如以往研究所示，如果缺乏这种扎根于实际情况的了解，设计很容易与真实的空间和工作流程条件脱节。例如，[54], 远程呈现机器人用于机构痴呆照护时，受到现实环境中物理限制的阻碍（如空间有限、移动模式受限），导致一线

工作人员反映，机器人很容易被撞倒，也难以融入日常惯例。因此，我们建议，早期设计不仅要立足于抽象目标，还要以具身需求为基础，并使其适应具体的空间和工作流模式。

维度*2*：具身约束与可行性。（*G2.1*）随着构想从低保真草图发展为纸板形态，再到全尺寸模型，参与者开始注意到只有在设计方案具身化后才会显现的问题，例如外观、触觉性、空间适配、人体工学弯曲，以及人类与机器人之间的工作分配。以往研究也表明，具身化不足会掩盖关键的可行性问题。例如，Ren等人 [54] 描述了未经定制的机器人设计如何无法满足工作人员和住户的沟通需求，具体问题包括屏幕太小，以及机器人语音音量太低，导致视力或听觉障碍者难以听清。在我们的案例中，随着参与者逐渐注意到诸如SDC中的抽屉高度，或LTR中屏幕是否需要保护罩等细节，也出现了类似的具体限制条件。这种认知直接推动了设计方案的完善，说明迭代式具身化能够揭示原本可能被忽略的细节。（*G2.2*）同样，逐步提高原型保真度，也让资源限制变得更加突出。换言之，参与者更加意识到，建造和维护机器人需要投入工程工作量、时间和预算，而不只是画草图。这帮助ED团队等小组在无法一次性实现所有功能时，优先确定首先要开发的功能。因此，我们建议采用迭代式具身设计；这种方法不仅能让构想变得更加具体，也能通过反思驱动的完善过程，促使限制条件和优先事项逐步显现。

维度 *3*：具身素养构建。让具有不同技术背景的利益相关者参与其中，引出了一个关键问题：我们如何支持他们就机器人做出明智的设计决策？我们的研究发现，对于非技术参与者而言，抽象地解释传感和控制可能难以理解，而具体演示（例如观察机器人“打开抽屉或响应语音指令”（P17））则让机器人的能力更加直观。我们还发现，尽管研究者试图通过聚焦传感器集成和空间映射等核心功能，简化面向非技术受众的机器人控制演示，但参与者仍觉得这“太技术化”。这种差异揭示了设计意图与参与者对所介绍概念的实际接受程度之间存在落差。相比之下，以通俗、较少技术性的方式介绍机器人发展史，更能引起共鸣。正如 P19 所说，“看到事物已经发展到如此程度，让我们开始思考还可以做些什么。”为支持持续学习与参与，我们建议（*G3.1*）采用具体演示，并通过反思生活经验来激发学习。此外，（*G3.2*）应融入定期的反思性实践（例如会后复盘和非正式沟通），以了解参与者的接受程度。提供灵活的场次选项，让参与者选择接下来的探索路径，也有助于营造更具适应性和响应性的体验。归根结底，随着保真度不断提高，具身素养也必须动态发展，而不应被视为一次性的教学环节。

维度 *4*：具身设计空间拓展。（*G4.1*）我们的研究结果与既有研究相符，后者强调了社交机器人领域多学科协同设计的价值 [33, 49], ；同时，我们进一步指出，跨角色对话如何促进兼顾专业知识与生活经验的综合解决方案。我们没有分别开展访谈、之后再综合各方观点，而是强调持续的组内协作，让参与者长期留在稳定的多学科团队中。在这些紧密合作的小组里，知识并非作为静态信息等待收集，而是在持续的动态共创中生成，参与者不断相互学习、彼此启发。（*G4.2*）我们也借鉴了对健康技术研究中基于缺陷的框架的批评 [20], ，这类框架往往忽视老年人的能力。我们的研究进一步表明，来自长期护理机构和老年社区的参与者通常被视为表达需求的群体，但他们也以艺术家、创客和治疗师的身份参与其中，并运用生活经验为设计决策提供参考。为支持这类贡献，我们建议提供讲故事等平台，让参与者分享他们所面临的结构性和个人挑战，也分享其能力、创意实践和亲身经历优势。个人故事展现了多元的专业知识，打破刻板印象，并带来有意义的设计洞见。

5.3 拓展医疗具身人工智能的设计空间

在第 4.1 节所呈现的设计成果基础上，本节阐述了我们协同设计方法在方法论上的更广泛创新。我们的方法揭示了医疗具身人工智能在三个维度上更为丰富的设计空间，而以往研究和商业部署往往将这些维度分开考量：（1）基于工作流程的情境化；（2）能力感知式构想；（3）医疗保健服务之间的跨情境学习。

1）基于工作流程的情境化。参与者没有将机器人视为独立工具，而是设想它们成为融入日常临床工作流程的协作者，并参与患者的亲身经历。以工作流程为设计基础，使我们能够将机器人角色与具体的护理体验联系起来。例如，参与者设想为 SDC 机器人配备柔和的内部照明，使其像夜灯一样发光，并轻轻闪烁，营造出令人平静的“呼吸”效果。在急诊科，人们特别强调到达前工具包配送，以配合紧迫的临床节奏。PARO 等用于老年护理陪伴的现有系统 [28], 、Moxi 等用于协助护士运输工具的系统 [14],，以及 SERVI 等用于送餐的系统 [46], ，都发挥着实用功能；然而，其设计细节的透明度有限，例如它们的行为、具身形态和工作流程映射是如何确定的。先前研究也表明，如果具身细节（如屏幕、语音和可供性）与环境不契合，某些部署可能会偏离日常实践 [54]。通过重点关注机器人行为和外观如何与工作流程逻辑相契合，我们的共同设计流程能够在设计过程的早期预见这些挑战。

2）能力感知式构想。 新兴的具身人工智能能力，例如多模态推理、共情对话和移动操作，为护理协作提供了新的方向。

过去的系统（例如儿科急诊分散注意力机器人）通常由远程操控，并采用脚本化交互，互动性有限 [27],而当前的发展方向则支持响应更灵敏、更自主的行为。参与者设想，机器人能够迎接患者、回答问题、递送并消毒工具包，还能提供情感支持。这些构想借助了多种表达方式（例如灯光、手势）、更丰富的具身材料，以及能够支持灵敏响应和社会意识互动的对话能力。

