理解辅助机器人手臂的共享控制

Kirill Kronhardt
kirill.kronhardt@.w-hs.de 威斯特法伦应用科学大学，德国盖尔森基兴

Max Pascher
max.pascher@w-hs.de 威斯特法伦应用科学大学，德国盖尔森基兴 杜伊斯堡-埃森大学，德国埃森

Jens Gerken
jens.gerken@w-hs.de 威斯特法伦应用科学大学，德国盖尔森基兴

arXiv:2303.01993v1 [cs.HC] 3 Mar 2023

摘要

对于运动障碍者而言，无需依赖人类护理人员或全自主机器人，过上自主决定的生活，是维护人的尊严和自我价值的关键因素。辅助机器人解决方案，尤其是机械臂，经常用于居家护理，帮助运动障碍者独立完成日常生活活动（ADL）。然而，尽管辅助机器人手臂能够帮助他们完成日常生活活动，目前可用的控制方式却非常复杂且耗时，因为用户需要同时控制多个自由度（DoF），还必须进行必要的模式切换。本文概述了旨在提升运动障碍者使用便利性的辅助机器人手臂共享控制方法，并总结出未来研究的三个主要启示：少即是多、拾取与放置至关重要，以及意图传达。

CCS 概念

• **计算机系统组织** → **机器人控制**；机器人自主性；• **以人为中心的计算**；以用户为中心的设计。

关键词

辅助机器人技术，人机交互，共享控制

ACM参考文献格式：

Kirill Kronhardt、MaxPascher 和 Jens Gerken。2023。理解辅助机器人手臂的共享控制。在 *VAT-HRI '23*：*ACM/IEEE* 人机交互国际会议上的人机团队协作可变自主性研讨会，*2023*年*3*月*13*日，斯德哥尔摩，*SE*。ACM，纽约，NY，美国，6 页。https://doi.org/10.1145/nnnnnnn.nnnnnnn

1 引言

运动障碍者通常需要护理人员帮助他们完成日常生活活动，例如进食或饮水 [26]。这种几乎持续不断的照护需求，使他们渴望获得更多自主性 [29]。借助辅助机器人，可以通过多种方式提升运动障碍者的自主性。研究中常见的一种方法是使用自主辅助机器人 [23]。在这些自主系统中，机器人会自动执行日常生活活动，而用户只需提供高层级输入或进行交互，例如发出命令，让机器人停止移动以避免碰撞。然而，这类自主系统可能会导致用户承受的压力高于使用手动控制方法时的压力。在一项比较机械臂手动控制与自主行为的研究中，Pollak等人 [34] 发现，手动模式下的压力症状显著减轻。Kim等人 [20]开展的一项类似对比研究发现，尽管自主机器人减少了执行日常生活活动所需的精力，但自主控制与手动控制在满意度方面并无显著差异。此外，Kim等人 [20] 指出，运动障碍者会将自主机器人视为另一个可依赖的外部代理，但这并不会让他们感受到更高程度的自主性。这些发现与Złotowski等人 [46], 针对自主机器人的一般性研究结果一致：参与者通常对自主机器人的感受比对非自主机器人的感受更消极。

研究表明，完全自主的机器人无法缓解运动障碍人士所面临的自主性缺失问题，而完全手动控制也存在不少缺点。对于辅助机器人手臂而言，这些缺点尤为明显，因为它们通常拥有六个或更多自由度。相比之下，运动障碍人士能够使用的手动控制输入设备（例如二维操纵杆）所提供的自由度要少得多 [24, 35]。这种差异使得人们必须将机械臂的运动自由度（即输出自由度）映射到输入设备的输入自由度上，并通过模式切换来改变当前映射。这些模式切换带来了不尽如人意的使用体验：用户需要进行过多输入，并花费过多时间才能完成日常生活活动，因此这类控制方式对运动障碍人士并不实用 [10, 17, 40]。此外，用户还需要高度集中注意力，因为很难记住机器人当前所处的模式，而且几乎没有提供当前模式的可视化提示 [17]。尤其是，用户认为这种基于模式切换的控制方式既繁琐又耗时。在 Herlant等人 [17], 开展的访谈中，三位 Kinova Jaco 辅助机器人手臂的日常用户表示，由于模式切换过于频繁，他们放弃了进食等基本任务，转而依赖护理人员。Herlant等人 [17] 还发现，使用模式切换控制机械臂时，任务执行时间中约有18%花在切换模式上，而非执行动作。这些发现与Eftring和Boschian[10], 对Manus辅助机器人手臂开展的用户试验结果一致：用户普遍认为其控制方式“太慢”，而且“需要太多指令”。因此，研究应着重提升辅助机器人手臂的可用性和控制便捷性。