3）跨医疗服务类型的跨情境学习。我们对急诊科（ED）、SDC 和 LTR 的比较揭示了共同的照护目标（例如帮助患者感到方向明确、安心或得到倾听）如何因服务性质不同而呈现出不同的形式。例如，参与者设计的"导览员"角色，在急诊科表现为走廊方向指引，在 SDC 中表现为环境导览，而在 LTR 中则不太受重视，因为住户熟悉周围环境。同样，我们的制品也表明，配送任务会因紧急程度和存储限制而有所不同。急诊科要求精准、及时地配送物资，而 SDC 更注重提供较大的储物空间以支持睡眠研究准备，对紧急程度的要求则较低。这些细微差异表明，即便是看似相似的角色，也需要根据具体设施进行解读和调整；只有通过比较性的跨情境设计，才能获得这类认识。

5.4 迈向体贴的具身人工智能

具身人工智能日益被视为一种技术范式，有望融入日常生活，并赋能医疗保健 [38], 教育 [45], 工业 [84] 和家庭环境 [77]等关键领域的人类活动。与主要在数字环境中运行的虚拟人工智能系统（例如不会直接与物理世界互动的基于语言模型的聊天机器人）不同，具身人工智能从部署之时起便进入人类所处的环境。这促使我们思考：未来，具身人工智能系统将从孤立原型走向广泛融入日常生活，不再是专业场景中罕见的工具，而是无处不在的陪伴者、导师和同事。我们该如何设计它们，使其有意义地融入我们的社会生活？

我们认为，共存能力并非次要考量，而是实现接受、信任和长期融入的根本前提。为此，我们必须设计体贴的 具身人工智能：这类系统不应止步于满足功能需求，还应培养对社会规范（例如尊重对话中的轮流发言或隐私边界）、空间动态（例如在拥挤的走廊中导航而不扰乱人流）和情感需求（例如在令人紧张的护理场所提供安抚性提示，并采用共情语气）的敏感度。这一点在医疗保健等高风险领域尤为重要，因为与专业实践不相符可能导致摩擦，甚至造成伤害 [71]。

5.4.1 面向共享日常惯例与关系边界的设计。参与者探讨了机器人如何从被视为单纯的工具，转变为日常护理日常惯例与关系中的关系行动者。长期协同设计促使参与者反思根植于日常惯例和专业实践中的空间与交互方面的考量，在此过程中，参与者提出了一些新颖而引人深思的问题。例如，在 LTR 情境中，P5 说道："如果我是机器人，我可不希望有人抓住我的裤子"，这表明参与者赋予了机器人某种具身敏感性，并设想机器人可能拥有怎样的空间或关系边界。这与先前的研究相呼应；相关研究同样考察了人们对机器人抱有怎样的关系期待，探讨癌症护理机器人是否会被期待表达同情心并见证人类痛苦，同时质疑这些期待所包含的关系边界与责任 [31]。

5.4.2 将原型视为思考工具。为了探索机器人如何参与日常护理惯例，我们发现，尽管低保真制品有助于早期构思，却无法呈现其中的复杂细节。因此，高保真原型制作不仅是完善构想的必要手段，也是用于揭示真实世界部署复杂性的思考工具，例如人体工学、安全性以及工作流程整合。高保真原型制作在医疗保健人机交互领域仍相对少见，既往研究中有一些案例聚焦于模块化机器人的快速原型制作，例如卫生清洁或社交互动模块，并通过迭代调整来满足用户需求 [11]。我们的研究延续了这一方向，同时进一步详述了不同阶段的原型如何影响参与者的投入，并加深他们对机器人实际应用的理解。我们认为，逐步转向高保真原型制作不仅有助于完善解决方案，也有助于增进人们对机器人技术的熟悉程度，进而促进机器人在整合式护理环境中的接受度。

5.4.3 跨学科与多元感知的设计。这些见解也受到医护人员、护理人员、工程师和艺术家之间多学科协作的进一步塑造。每个群体都带来了独特的视角。医护人员和护理人员着重关注工作流程与患者需求，工程师梳理可行性约束，而艺术家则强调感官与情感特质（例如，灯光或材料选择如何在 SDC 中营造舒缓氛围）。例如，一篇关于艺术与机器人技术的评论文章与我们的发现相呼应，指出艺术参与能够拓展机器人设计的表现力与社交潜能 [23]。这些多元视角共同使设计扎根于功能逻辑，同时也兼顾体验与情感共鸣，最终创造出既符合实际可行性又体现生活经验的机器人。

5.4.4 构想协作式机器人生态系统。我们还注意到一种跨越不同团队和情境的普遍倾向：参与者常常设想在某一情境中部署多台机器人，各自承担不同但相互协调的角色，例如护送患者、运送物资，或收集情境数据以支持护理规划。由此呈现的并非一组各自独立的助手，而是一种融入护理流程的多机器人协作范式：机器人被视为与人类及非人类队友并肩协作的行动者。近期关于这一主题的研究也支持了我们的发现。例如，有研究探讨了人们如何看待机器人在员工层级中的位置[2], 不同沟通方式如何影响时间紧迫的医疗保健情境中的团队合作 [67], 另有研究则探讨了协调机器人团队所面临的技术挑战 [6]。

5.5 局限性与未来工作

我们的研究存在若干限制。(1) 招募与参与。由于研究需要参与者持续投入，目标机构中只有五名医护人员能够持续参与（急诊科：2人；LTR：1人；SDC：2人），这可能影响研究的代表性。此外，我们记录的是团队层面的进展，而未逐周追踪个人出席情况，因此难以对个人参与模式进行细致分析。此外，研讨会需要高度投入且不提供报酬，可能因此吸引了对机器人技术更具内在热情的参与者，从而限制了态度的多样性。(2) 机器人平台限制。我们主要将TIAGo用作移动底座，以帮助参与者围绕导航和移动进行构想，同时允许他们设想在其基础上构建新的具身形态。然而，依赖单一平台可能限制参与者对其他新兴具身人工智能可能性的探索（例如人形机器人、软体机器人、扩展现实集成机器人）。(3) 情境覆盖范围。时间限制使我们无法全面考察每种情境。急诊科的讨论聚焦于自行就诊流程，而非救护车送诊；SDC的研讨环节聚焦于诊所内研究，而非居家测试；LTR的概念则反映了住户及艺术治疗情境。三个研究地点均位于全球北方，这可能限制研究结果向其他护理模式的推广。(4) 群体动态与社会因素。尽管访谈反映出合作，但现场观察也揭示了紧张时刻，例如SDC团队内部就抽屉应如何打开，以及其柜门应如何设计以便夜间使用产生了分歧。此外，我们与参与者长期建立的关系可能引入了社会期许偏差，使他们不太愿意表达批评性观点。

未来的工作将把这一方法拓展到更多类型的设施、不同地理区域和具身人工智能平台，并探索在更复杂的医疗保健工作流程中实现多机器人协调。未来的研究还可以考察参与者对具身人工智能的态度如何变化并影响设计成果，以及角色分配和相对群体规模如何影响多学科协作。最后，未来的工作可以在长期协同设计项目中纳入更系统的出勤追踪。

6 结论

为医疗保健设计具身人工智能，需要整合不同利益相关者的需求与专业知识，但以往的工作很少能在持续的共同设计流程中，兼顾多学科协作、逐步迈向高保真原型，以及为非技术参与者提供支持。我们开展了一项为期14周的多学科协同设计研讨会，邀请22名参与者共同设计医疗具身人工智能，以应对三种不同护理场所（LTR、急诊科和SDC）中的NVA工作；研讨会通过教育课程提供技术与设计基础方面的支架。我们分析了多个阶段的设计产物（故事板、纸板原型和全尺寸原型），并结合访谈和教育课程后的讨论。研究结果突显了设计需要契合各设施的具体优先事项，同时关注情境细微差异。持续的多学科协作促进了相互学习；迭代原型制作为从抽象构思转向具身化思维提供了支架；教育支架则帮助非技术参与者在了解现实限制条件的基础上做出设计决策，同时也拓宽了技术参与者的视野。我们的研究表明，具身人工智能的核心挑战不止于功能性，更在于如何在人类环境中实现有意义的共存、共享日常惯例、尊重关系边界，并成为社会技术团队中值得信赖的一员。为推动这一愿景，我们提炼出八项设计指南，以开发更周到的 具身人工智能系统；这些系统不仅在技术上可行，也能为社会所接受、值得信赖，并有意义地融入日常生态。

致谢

本材料由美国国家科学基金会资助，资助编号为 IIS-2423127。

参考文献

[1] Jordan Abdi、Ahmed Al-Hindawi、Tiffany Ng和Marcela P Vizcaychipi。2018年。关于社交辅助机器人技术在老年护理中应用的范围综述。*BMJ Open* 8, 2 (2018年), e018815。[2] Anna MH Abrams、Lena Plum和Astrid M Rosenthal-von der Pütten。2025年。与机器人组队：与医护人员分析潜力与挑战并界定团队合作。人类行为中的计算机：人工人类 4 (2025年), 100136。[3] Victor Nikhil Antony、Sue Min Cho和Chien-Ming Huang。2023年。与老年人协同设计、为老年人服务：促进身体活动的机器人。见*2023*年*ACM/IEEE*人机交互国际会议论文集。506–515。[4] Felipe Arias-Russi、Yuanchen Bai和Angelique Taylor。2025年。CARIS：面向个性化与可扩展人机交互的情境自适应机器人界面系统。*arXiv*预印本 *arXiv:2509.00660* (2025年)。[5] Soofiyan Atar、Xiao Liang、Calvin Joyce、Florian Richter、Ricardo Wood、Charles Goldberg、Preetham Suresh和Michael Yip。2025年。医院中的人形机器人：面向灵巧医疗操作的人形机器人替代体技术研究。arXiv: 2503 12725 [ ] 2503 12725 . cs.RO 2025 [6] https://arxiv.org/abs/ 。Yuanchen Bai、Zijian Ding和Angelique Taylor。.从虚拟代理到机器人团队：高风险医疗保健情境中的多机器人框架评估。*arXiv*预印本 *arXiv:2506.03546* (2025年)。[7] Richard Bloss。2011年。移动医院机器人满足众多物流需求。工业机器人：国际期刊 38, 6 (2011年), 567–571。[8] Luca Boi。2019年。医疗保健中的七大浪费。https://accelerate.uofuhealth.utah.edu/improvement/the-seven-wastes-in-health-care 访问日期：2024-11-25。[9] Terry Capuano、Joanna Bokovoy、Deborah Halkins和Kim Hitchings。2004年。工作流程分析：消除非增值工作。*JONA*：护理管理杂志 34, 5 (2004年), 246–256。[10] Victoria Clarke和Virginia Braun。2017年。主题分析。积极心理学杂志 12, 3 (2017年), 297–298。[11] Alexandre Colle、Karen Donaldson和Mauro Dragone。2025年。面向护理场所中模块化机器人快速原型制作的协同设计方法。机器人与人工智能前沿 12 (2025年), 1581506。[12] Julia Crilly、Jaimi Greenslade、Cathy Lincoln、Jo Timms和Andrew Fisher。2017年。测量工作环境对急诊科护士的影响：一项横断面试点研究。国际急诊护理 31 (2017年), 9–14。[13] Rachel Deans和Shawna Wade。2011年。在"增值"与感到被重视之间寻求平衡：修订护理模式。医疗保健季刊 14 (2011年), 58–61。[14] Diligent Robotics。2024年。Moxi：具备社交智能的医院机器人。https: // www.diligentrobots.com/moxi。访问日期：2025-01-21。[15] Mingjie Dong、Yu Zhou、Jianfeng Li、Xi Rong、Wenpei Fan、Xiaodong Zhou和Yuan Kong。2021年。并联踝关节康复机器人的最新进展：系统综述。神经工程与康复杂志 18 (2021年), 1–15。[16] Pamela Doty、Korbin Liu和Joshua Wiener。1985年。长期护理概述。医疗保健融资评论 6, 3 (1985年), 69。[17] Priska Flandorfer。2012年。人口老龄化与面向老年人的社交辅助机器人：社会人口学因素对用户接受度的重要性。国际人口研究杂志 2012, 1 (2012年), 829835。[18] Mary Ellen Foster、Patricia Candelaria、Lauren J Dwyer、Summer Hudson、Alan Lindsay、Fareha Nishat、Mykelle Pacquing、Ronald PA Petrick、Andrés Alberto Ramírez-Duque、Jennifer Stinson等。2023年。面向儿科急诊科注意力转移的社交机器人协同设计。见*2023*年配套文集