为了解决手动控制难度较高与和完全自主的机器人协作时缺乏自主性这一困境，人们提出了共享控制方法连续谱上的不同方案

VAT-HRI '23，*2023*年*3*月*13*日，瑞典斯德哥尔摩2023。
ACM ISBN 978-x-xxxx-xxxx-x/YY/MM...$
15.00https://doi.org/10.1145/nnnnnnn.nnnnnnn

[12, 16, 17, 19, 22, 36, 。41]

共享控制的概念在设计人与机器人之间的通信和控制方面具有巨大潜力 [1]。然而，对于辅助机器人手臂而言，共享控制还应为用户带来有意义的交互体验和掌控感。与手动控制相比，辅助机器人手臂的共享控制系统可以在提升易用性的同时，让用户感受到独立性。本文概述了近期进展，并介绍了实现辅助机器人手臂共享控制机制的不同方法。

2 辅助机器人手臂的共享控制

共享控制系统的自主性各不相同 [11]。这一范围涵盖了高度依赖手动控制、仅对用户输入的结果进行少量调整的系统，也包括用户主要发出高层级输入指令、由机器人执行的系统。Tsui等人开发了此类系统的一个实例 [41], : 用户只需指定要拾取的物体，机械臂便会自主执行抓取运动。

正如我们所强调的，对于辅助机器人手臂而言，与更加依赖机器人自主性的系统相比，共享控制系统应让用户感到更加独立。因此，辅助机器人手臂所采用的共享控制系统应更加注重用户自主性。对于任何足够灵活、能够支持多种不同任务的机械臂而言，抓取与放置操作是一种基础且具有普遍适用性的使用场景。在对非残障人士 11 小时的生活日志视频数据进行分析后，Petrich等人 [33] 发现，在厨房活动中，拾取和放置物体的行为非常频繁（每小时分别发生 88 次和 84 次）。尽管这仅代表日常生活活动的一部分，但由此可以推断，抓取与放置动作是日常生活活动的重要组成部分。因此，许多研究人员致力于探索各种方法，使运动障碍人士能够借助机器人完成抓取与放置任务 [13, 20, 38, 43]。对于辅助机器人手臂，将抓取与放置操作实现为共享控制，旨在让用户继续掌控这一基础交互，同时利用机器人作出的决策或建议来提升系统的可用性。实现这种以用户为中心的共享控制有多种方式。

辅助机器人手臂最简单的共享控制类型之一是时间最优模式切换 [17]。时间最优模式切换使用与手动控制相同的主自由度，但将用户发起的模式切换替换为自动切换。Herlant等人开展了一项用户研究，比较了这种共享控制方式——使用二维仿真移动机器人和Dijkstra算法来预测机器人应在何时切换模式—— [17] 结果表明，用户更偏好时间最优模式切换，而不是手动控制。另一种共享控制方法是融合用户输入与自主系统的决策，例如，手动控制电动轮椅，同时由系统帮助用户避开障碍物 [12]。原则上，用户沿主自由度手动控制机器人，但机器人会进行干预以防止事故发生。类似的方法也可能适用于辅助机器人手臂。为了仅使用少量输入自由度执行更复杂的动作，Quere等人 [36] 提出了*SharedControlTemplates*，一种系统

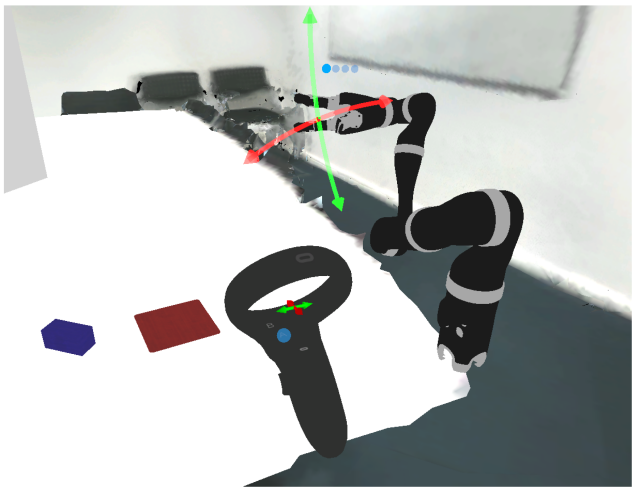

图1：自适应自由度映射控制 [22]