ACM/IEEE人机交互国际会议。461–465。[19] Helena Anna Frijns、Ralf Vetter、Matthias Hirschmanner、Reinhard Grabler、Laura Vogel和Sabine Theresia Koeszegi。2024年。与养老院居民及护理人员协同设计机器人技术。见第17届辅助环境相关普适技术国际会议论文集。177–186。[20] Christina N Harrington。2020年。被遗忘的边缘：基于社区的参与式健康设计在告诉我们什么？《Interactions》27, 3 (2020年), 24–29。[21] Unlimited Robotics Healthcare。 [无日期]。认识GARY：AI医疗机器人。https://www.hospital-robots.com/。访问日期：2025-01-20。[22] Sonya Healy和Mark Tyrrell。2011年。急诊科中的压力：护士与医生的经历。《急诊护士》19, 4 (2011年)。[23] Damith Herath、Elizabeth Jochum和David St-Onge。2022年。人机交互的艺术：来自设计与艺术的创造性视角。910253页。[24] Hocoma。 [无日期]。Lokomat。https://www.hocoma.com/us/solutions/lokomat/。访问日期：2025-01-20。[25] Manuela Hoedl、Silvia Bauer和Doris Eglseer。2021年。COVID-19大流行期间护理人员工作时长对压力水平的影响：一项横断面在线调查。《HeilberufeScience》12, 3-4 (2021年), 92。[26] Long-Jing Hsu、Philip B Stafford、Weslie Khoo、Manasi Swaminathan、Kyrie Jig Amon、Hiroki Sato、Katherine M Tsui、David J Crandall和Selma Sabanović。2024年。“给它时间：”纵向专家小组支撑老年人的学习与机器人协同设计。见2024年ACM/IEEE人机交互国际会议论文集。283–292。[27] Summer Hudson、Fareha Nishat、Jennifer Stinson、Sasha Litwin、Frauke Zeller、Brittany Wiles、Mary Ellen Foster和Samina Ali。2023年。医疗保健提供者的观点，为儿科急诊科中AI增强型社交机器人的设计提供参考。《Children》10, 9 (2023年), 1511。[28] Lillian Hung、Cindy Liu、Evan Woldum、Andy Au-Yeung、Annette Berndt、Christine Wallsworth、Neil Horne、Mario Gregorio、Jim Mann和Habib Chaudhury。2019年。在护理场所使用社交机器人PARO的益处与障碍：范围综述。《BMC老年医学》19, 1 (2019年), 232。[29] T Ikeuchi、R Sakurai、K Furuta、Y Kasahara、Y Imamura和S Shinkai。2018年。利用社交机器人减轻精神病医院医疗专业人员的工作负荷：一项初步研究。《Innovation in Aging》2, suppl_1 (2018年), 695–696。[30] Intel RealSense。2024年。自主移动机器人。https://www.intelrealsense. com/autonomous-mobile-robotics/。访问日期：2025-01-21。[31] Sandhya Jayaraman、Pratyusha Ghosh、Soyon Kim、Soham Satyadharma、Angelique Taylor、Christopher Coyne和Laurel D Riek。2026年。充满关怀地设计：面向急性癌症护理的机器人。见2026年ACM/IEEE人机交互国际会议论文集。[32] Amy Johnston、Louisa Abraham、Jaimi Greenslade、Ogilvie Thom、Eric Carlstrom、Marianne Wallis和Julia Crilly。2016年。工作人员对急诊科工作环境的感知：文献整合综述。《澳大利亚急诊医学》28, 1 (2016年), 7–26。[33] Malte Jung和Pamela Hinds。2018年。真实环境中的机器人：亟需更稳健的人机交互理论。5页。[34] Jenny Kitzinger。1994年。焦点小组的方法：研究参与者之间互动的重要性。《健康与疾病社会学》16, 1 (1994年), 103–121。[35] Barbara Klein和Inga Schlömer。2018年。机器人淋浴系统：接受与伦理问题。《老年学与老年病学杂志》51, 1 (2018年), 25。[36] Erik W Kuiler和Connie L McNeely。2023年。伦理人工智能的全景敞视监狱意涵：医疗保健中的公平、差异与不平等。见《AI Assurance》。Elsevier, 429–451。[37] Hee Rin Lee、Selma Šabanović和Sonya S Kwak。2017年。协作地图制作：一种理解设计研究中关切事项的反思性方法。见2017年CHI计算系统中的人为因素会议论文集。5678–5689。[38] Yihao Liu、Xu Cao、Tingting Chen、Yankai Jiang、Junjie You、Minghua Wu、Xiaosong Wang、Mengling Feng、Yaochu Jin和Jintai Chen。2025年。医疗保健中具身人工智能综述：技术、应用与机遇。arXiv预印本 arXiv:2501.07468 (2025年)。[39] Yang Liu、Weixing Chen、Yongjie Bai、Xiaodan Liang、Guanbin Li、Wen Gao和Liang Lin。2025年。使网络空间与物理世界对齐：具身人工智能综合综述。《IEEE/ASME机电一体化汇刊》(2025年)。[40] Alex Jiahong Lu、Shruti Sannon、Cameron Moy、Savana Brewer、Jaye Green、Kisha N Jackson、Daivon Reeder、Camaria Wafer、Mark S Ackerman和Tawanna R Dillahunt。2023年。通过摄影发声法进行参与式注意：在设计研究中运用艺术与基于社区的方法。见2023年ACM交互系统设计会议论文集。2489–2508。[41] Luxonis。 [无日期]。为精度而设计的视觉人工智能。https://www.luxonis.com/。访问日期：2025-01-20。[42] Hanfang Lyu、Yuanchen Bai、Xin Liang、Ujaan Das、Chuhan Shi、Leiliang Gong、Yingchi Li、Mingfei Sun、Ming Ge和Xiaojuan Ma。2024年。FARPLS：一种特征增强的机器人轨迹偏好标注系统，用以辅助人工标注者的偏好征询。见第29届智能用户界面国际会议论文集。344–369。[43] Conor McGinn、Eamonn Bourke、Andrew Murtagh、Cian Donovan和Michael F Cullinan。2019年。与Stevie会面：长期护理机构住户和工作人员对社交辅助机器人的看法。载于2019年第14届ACM/IEEE人机交互国际会议（HRI）。IEEE, 602–603。[44] 威尔康奈尔医学院。 [n. d.]。睡眠医学中心——我们的服务 | 患者护理。https://weillcornell.org/services/neurology/center-for-sleep-medicine/our-services。访问日期：2024年10月7日。[45] Bahar Memarian和Tenzin Doleck。2024年。教育中的具身人工智能：关于身体、环境和心智的综述。《教育与信息技术》29，1（2024），895–916。[46] MetaDolce Technologies, Inc. 2025年。SERVI-Elevate居家护理——减少开销！https://www.servicerobotics.ai/bear-robotics/servi-applications-care-homes.html。访问日期：2025-12-03。[47] Sanika Moharana、Alejandro E Panduro、Hee Rin Lee和Laurel D Riek。2019年。带来喜悦的机器人，带来悲伤的机器人：面向痴呆症照护者的社区机器人设计。载于2019年第14届ACM/IEEE人机交互国际会议（HRI）。IEEE，458–467。[48] 英伟达。 [n. d.]。NVIDIA Jetson Xavier。https://www.nvidia.com/en-us/autonomous-machines/embedded-systems/jetson-xavier-series/。访问日期：2025-01-20。[49] Anastasia K Ostrowski、Cynthia Breazeal和Hae Won Park。2021年。长期协同设计指南：赋能老年人成为社交机器人的共同设计者。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，1165–1172。[50] PAL-Robotics。 [n. d.]。TIAGo Base。https://pal-robotics.com/robot/tiago-base/。访问日期：2025-01-20。[51] PAROrobots。 [n. d.]。PARO治疗机器人。http://www.parorobots.com/。访问日期：2025-01-20。[52] Roberta Pinna、Pier Paolo Carrus和Fabiana Marras。2015年。药品物流流程：一项创新实践。《全面质量管理期刊》27，2（2015），214–230。[53] Natasha Randall、Selma Šabanović和Wynnie Chang。2018年。让患有抑郁症的老年人成为居家辅助机器人的共同设计者。载于第12届EAI医疗保健普适计算技术国际会议。304–309。[54] Lily Haopu Ren、Karen Lok Yi Wong、Joey Wong、Sarah Kleiss、Annette Berndt、Jim Mann、Ali Hussein、Grace Hu、Lily Wong、Ruth Khong等。2024年。在医院和长期护理院与机器人共事：工作人员体验。《BMC护理学》23，1（2024），317。[55] Laurel D Riek。2017年。医疗保健机器人技术。《ACM通讯》60，11（2017），68–78。[56] F&P Personal Robotics。 [n. d.]。Lio——为人类护理争取更多时间。https://www.fp- robotics.com/en/lio/。访问日期：2025-01-20。[57] Wendy A Rogers、Travis Kadylak和Megan A Bayles。2022年。最大化参与式设计对老年人人机交互研究的益处。《人为因素》64，3（2022），441–450。[58] ros.org。2025年。ROS——机器人操作系统。https://www.ros.org/。访问日期：2025年8月16日。[59] Selma Šabanović、Wan-Ling Chang、Casey C Bennett、Jennifer A Piatt和David Hakken。2015年。属于我自己的机器人：为被诊断患有抑郁症且独立生活的老年人设计社交辅助机器人。载于《老年人口的信息技术人文因素》。适老化设计：第一届国际会议，ITAP 2015，作为HCI International 2015的一部分于2015年8月2日至7日在美国加利福尼亚州洛杉矶举行。论文集，第一部分1。施普林格，104–114。[60] Leslie P Scheunemann和Douglas B White。2011年。医疗资源配给的伦理与现实。《胸科》140，6（2011），1625–1632。[61] David Silvera-Tawil。2024年。医疗保健机器人技术：综述。《SN计算机科学》5，1（2024），189。[62] Maria Spagnuolo、Giuseppe Todde、Maria Caria、Nicola Furnitto、Giampaolo Schillaci和Sabina Failla。2025年。农业机器人技术：应对可持续作物生产挑战的技术综述。《机器人技术》14，2（2025），9。[63] Marc Steen。2013年。协同设计作为共同探究与想象的过程。《设计议题》29，2（2013），16–28。[64] Tao Sun、Beining Han、Jimmy Wu、Szymon Rusinkiewicz和Yi Shao。2026年。通过模仿学习进行移动机器人钢筋笼组装。《自动化建筑》 181 2026 106671 10 1016 2025 106671 （），。doi：。/j.autcon.[65]。Yuling Sun、Xiaojuan Ma、Silvia Lindtner和Liang He。2023年。一线护理人员的数据工作：数据驱动的长期护理背景下的实践、问题与机遇。《ACM人机交互论文集》7，CSCW1（2023），1–28。[66] Nazish Tahir和Ramviyas Parasuraman。2025年。边缘计算及其在机器人技术中的应用：综述。《传感器与执行器网络期刊》14，4（2025），65。[67] Tauhid Tanjim、Promise Ekpo、Huajie Cao、Jonathan St George、Kevin Ching、Hee Rin Lee和Angelique Taylor。2025年。人机团队协作的现场部署：言语沟通与非言语沟通的比较。载于2025年第34届IEEE机器人与人类交互通信国际会议（RO-MAN）。IEEE