该系统"将特定任务技能定义为有限状态机，其中每个阶段都规定了与任务相关的（原文如此）输入映射和主动约束"。例如，从瓶子中倒水时，机器人的运动会受到约束，使瓶口始终位于盛水容器的上方，但瓶子的旋转由用户输入控制。在共享控制谱系中更趋向自主的一端，Jain等人 [19] 提出了一种采用身体-机器接口的控制方法。借助这一身体-机器接口，用户控制自主系统规划的轨迹段的执行速度，并在适当时在这些规划好的轨迹段之间进行切换 [19]。因此，只需两个输入自由度即可执行复杂任务，同时用户仍然保持控制权——一个用于控制移动速度，另一个用于切换轨迹段。

一种截然不同的方法是Goldau和Frese提出的共享控制系统 [16]，其名称为自适应自由度映射控制（*ADMC*）。该概念根据当前情境组合机械臂的主自由度，并将其映射到低自由度输入设备上。具体做法是在机械臂的夹持器上安装摄像头，并让没有运动障碍的人执行日常生活活动，以此训练卷积神经网络（CNN） [16] ——这与自主机器人的示范学习方法类似 [4]。理论上，CNN可以根据情境的摄像头画面，返回一组按可能有用程度排序的自由度映射。与先前的工作相比，这一概念的主要优势在于，用户不受限于主自由度或预先规划的动作，而是可以获得适用于特定情境的一组可能动作。此外，基于CNN的方法理论上易于扩展，因为同一系统可以经过训练以区分许多不同情境，因此有望用于日常生活。Goldau和Frese [16] 开展了一项小规模概念验证研究，邀请23名参与者比较通过手动控制或ADMC控制模拟二维机器人的效果。结果表明，使用ADMC时任务执行速度更快，但用户感觉操作更复杂 [16]。

为了评估Goldau和Frese [16]的研究成果在现实3D场景中的适用性，我们此前在虚拟现实（VR） [22]中开展了一项无监督远程实验。我们将Goldau和Frese [16] 提出的理念应用于*Kinova Jaco*的虚拟模型（参见图1），并通过启发式方法生成提供给用户的自由度映射，以模拟CNN的输出 [22]。结果显示，使用ADMC时，模式切换的平均次数显著减少；但将Goldau和Frese [16]的研究成果直接迁移到3D环境后，任务完成时间和感知工作负荷均未降低 [22]。此外，通过对参与者报告进行主题分析，我们发现了若干问题。参与者认为，系统对即将提供的自由度映射以及机器人接下来的动作缺乏可预测性。另一个问题是，理解系统建议的自由度映射（DoF）需要较高的认知负荷。与手动控制相比，参与者普遍对不断变化的自由度映射感到困惑；在手动控制中，“最好凭直觉记住每项功能的位置”。我们认为，这些缺点源于系统的新颖性及其目前的复杂程度。尽管ADMC仍是辅助机器人手臂领域一个颇具前景的共享控制概念，模式切换次数的减少也证明了这一点，但仍需调整其设计，通过降低系统的整体复杂性来解决这些问题。

3 机器人运动意图

此前关于辅助机器人共享控制的大量研究，聚焦于自主系统与操控它的人类之间的具体交互——也就是说，何时由自主系统控制运动，何时由用户控制。然而，为了提高共享控制系统的可预测性，进而提升用户接受度，有必要传达自主系统所提供的预期辅助 [2]。有关机器人计划和活动的信息有助于用户更好地理解并预判机器人的行为 [39]。用户通常更倾向于通过视觉方式呈现机器人的未来运动 [7]。针对如何传达机器人运动意图这一问题，已有大量研究采用不同类型的可视化和模态进行探讨 [30]。

一种无需额外硬件即可传达机器人运动意图的方法，是将机器人拟人化。例如，Dragan 和 Srinivasa [9] 提出，辅助机器人可以通过选择一条轨迹来传达其运动意图；这条轨迹在距离或执行时间方面可能并非最优路径（见 图 2），但能让用户理解机器人的意图。类似地，Gielniak 和 Thomaz [15] 设计了拟人化的机器人手势，以引发旁观者的预期。如果机器人已经具备某种形式的“眼睛”，无论是硬件的一部分，还是桌面上的虚拟呈现，都可以利用机器人注视来传达运动意图 [27]。