，1699年至1704年。

[68] Angelique Taylor、Hee Rin Lee、Alyssa Kubota 和 Laurel D Riek。2019年。协调临床团队：利用机器人赋能护士叫停生产线。《ACM人机交互论文集》3，CSCW（2019），1–30。[69] Angelique Taylor、Sachiko Matsumoto 和 Laurel D Riek。2020年。将机器人置于急诊科环境中。载于《AAAI医疗保健应用人工智能春季研讨会：安全、社区与环境》。[70] Angelique Taylor、Michele Murakami、Soyon Kim、Ryan Chu 和 Laurel D Riek。2022年。未来医院：为富有韧性的急诊科设计交互式机器人系统。《ACM人机交互论文集》6，CSCW2（2022），1–40。[71] Angelique Taylor、Tauhid Tanjim、Huajie Cao 和 Hee Rin Lee。2024年。迈向支持临床团队协作的协作式急救车机器人。载于《2024年ACM/IEEE人机交互国际会议论文集》。715–724。[72] Angelique M Taylor、Sachiko Matsumoto、Wesley Xiao 和 Laurel D Riek。2021年。急诊科移动机器人的社会导航。载于《2021年IEEE机器人与自动化国际会议》（ICRA）。IEEE，3510–3516。[73] Mike Topping。2002年。Handy 1发展概述：一种帮助重度残障人士的康复机器人。《智能与机器人系统期刊》34（2002），253–263。[74] Alexandra P Townsley、Jenny Li-Wang 和 Rajani Katta。2023年。医护人员的幸福感：积极心理学干预的系统性综述。Cureus 15，1（2023）。[75] Katie Trainum、Jiaying Liu、Elliott Hauser 和 Bo Xie。2024年。辅助生活设施护理人员对护理机器人的态度、需求和偏好：系统性文献综述。载于《2024年ACM/IEEE人机交互国际会议伴随论文集》。1058–1062。[76] Khai N Truong、Gillian R Hayes 和 Gregory D Abowd。2006年。故事板设计：最佳实践与有效指导原则的实证确定。载于《第六届交互系统设计会议论文集》。12–21。[77] Katherine M Tsui、Rune Baggett 和 Carol Chiang。2025年。探索家用辅助机器人的具身形态因素：来自护理接受者和护理人员的观点。《应用科学》15，2（2025），891。[78] Akshith Ullal、Mahrukh Tauseef、Alexandra Watkins、Lisa Juckett、Cathy A Maxwell、Judith Tate、Lorraine Mion 和 Nilanjan Sarkar。2024年。采用迭代式参与式设计方法，为长期护理机构的老年人开发协作式增强现实活动。载于《CHI计算系统中的人为因素会议论文集》。1–21。[79] Theo Vos、Ryan M Barber、Brad Bell、Amelia Bertozzi-Villa、Stan Biryukov、Ian Bolliger、Fiona Charlson、Adrian Davis、Louisa Degenhardt、Daniel Dicker 等。2015年。1990年至2013年188个国家301种急性和慢性疾病及伤害的全球、区域和国家发病率、患病率与伤残生存年数：2013年全球疾病负担研究的系统性分析。《柳叶刀》386，9995（2015），743–800。[80] Aisha Walcott-Bryant、Michael Kaess、Hordur Johannsson 和 John J Leonard。2012年。动态位姿图同步定位与地图构建：低动态环境中的长期环境建图。载于《2012年IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议》。IEEE，1871–1878。[81] Yaoting Wang、Shengqiong Wu、Yuecheng Zhang、Shuicheng Yan、Ziwei Liu、Jiebo Luo 和 Hao Fei。2025年。多模态思维链推理：全面综述。arXiv预印本 arXiv:2503.12605（2025）。[82] Carlo Weidemann、Nils Mandischer、Frederick van Kerkom、Burkhard Corves、Mathias Hüsing、Thomas Kraus 和 Cyryl Garus。2023年。工作领域协作机器人近期趋势与发展前景的文献综述《机器人技术》4，12，3（2023），84。[83] Chenglin Xie、Qianqian Yang、Yao Huang、Steven W Su、Ting Xu 和 Rong Song。2021年。配备基于肌电图的导纳控制器的混合式臂手康复机器人。《IEEE生物医学电路与系统汇刊》15，6（2021），1332–1342。[84] Jing Xu、Qiyu Sun、Qing-Long Han 和 Yang Tang。2025年。当具身人工智能遇上工业5.0：以人为中心的智能制造。《IEEE/CAA自动化学报》12，3（2025），485–501。[85] Hanjing Ye、Guangcheng Chen、Weinan Chen、Li He、Yisheng Guan 和 Hong Zhang。2021年。跟随过程中进行环境建图：利用人员跟踪器在室内动态环境中实现二维激光雷达同步定位与地图构建。载于《2021年IEEE机器人与仿生学国际会议》（ROBIO）。IEEE，826–832。[86] Yiran Zhao、Maria Alinea-Bravo 和 Niti Parikh。2024年。CRAFT@Large：通过共同创作构建社区。arXiv:2410.*23239 [*cs.HC*]*（2024）。https://arxiv.org/abs/ 2410 23239 。[87] Gaoyue Zhou、Hengkai Pan、Yann LeCun 和 Lerrel Pinto。2024年。Dino-WM：基于预训练视觉特征的世界模型实现零样本规划。arXiv预印本 arXiv:2411.04983（2024）。

研讨会活动详情

研讨会前会议。 系列研讨会开始前一周，我们举办了一场研讨会前介绍会议，讨论系列研讨会的目标、参与者对活动的预期贡献，以及研讨会结束时的预期成果。我们首先介绍了研究团队。随后，我们讨论了将先进机器人整合到急诊科、LTR 和 SDC 医疗机构中的目标，以处理重复性任务，并支持医护人员更加聚焦于患者护理。然后，我们总结了预期的工作坊活动。预期的工作坊成果是为上述三个医疗机构打造具有独特形态的机器人原型。

研讨会介绍。 在以往工作的基础上 [49]，我们采用了共同设计流程，将促进社区建设的活动、针对特定环境挑战的反思、机器人构思，以及动手设备培训相结合，为参与者之后进行机器人原型制作和学习人机交互相关内容做好准备。首先，我们请参与者填写知情同意书和"研讨会前调查问卷"，以收集参与者的人口统计信息；在为期三个月的研讨会期间，我们还会对新加入的参与者重复发放这些表格。接下来，我们开展了一项名为"对你来说，什么是机器人？"的破冰活动，请参与者画出他们想象中的机器人。随后，我们进行了反思讨论，参与者分享自己的画作，并思考他们认为机器人是什么、机器人如何行动以及如何与人互动。

利益相关者小组讨论、培训与机器人演示。 研讨会以利益相关者小组讨论开场，他们引导我们绘制同理心地图，以了解利益相关者面临的问题和需求，并构思机器人可以提供帮助的潜力。急诊科、SDC和长期居住照护机构各有一名工作人员参加小组讨论。急诊科小组成员是一名医生，拥有10至15年工作经验；长期居住照护机构小组成员是一名认证治疗性娱乐专员，拥有20年以上工作经验，同时也是一名认证失智症从业者；SDC小组成员是一名睡眠医学医生，拥有20年以上工作经验。小组讨论中的一些问题包括："您的角色是什么？请介绍一下您平均一天的工作情况。""您工作中是否有些任务不需要熟练的工作人员完成，或会让您无法陪伴患者？""这些任务会带来哪些挑战，可能对您的工作产生负面影响？""机器人应该与谁互动？"随后，参与者接受了安全培训并观看机器人演示。安全培训包括介绍MakeLab设备（例如3D打印机、激光设备）和安全规程。在安全培训结束后，我们在接下来的课程中介绍了TIAGo移动底座机器人平台，让参与者亲身了解机器人的能力及其实际尺寸。本环节最后，我们向参与者介绍了TIAGo机器人底座平台，并探讨了可以开发哪些物理扩展组件来增强其功能性。这让参与者更清楚地了解机器人如何在该空间中进行互动，以及如何调整其设计以满足特定需求。我们介绍了机器人的传感、感知、导航和交互能力（见第3.2节）。我们使用团队开发的基于网页的遥操作应用程序 [4], 演示机器人，让它在周围移动，并使用文本转语音软件使机器人能够与参与者交谈；同时，我们还使用大语言模型演示机器人与参与者之间的问答场景（即："TIAGo，你在这个环境中看到了什么？"）。

激光切割与人机交互简介。第二场研讨会以回顾第一场活动的记录摘要开场，这些记录总结了

第一场活动的内容，随后开展了激光切割活动和医疗场所模型活动。参与者加入研讨会后，参加了激光切割"姓名牌"练习：在一块3英寸×1英寸的金属片上刻上自己的姓名和角色（即利益相关者、创客、程序员）。通过这项活动，参与者制作了个性化的可佩戴姓名牌，并在整个研讨会期间佩戴。我们培训参与者使用 Adobe Illustrator 软件进行矢量图设计，并使用 Epilog激光切割机进行激光切割。为了让参与者了解机器人的入门知识，我们邀请了大学里一位专攻人机交互和医疗机器人设计的教授。教授介绍了人机交互的基本概念和背景信息，包括机器人设计对于有效融入医疗环境的重要性，以及机器人在医疗保健领域的当前应用场景。

玩偶屋活动。 根据利益相关者小组提供的见解，记录每位小组成员对各医疗场所所提出问题的看法至关重要。为此，我们设计了"玩偶屋活动"。首先，我们收集了各组织的平面图，并将其导入三维建模软件 SketchUp 中进行描摹，以创建 1:1 比例的 CAD模型。确保每张平面图都采用相同的网格比例十分重要，这样才能制作出可供比较的 3D打印部件。活动当天，参与者被分为三组，每组对应一种医疗设施类型。一位利益相关者被分配到相应的三维设施模型，并拿到一张覆有透明薄膜的打印版平面图和两支彩色记号笔。一种颜色用于标示患者移动路径，另一种颜色则用于标示同一空间内医疗护理人员的移动路径。参与者还拿到了 3D打印家具部件，可用它们在二维平面图上构建场景，让空间的实际使用者展示自己的移动路径，并实时向其他参与者提出机器人导航的潜在路线。

通过故事板进行共同创作。 为了进一步帮助大家形象地了解机器人如何在现实场景中与利益相关者互动，我们开展了故事板练习。这项活动旨在让参与者为每个空间选择一个场景，并创作故事板，描绘机器人与人类互动的情景。我们鼓励参与者着重展示互动类型以及互动发生的环境。每个小组都分配到一块白板，并负责通过想象各种场景，在 6–9 个方格中描绘机器人可能的使用方式。完成故事板后，各组相互分享构想，将其作为设计初稿，并借此反思和协商重要的设计特征。这一协作环节帮助参与者完善构想，并从多学科视角更好地理解各种交互可能性。

包容性纸面原型制作活动。 为进一步弥合设计与实施之间的差距，我们为每个小组提供了激光切割的 TIAGO 机器人底座迷你模型。接受培训后，参与者使用现有材料和工具，快速制作出可安装在底座上的机器人具身形态缩小模型，材料包括纸张、吸管、胶水、织物等（见图4）。这项动手制作练习将为下一步机器人具身形态的原型制作奠定基础，并引导大家讨论尺度、互动以及在空间中的移动。我们鼓励工作坊参与者思考机器人纸面原型，并开展小组讨论。此外，我们邀请了专业工匠进行闪电演讲，分享宝贵见解和必备的原型制作技能，帮助参与者有效地制作原型。在此基础上， [47], 参与者思考了机器人在互动中的角色、能力、外形尺寸、参与的活动，以及适当的交互方式，从而促进机器人与人之间的有效沟通。

全尺寸原型制作活动。 在前期纸板原型制作阶段及相关准备工作的基础上——包括激光切割培训、专家主讲的教育课程和技术咨询——参与者开始制作自己构想的机器人全尺寸原型。研究人员、创客专家和领域专家为每个团队提供支持，并在整个过程中给予指导。尽管原型数量不受限制，但由于时间有限，三个小组都专注于制作一个高保真原型。原型制作活动延续至预定研讨会时间之外，参与者还返回实验室，额外投入制作时间，为最终公开展示做准备。这些原型体现了早期的设计构想，同时融入了详细的功能特征，包括可移动抽屉、可调节的结构组件，以及依据特定任务角色设计的交互机制。参与者通过面对面讨论、后续电子邮件和非正式评审，阐述了他们设想的使用情境和交互逻辑，并为设计决策提供了充分的依据。

反思访谈。 反思访谈旨在了解参与者对利益相关者小组会议、多学科协作体验以及研讨会整体组织方式的看法。研讨会结束 4 周后，我们根据参与者的时间安排和意愿开展了一对一正式访谈，以确保访谈过程尊重参与者且令其感到舒适。在两场研讨会的参与者中，我们询问了他们是否有空在原型制作期间接受约 20 分钟的访谈。忙于原型制作的参与者不会受到任何参与压力。此外，我们优先尊重参与者的意愿，以确保他们有良好的体验。例如，一位参与者（P20）婉拒了访谈，但推荐了另一位可能能提供更多见解的参与者（P19）。最终，我们开展了 11 场访谈，并邀请参与者到安静的角落，以便进行聚焦的讨论。我们准备了引导性问题，同时鼓励参与者在这些问题之外开放式分享，以获取更丰富的见解。引导性问题包括："研讨会中哪些环节令你感兴趣或觉得有收获，哪些环节需要改进？""你对提高研讨会灵活性有什么建议？"以及"你如何看待角色转换这一概念？也就是说，参与者可能承担并贡献于不同的角色。"

教育课程——"让我们进一步谈谈机器人技术"。本次教育课程向参与者介绍了机器人技术的基础知识，尤其是医疗保健情境中的相关知识。我们首先追溯了"机器人"一词的历史起源，并展示了重要的发展成果，例如首批人形设计，以及具备环境推理能力的机器人的出现。接下来，我们探讨了多种医疗保健机器人应用，从

手术辅助和住院/门诊支持（例如运送毯子、对空间进行消毒），到长期护理机构中的康复。这些实例为讨论医疗保健机器人在现实世界中的可用性、安全性、可及性和实施挑战奠定了基础。随后，我们介绍了使用 ROS2 [58] 进行机器人编程的基础知识。最后，我们强调了在机器人系统设计中考虑人类偏好的重要性，并以机器人手臂轨迹为具体案例，说明不同个体的偏好可能各不相同。

教育课程——"控制与操作系统"。我们向参与者介绍了机器人控制与操作。首先，我们演示了多种机器人导航方式：例如，可以通过操纵杆或键盘手动操作（如将特定指令分配给界面按钮），也可以对其进行编程，使其能够对人或障碍物等环境刺激自动作出响应。我们还介绍了绘制环境地图和设置目标位置的概念。这些示例帮助参与者思考机器人如何感知空间并在其中导航。为进一步引导大家思考机器人自主性与控制，我们通过一系列引导性问题启发他们的设计思路，例如："你的机器人将如何移动？""周围环境是什么样的？""是否需要传感器？""机器人会在多大程度上依赖传感器？""机器人需要哪些数据才能按预期运行？"课程最后，我们演示了机器人界面，其中包含条码扫描和语言选择功能。为向参与者展示潜在的应用场景，我们设计了一系列情境，说明如何通过设计人机交互来满足医疗环境中的不同需求。例如，在急诊科，用户可以验证身份、查询等待时间并请求紧急援助。对于 SDC，界面提供教育视频、就诊概览和常见问题。对于 LTR，用户可以请求餐食或医疗帮助等个性化服务，并访问娱乐内容。这些示例帮助参与者思考界面设计如何支持更易用、高效且具备情境感知能力的机器人系统交互。