机器人意图也可以通过不同的感官通道传达，例如音频或触觉，不过目前的解决方案并未明确传达运动方向。Frederiksen 和 Stoey[14] 使用情感音频信号，隐含地传达软体机器人手臂向用户移动的意图。Che 等人 [6] 使用可穿戴触觉设备，向用户传达机器人运动意图，以避免碰撞。

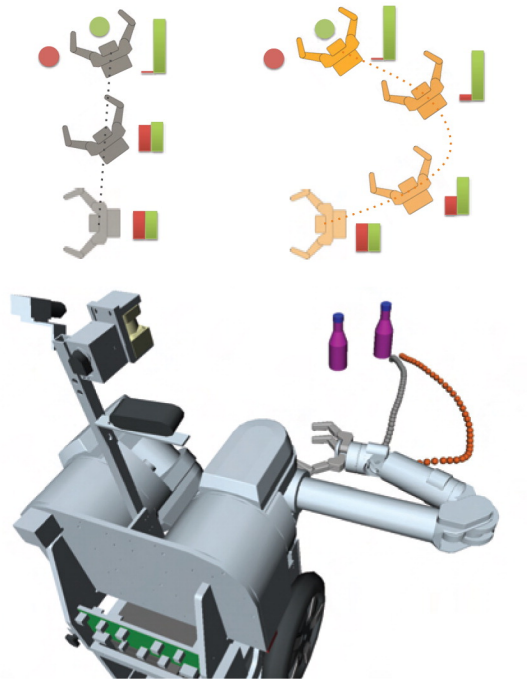

图 2：可读轨迹示例：左上：针对距离优化的轨迹，右上：针对可理解性优化的轨迹，底部：情境中的轨迹 [9]

为了传达详细的机器人运动意图，研究人员通常会借助增强现实（AR） [5, 18, 37, 42, 45], , 因为“借助 AR，交互可以变得更加直观、自然” [25]。Milgram 和 Kishino [28] 将 AR 定义为“通过虚拟（计算机图形）物体增强原本真实环境显示的所有情形”。增强现实环境有几种不同的方法，例如空间增强现实（SAR）、移动增强现实和可穿戴增强现实[25]。SAR 通过投影直接增强环境，在表面上提供信息，例如机器人前方的地面。虽然附近的任何人都能看到 SAR 可视化，但 SAR 的应用场景仅限于二维表面，且光线必须足够暗，以免干扰投影。移动增强现实使用智能手机或平板电脑等设备，以物体能在三维空间中准确定位的方式增强设备的摄像头画面。不过，由于缺少立体视觉信息，深度感知较为困难。相比之下，可穿戴增强现实能够扩展用户的视野：既可以显示头戴式显示器（HMD）外向摄像头的透视画面，也可以使用配有透明屏幕的 HMD。由于这类 HMD 能提供立体图像，虚拟物体可以定位在环境中的特定三维位置，并以正确的深度被感知。

3.1 用户注意力引导的反馈模态

设计共享控制系统时，可能有必要引导用户将注意力集中在机器人预期提供的辅助上。

如果任何一方（用户或机器人）以可能导致碰撞或使情况结果恶化的方式操控机器人，就尤其有必要进行这种引导。

据我们所知，针对辅助机器人及其信号的反应时间，尚未对不同感知模态进行比较研究。然而，在一种类似情境——自动驾驶——中，已有大量比较研究。在自动驾驶时，如果车辆在系统中识别出一种它未经过编程或训练来应对的情境，就会发出所谓的接管请求（TOR）。该 TOR 会提示车辆驾驶员手动接管车辆控制，以避免碰撞，或驾驶车辆进入其自主性无法应对的区域。

多项仿真研究探讨了如何有效传达 TOR，以及应采用哪些模态。一般而言，研究 TOR 时采用的方式，要么是使用单一感知模态（单模态），要么是同时使用多种感知模态（多模态）来传达 TOR。TOR 通常采用的模态包括视觉、听觉和触觉。实现这些模态所需的输出设备，例如屏幕、扬声器或振动马达，通常已包含在许多输入设备或辅助系统中，因此开发者可以轻松使用。

关于单模态 TOR，Petermeijer 等人 [32] 开展了一项模拟研究，招募了 101 名参与者，比较了视觉、听觉和触觉 TOR 模态在视觉、听觉及双模态（视觉-听觉）干扰下的表现。研究发现，无论 TOR 模态如何，干扰模态都不会影响反应时间。然而，TOR 模态对反应时间有显著影响。与视觉 TOR 相比，触觉和听觉 TOR 带来的反应时间显著更短，自我报告的有用性评分也更高，这表明单独使用这些模态更适合引导用户注意力。

Petermeijer 等人 [31]还开展了一项有 24 名参与者参与的研究，探究 TOR 的呈现方向是否会影响参与者避开碰撞的方式。研究比较了从左侧、右侧或两侧传达的听觉、触觉及听觉-触觉（双模态）TOR，发现 TOR 的方向性不会影响参与者避开碰撞的方式。然而，研究发现，双模态方式的反应时间比触觉方式更短，自我报告的有用性评分也更高 [31]。

这项结果表明，使用多种模态传达 TOR 能改善反应时间；Yun 和 Yang 的研究进一步支持了这一发现 [44], 。他们探索了七种不同的 TOR 传达模态组合：视觉、听觉、触觉、视觉-听觉、听觉-触觉、视觉-触觉，以及视觉-听觉-触觉。他们对 41 名参与者进行模拟研究，结果显示，单模态视觉 TOR 的反应时间显著长于其他方法，而视觉-听觉-触觉和视觉-触觉 TOR 的反应时间最短 [44]。

这些仿真研究的结果，以及关于人们对不同感官刺激的反应时间的一般研究 [3, 8, 21],表明，在共享控制系统中使用多模态反馈应能使反应时间尽可能缩短。这些信息对于引导用户注意预期的辅助至关重要并可能整体提升共享控制方法的有效性。

4 讨论与结论

本文概述了开发辅助机器人手臂共享控制系统的动机。人机交互（HRI）的主流目标是提高机器人的自主性，并在人的技能仍占优势时依靠共享控制。与此不同，辅助机器人手臂的主要目标是提升人们生活中的自我决定能力和身体自主性。研究表明，机器人自主性过高可能适得其反。然而，要实现有效的共享控制系统，机器人在操作过程中提供的辅助必须让用户看得明白且可以预测。研究表明，解决抓取与放置操作这一基本任务，是实现共享控制的一个良好起点，因为这类操作十分常见；最终目标是减轻用户手动控制机械臂各自由度复杂性的负担。

通过相关工作和我们自己的研究，我们确定了在机械臂场景中设计共享控制系统时需要考虑的三个主要方面：

- 少即是多：虽然目标是让用户保持控制权，但机器人交互的复杂性，以及可用输入设备在自由度方面的限制，都很容易让系统变得难以使用。因此，为了找到共享控制的最佳平衡点，我们建议一开始采用精简的用户交互方式，再根据需要和个人能力逐步增加交互。用户不应因交互选项过多或动作过于复杂而感到困惑。尽管实现目标的最佳方式可能需要机器人进行复杂干预，但用户可能难以理解这些干预，因而也难以信任它们。此外，应尽量降低输入设备的自由度，这样能够让更多辅助设备具备控制机器人的能力。

- 拾取与放置至关重要：我们以往的研究和相关工作表明，抓取与放置任务十分普遍，也是完成日常生活活动所必需的。因此，在研究更复杂的任务序列之前，首先为这些简单任务实现共享控制十分重要。如果用户难以理解用于抓取与放置任务的共享控制，我们认为，更复杂的任务很可能会进一步加剧他们的挫败感。

- 意图传达：尽管机器人系统可能会以用户的利益为重，但用户仍需建立信任，这要求系统具备用户能够理解的一定程度的透明度和可理解性。用户还应能够干预机器人负责的那部分控制，以防机器人犯错或提出不恰当的交互建议。意图传达还要求用户集中注意力，或引导用户的注意力；根据具体情境和用户的能力，这可能需要多模态刺激。