最终公开展示。在为期14周的工作坊结束时，我们在由大学主办的公众活动上展示了共同构思的历程。活动以新兴技术如何塑造社会影响为主题，学生、研究人员、教育工作者、企业家和工业界专业人士参加了活动。我们通过可视化时间线和讲故事的方式，呈现了重要里程碑、设计转向和协作时刻。全尺寸原型与大幅海报一同展出，海报详细介绍了设计理念、组件功能和预期使用情境。为帮助参观者了解设想中的护理场景和用户互动，我们准备了一个交互式界面，用于模拟机器人实时控制，并配有预录视频，展示如何通过该界面触发特定任务。

B 制品详情

B.1 故事板结果

我们的研讨会参与者创作并反思了故事板，这些故事板描绘了他们如何设想机器人与工作人员、工作人员和患者互动，以在SDC、急诊科和LTR中参与辅助活动，如图4所示。

急诊科。针对急诊科情景，参与者根据一位成员作为患者割伤手指的经历来构建故事。医护人员代表澄清，该情景假设患者是步行进入，而非由救护车送达。故事板跟随患者从登记、治疗到出院的历程。他们提出六种不同类型的机器人，以在上述医疗保健流程中全程提供协助：

在登记台，**登记机器人** 会引导患者完成登记流程，并协助他们选择语言。它确保所有收集到的信息都能安全地传送给医护人员，以便他们分析数据并及时为治疗做好准备。这简化了行政工作，并提高了登记效率。

在候诊区，**候诊室机器人** 凭借友好的外观和使用患者所选语言交流的能力与患者互动。它会核实患者身份，告知预计等待时间，报告实验室检查状态，并监测患者健康状况。遇到紧急情况时，它会提醒医护人员，为患者增添一层安全保障与安心感，让候诊体验更加信息充分。

在大型医疗机构内导航可能会令人疲惫，而**引导机器人** 通过引领患者前往不同区域来解决这一问题。它设计紧凑，能够在拥挤的走廊中高效通行，减少拥堵，并确保患者及时抵达目的地。

为支持医护人员，**物资配送机器人**会将必需的医疗用品送到所需地点。例如，当一名医生请求一套伤口处理包时，机器人会确保物资迅速、准确地送达，减轻工作人员的工作负担并维持运营效率。

在护理流程结束时，**出院机器人** 在确保患者做好离开医疗机构的准备方面发挥着关键作用。它会收集必要的出院信息（例如询问："我可以拍一张您的伤口照片留档吗？"），提供后续护理说明（例如："您的缝线需要在*10*天后拆除"），并提供协助（例如安排车辆，或在需要时提供茶点）。因此，它能让患者出院的过程更加顺畅，也更有支持。

最后，**舒适服务机器人** 通过向医护人员和护理接受者提供零食和饮料，改善候诊区和出院区的护理环境。它为所有人营造更愉悦、更体贴的氛围。这些机器人解决方案不仅满足特定的功能需求，也有助于为护理接受者和医护人员创造更具支持性的环境。

长期康复机构。在 LTR 场景中，参与者围绕一名住户的典型一天展开叙事：该住户希望"在日间活动室（设施内的一个房间）进行社交活动或喝杯咖啡"。他们突出了机器人的四项主要能力。当住户呼叫机器人时，它首先进行**身份识别** 并自动为其登录，确保安全、顺畅地访问系统。登录后，机器人**获取日程**，让住户了解即将开展的活动。除了日程管理之外，机器人还**提供娱乐**。住户可以请求游戏，例如拼图，以帮助他们以愉悦的方式参与其中。此外，机器人还**追踪并记录用于治疗的互动数据**，并在一天结束时将这些数据分享给艺术治疗师。这些

数据能够反映住户的参与程度，并为个性化护理策略或治疗活动提供参考。通过自动化这一流程，机器人使工作人员免于手工记录，并能够就护理工作做出更加及时且有依据的决策。在一天当中，机器人以友好且体贴的方式与住户互动。如果多名住户想要请求相同的信息，他们可以轮流等待与机器人互动。这一机器人解决方案解放了医护人员的时间，并通过让住户在设施内保持参与和社会联系，帮助提升他们的整体幸福感。

睡眠障碍诊所。 对于 SDC，参与者设想了患者在整个睡眠治疗过程中的就诊旅程，并提出九项不同的任务，机器人可在医疗工作流程中提供协助：旅程始于**礼宾机器人**，它热情地迎接患者并核验其身份，确保办理入住手续顺畅无碍。随后，**导览机器人**带领患者参观诊所的公共区域，让他们舒适地熟悉这里的环境。安顿下来后，机器人会提供**总体介绍**，包括睡眠治疗流程的基本信息，帮助患者了解住院期间的预期安排。它还可以提供**个性化教育**，根据每位患者的病情或具体需求提供定制的教育内容，增进他们对睡眠治疗的了解。夜间留宿期间，**午夜问卷机器人** 会发放问卷，以收集患者反馈或所需数据。这确保了能够收集必要信息，同时不会增加夜间医护人员的工作负担。幕后，**技术员支持机器人** 通过管理库存并将必要物资送至控制室，为技师提供协助，从而优化技师的工作流程。**任务提醒机器人** 还会向技师发送预定任务提醒，帮助他们在一天中按计划完成工作。此外，**数据管理机器人** 会从相关来源识别并收集缺失数据，确保患者记录完整且及时更新。最后，患者结束就诊旅程、准备离开时，**离场辅助机器人**会引导他们前往出口，同时收集他们对整体体验的反馈，为诊所改进提供宝贵见解。这些机器人解决方案优化了睡眠治疗流程的各个环节，减轻了医护人员的工作负担；与人工处理这些任务相比，也提高了效率。

B.1.1 纸板原型。 在故事板设计的基础上，参与者制作了纸板原型，反复迭代并完善自己的想法，并在各自小组内开展自由协作。为促进原型制作过程，我们提供了若干供考虑的属性：机器人名称、机器人角色、特征与活动，以及交互方式。LTR、急诊科和SDC团队分别制作了2个、3个和2个原型。这些属性的详细信息列于图4中。

B.1.2 全尺寸原型。 在这些中保真设计的基础上，每个团队随后进一步为每种场景制作一个全尺寸原型。这些属性的详细信息列于图4中。