参考文献

[1] David A. Abbink、Tom Carlson、Mark Mulder、Joost C. F. de Winter、Farzad Aminravan、Tricia L. Gibo 和 Erwin R. Boer。2018年。共享控制系统拓扑——在多样性中寻找共同点。《IEEE人机系统汇刊》48，5（2018年10月），509–525。https://doi.org/10.1109/thms。2018.2791570[2] Connor Brooks 和 Daniel Szafir。2020年。用于提升共享控制接受度的预期辅助可视化。载于《2020年IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议》（IROS）。11425–11430。https://doi.org/10.1109/IROS45743.2020.9340964[3] Jennifer L Burke、Matthew S Prewett、Ashley A Gray、Liuquin Yang、Frederick RB Stilson、Michael D Coovert、Linda R Elliot 和 Elizabeth Redden。2006年。比较视觉-听觉反馈与视觉-触觉反馈对用户表现的影响：一项荟萃分析。载于《第8届国际多模态界面会议论文集》。108–117。[4] Gerard Canal、Guillem Alenyà 和 Carme Torras。2016年。自适应机器人喂食辅助的个性化框架。载于《社交机器人》。第9979卷。施普林格国际出版，尚，22–31。https://doi.org/10.1007/978-3-319-47437-3{_}3[5] Ravi Teja Chadalavada、Henrik Andreasson、Maike Schindler、Rainer Palm 和 Achim J Lilienthal。2020年。利用空间增强现实和眼动追踪眼镜进行双向导航意图传达，以提升人机交互安全性。《机器人与计算机集成制造》61（2020），101830。[6] Yuhang Che、Allison M. Okamura 和 Dorsa Sadigh。2020年。通过显式与隐式机器人—人类通信实现高效且可信的社交导航。《IEEE机器人学汇刊》36，3（2020），692–707。https://doi.org/10.1109/TRO。2020.2964824[7] Andre Cleaver、Darren Vincent Tang、Victoria Chen、Elaine Schaertl Short 和 Jivko Sinapov。2021年。人机协作的动态路径可视化。载于《2021年ACM/IEEE人机交互国际会议伴随论文集》（美国科罗拉多州博尔德）（HRI '21 Companion）。计算机协会，纽约，纽约州，美国，339 343 10 1145 3434074 3447188 –。[8] https://doi.org/。/。Adele Diederich 和 Hans Colonius。。双模态和三模态多感官增强：刺激起始时间和强度对反应时间的影响。《知觉与心理物理学》66，8（2004），1388–1404。[9] Anca D Dragan 和 Siddhartha S Srinivasa。2013年。共享控制的策略混合形式体系。《国际机器人研究杂志》32，7（2013），790–805。https://doi.org/10.1177/0278364913490324 arXiv:https://doi.org/10 1177 0278364913490324 。/ Håkan Eftring 和 Kerstin Boschian。。Manus用户试验的技术结果。载于《ICORR论文集》，第99卷。136–141。[11] Ahmetcan Erdogan 和 Brenna D. Argall。2017年。机器人轮椅控制范式和界面对用户表现、努力程度及偏好的影响：一项实验评估。《机器人与自主系统》94（2017），282–297。https://doi.org/10.1016/j.robot.2017.04.013[12] Chinemelu Ezeh、Pete Trautman、Louise Devigne、Valentin Bureau、Marie Babel 和 Tom Carlson。2017年。用于轮椅驾驶共享控制的概率混合与线性混合方法。载于《2017年国际康复机器人会议》（ICORR）。835–840。https://doi.org/10.1109/ICORR.2017.8009352[13] Charles Fattal、Violaine Leynaert、Isabelle Laffont、Axelle Baillet、Michel Enjalbert 和 Christophe Leroux。2019年。SAM：专用于帮助四肢瘫痪人士的辅助机器人设备：可用性研究。《国际社交机器人杂志》11, 1 2019 89 103 10 1007 12369 018 0482 7 （），–。[14] https://doi.org/。/s--Morten Roed Frederiksen 和 Kasper Stoey。。增强非情感型机器人的基于音频的表达模态。载于《2019年第8届情感计算与智能交互国际会议》（ACII）。144–149。https://doi.org/ 10 1109 2019 8925510 。/ACII。。Michael J Gielniak 和 Andrea L Thomaz。2011年。在机器人运动中生成预期。载于《2011年RO-MAN》。IEEE，449–454。[16] Felix Ferdinand Goldau 和 Udo Frese。2021年。学习映射自由度以实现辅助用户控制：面向辅助机器人的自适应自由度映射控制。载于《第14届辅助环境相关普适技术会议》（希腊科孚岛）（PETRA 2021）。计算机协会，纽约，纽约州，美国，132 139 10 1145 3453892 3453895 –。[17] https://doi.org/。/。Laura V. Herlant、Rachel M. Holladay 和 Siddhartha S. Srinivasa。。通过自动时间最优模式切换实现机械臂辅助遥操作。载于《第11届ACM/IEEE人机交互国际会议》（新西兰基督城）（HRI '16）。IEEE出版社，35–42。[18] Nicholas J. Hetherington、Elizabeth A. Croft 和 H.F. Machiel Van der Loos。2021年。嘿，机器人，你要往哪儿走？用于人机空间交互的非语言运动可读性线索。《IEEE机器人与自动化快报》6，3（7月 2021 5010 5015 10 1109 2021 3068708 ），–。https://doi.org/。/[19] lra。。Siddarth Jain、Ali Farshchiansadegh、Alexander Broad、Farnaz Abdollahi、Ferdinando Mussa-Ivaldi 和 Brenna Argall。2015年。通过共享自主性和身体-机器接口实现辅助机器人操作。载于《2015年IEEE国际康复机器人会议》（ICORR）。526–531。https://doi.org/ 10 1109 2015 7281253 。/ICORR。。Dae-Jin Kim、[20] Rebekah Hazlett-Knudsen、Heather Culver-Godfrey、Greta Rucks、Tara Cunningham、David Portee、John Bricout、Zhao Wang 和 Aman Behal。2012年。自主性如何影响表现与满意度：脊髓损伤受试者使用辅助机器人的研究结果。《IEEE系统、人类与控制论汇刊A辑：系统与人类》42，1（2012年），2–14。https://doi.org/10 1109 2011 2159589 。/TSMCA。。Robert J Kosinski。。反应时间文献综述。克莱姆森大学[21] 2008 10，1（2008年），337–344。[22] Kirill Kronhardt、Stephan Rübner、Max Pascher、Felix Goldau、Udo Frese 和 Jens Gerken。2022年。适应还是消亡？探索自适应自由度控制交互方法对辅助机器人手臂的有效性。《Technologies》10，1（2022年）。https://doi.org/ 10 3390 10010030 。/technologies Maria Kyrarini、[23] Fotios Lygerakis、Akilesh Rajavenkatanarayanan、Christos Sev-astopoulos、Harish Ram Nambiappan、Kodur Krishna Chaitanya、Ashwin Ramesh Babu、Joanne Mathew 和 Fillia Makedon。2021年。医疗保健机器人综述。《Technologies》9，1（2021年），8。[24] Veronique Maheu、Philippe S. Archambault、Julie Frappier 和 François Routhier。2011年。JACO机械臂评估：针对上肢残疾电动轮椅用户的临床经济学研究。载于2011年IEEE国际康复机器人会议。1–5。https://doi.org/10.1109/ICORR.2011。5975397[25] Zhanat Makhataeva 和 Huseyin Atakan Varol。2020年。用于机器人的增强现实：综述。《Robotics》9, 2 2020 10 3390 9020021 （）。[26] https://doi.org/。/robotics Bente Martinsen、Ingegerd Harder 和 Fin Biering-Sorensen。。辅助进食对于脊髓损伤患者的意义：一项现象学研究。《高级护理杂志》62，5（2008年5月），533–540。https://doi.org/10.1111/j.1365-2648.2008.04637.x arXiv:https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1111/j.1365-2648.2008.04637.x [27] Alyxander David May、Christian Dondrup 和 Marc Hanheide。2015年。展示你的动作！向人类传达移动机器人的导航意图。载于2015年欧洲移动机器人会议（ECMR）。1–6。https://doi.org/10.1109/ ECMR.2015.7324049[28] Paul Milgram 和 Fumio Kishino。1994年。混合现实视觉显示的分类。《电子信息通信学会信息与系统汇刊》77，12（1994年），1321–1329。[29] Max Pascher、Annalies Baumeister、Stefan Schneegass、Barbara Klein 和 Jens Gerken。2021年。机器人饮食辅助设备的开发建议——一项民族志研究。载于人机交互——INTERACT 2021（2021-09-01），Carmelo Ardito、Rosa Lanzilotti、Alessio Malizia、Helen Petrie、Antonio Piccinno、Giuseppe Desolda 和 Kori Inkpen（编）。施普林格，尚。https://doi.org/ 10 1007 978 3 030 85623 6_21 。/- - - - Max Pascher 、 Uwe Gruenefeld 、 Stefan Schneegass 和 Jens Gerken。2023。如何传达机器人运动意图：一项范围综述。载于2023年CHI计算机系统人为因素会议论文集——CHI '23。https://doi.org/ [30] 10 1145 3544548 3580857 。/。Sebastiaan Petermeijer、Pavlo Bazilinskyy、Klaus Bengler 和 Joost de Winter。2017年。再次接管：研究多模态和定向接管请求，使驾驶员重新回到控制回路中。《应用人体工程学》62（2017年），204–215。https://doi.org/ [31] 10 1016 2017 02 023 。/j.apergo。。Sebastiaan Petermeijer、Fabian Doubek 和 Joost de Winter。2017年。驾驶员对听觉、视觉和触觉接管请求的响应时间：一项包含101名参与者的模拟器研究。载于2017年IEEE系统、人类与控制论国际会议（SMC）。1505 1510 10 1109 2017 8122827 –。[33] https://doi.org/。/SMC。。Laura Petrich、Jun Jin、Masood Dehghan 和 Martin Jagersand。。日常生活活动的定量分析：利用辅助机器人提升功能独立性的启示。载于2022年国际机器人与自动化会议（ICRA）。6999–7006。https://doi.org/10.1109/ICRA46639.2022。9811960[34] Anita Pollak、Mateusz Paliga、Matias M. Pulopulos、Barbara Kozusznik 和 Malgorzata W. Kozusznik。2020年。与协作机器人进行手动和自主模式协作时的压力。《计算机与人类行为》112（2020年），106469。https://doi.org/ [32] 2022 10 1016 2020 106469 。/j.chb。。F. Gabriele Pratticò 和 Fabrizio Lamberti。2021年。推动采用虚拟现实训练系统对工业机器人操作员进行自主学习：KUKA案例研究。《工业计算机》129（2021年），103446。https://doi.org/10。1016/j.compind.2021.103446[36] Gabriel Quere、Annette Hagengruber、Maged Iskandar、Samuel Bustamante、Daniel Leidner、Freek Stulp 和 Jörn Vogel。2020年。辅助机器人共享控制模板。载于2020年IEEE机器人与自动化国际会议（ICRA）。1956 1962 10 1109 40945 2020 9197041 –。[37] https://doi.org/。/ICRA。。Emanuele Ruffaldi、Filippo Brizzi、Franco Tecchia 和 Sandro Bacinelli。。用于可视化机器人意图的第三人称视角增强现实。载于增强现实、虚拟现实与计算机图形学国际会议。施普林格，471–478。[38] Ali Shafti、Pavel Orlov 和 A Aldo Faisal。2019年。基于注视、具备情境感知能力的辅助伸手与抓握机器人系统。载于2019年国际机器人与自动化会议（ICRA）。IEEE，863–869。

[39] Ryo Suzuki、Adnan Karim、Tian Xia、Hooman Hedayati 和 Nicolai Marquardt。2022年。增强现实与机器人技术：面向增强现实人机交互和机器人接口的综述与分类。在*CHI*计算机系统人为因素会议中。1–33。[40] Hylke A Tijsma、Freek Liefhebber 和 Just L Herder。2005年。设计新的MANUS机械臂用户界面的接口改进框架。在第九届国际康复机器人会议，*2005*年。*ICORR 2005*。IEEE，235–240。[41] Katherine M Tsui、Dae-Jin Kim、Aman Behal、David Kontak 和 Holly A Yanco。2011年。“我想要那个”：轮椅搭载式机械臂的人在回路控制。《应用仿生学与生物力学》8，1（2011年），127–147。[42] Michael Walker、Hooman Hedayati、Jennifer Lee 和 Daniel Szafir。2018年。利用增强现实传达机器人运动意图。载于*2018*年*ACM/IEEE*人机交互国际会议论文集（美国伊利诺伊州芝加哥）（*HRI '18*）。计算机协会，美国纽约州纽约，316–324。 https://doi.org/10.1145/3171221.3171253[43] Dian Wang、Colin Kohler、Andreas ten Pas、Alexander Wilkinson、Maozhi Liu、Holly Yanco 和 Robert Platt。2019年。面向开放世界环境中的辅助机器人抓取与放置。载于 国际机器人研究研讨会。施普林格，360–375。 [44] Hanna Yun 和 Ji Hyun Yang。2020年。有条件自动驾驶中接管请求的多模态警告设计。 《欧洲交通研究评论》12，1（2020年），1–11。 [45] Mohammad Kassem Zein、Majd Al Aawar、Daniel Asmar 和 Imad H Elhajj。2021年。利用深度学习和混合现实实现远程操作自动补全。载于 *2021*年 *IEEE*机器人与自动化国际会议（*ICRA*）。IEEE，4523–4529。 [46] Jakub Złotowski、Kumar Yogeeswaran 和 Christoph Bartneck。2017年。我们能控制它吗？自主机器人威胁着人类身份、独特性、安全和资源。 《国际人机研究杂志》100（2017年），48–54。