arXiv:2301.02938v2 [cs.RO] 5 Apr 2023

与机器人助手一起手工制作：利用社交线索指导人机协作中的自适应交接

Leimin Tian
leimin.tian@monash.edu 莫纳什大学 克莱顿，维多利亚州，澳大利亚

Kerry He
kerry.he@monash.edu 莫纳什大学 克莱顿，维多利亚州，澳大利亚

Shiyu Xu
sxuu0041@student.monash.edu 莫纳什大学 克莱顿，维多利亚州，澳大利亚

Akansel Cosgun
akan.cosgun@deakin.edu.au 迪肯大学 伯伍德，维多利亚州，澳大利亚

Dana Kulić
dana.kulic@monash.edu 莫纳什大学 克莱顿，维多利亚州，澳大利亚

摘要

我们研究自然情境协作场景中的人机交接：移动操作机器人在手工制作活动中，通过提供和取回用于木制件组装（功能性活动）和绘画（创造性活动）的物体来协助参与者。我们在一项绿野仙踪研究中收集了20名参与者的定量和定性数据，构建了功能性与创造性任务人机协作数据集（FACT HRC 数据集），并向研究界开放。本研究展示了社交线索和任务情境如何影响人机交接中的时空协调，以及人机协作如何受到人们的功能性与创造性活动的塑造，并反过来影响这些活动。

CCS 概念

• **以人为中心的计算** → **协作与社会计算**；协作交互； • **计算机系统组织** → **机器人自主性**。

关键词

人机交互、人机协作、交接、社交机器人、自适应

ACM 引用格式：

Leimin Tian、Kerry He、Shiyu Xu、Akansel Cosgun 和 Dana Kulić。2023年。与机器人助手一起手工制作：利用社交线索指导人机协作中的自适应交接。载于《*2023*年 *ACM/IEEE* 人机交互国际会议论文集（*HRI '23*）》，*2023*年*3*月*13*日至*16*日，瑞典斯德哥尔摩。ACM，美国纽约州纽约市，共9页。https://doi.org/10.1145/3568162.3576998

1 引言

人机协作（HRC）是一个活跃的研究领域，旨在探讨机器人如何与人协同工作，组成协同团队并取得有益成果，例如在教育 [25], 医疗保健 [23], 或制造业 [15]中。人机协作中的一项常见任务是人机交接，即人与机器人在双方商定的地点和时间交换物体 [20]。成功交接需要人与机器人在空间和时间上进行协调。此外，物体交换的过程还会受到环境、个人和任务约束的影响 [22]。目前，人机协作领域为改进交接所做的努力，主要聚焦于构建能够识别人类意图并据此调整机器人运动规划与执行的模型。然而，正如Ortenzi等人 [20], 所指出的，现有研究孤立地考察交接，未将其置于包含交接前和／或交接后人机协作任务的自然情境中。此外，交接评估关注的是性能和技术层面，例如交接时间和成功率，而非社交互动。这限制了我们对交接过程中人类感知和行为的理解，也阻碍了有效且符合社会规范的人机协作的发展。

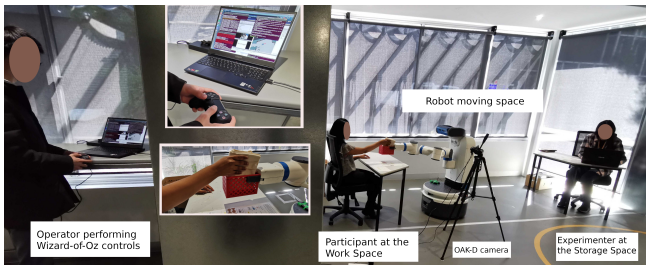

图1：实验空间布局：参与者和实验人员分别坐在工作空间和存储空间。Fetch机器人在两者之间移动，将篮子中的物体递过去。操作员坐在隔壁房间。

我们的目标是了解人们在以任务为中心的人机协作中如何看待机器人，以及如何与机器人交换物体。为推动机器人实现自主能力，我们开展了一项绿野仙踪（WoZ）研究，探究人类操作者如何实现自适应、高效且符合社会规范的人机协作。我们设计了一项手工制作任务：如图1所示，在移动操作机器人的协助下，由一人组装并为木制鸟屋上色。这个人与机器人会交换一组用途各异的任务相关物体（见

允许免费制作本作品的全部或部分内容的数字或纸质副本，用于个人或课堂用途，但不得为营利或商业利益而制作或分发副本，且副本首页必须附有本声明和完整引文。对于本作品中由作者以外的其他方拥有版权的部分，必须尊重其版权。注明出处后可以进行摘要引用。若要以其他方式复制、再版、发布到服务器或重新分发至列表，则必须事先获得明确许可和/或支付费用。请向 permissions@acm.org 申请许可。*HRI '23*，*2023*年*3*月*13*日至*16*日，瑞典斯德哥尔摩© 2023年，版权归所有者/作者所有。出版权已授权给 ACM。ACM ISBN 978-1-4503-9964-7/23/03...$15.00 https://doi.org/10.1145/3568162.3576998

图2）。我们收集定量和定性数据，以了解人机协作过程中的人类体验与行为，以及有效且自适应的协作策略。人机协作会话的录制资料以及我们开发的远程操控框架均已公开。

2 背景

人机协作依赖于人类与机器人之间有效且恰当的社会交流 [26, 28]。表达和感知社交线索是成功实现人机协作的关键，例如，使用犹豫手势来协商对共享资源的访问权 [16]。同样，先前研究发现，人们会使用身体姿态和手臂手势来传达自己希望在何时、何地进行交接 [4], , 无论是作为交接者 [21] 还是接收者 [8]。人机交接质量可通过主观和客观指标，从多个维度进行评估。例如，Murphy 和 Schreckenghost [18] 将交接质量评估为成功率、人类／机器人空闲时间、任务完成时间，以及与运动轨迹相关的代价函数；而 Hoffman [10] 则使用主观问卷衡量人机合作及贡献。

以往研究通常孤立地考察交接，物体在没有交接前和／或交接后任务情境的情况下进行交换，例如，旨在开发更好的模型来预测人类动作 [5, 29], 预测物体传递的恰当位置 [14, 19], 创造更自然流畅的机器人动作 [3, 6], 或开发能够适应情境因素（如人类活动、偏好和物体语义）的控制模型 [7, 12, 13]。在这些研究中，尚不清楚当交接融入人机协作任务后，人们在交接期间的感知和行为会如何变化。

Huang 等人 [11]的一项研究，以嵌入协作任务情境的方式考察了交接。作者研究了人们协作完成卸下碗碟架中碗碟这一任务时，人际交接中的时序协调。基于对 8 对参与者的观察，Huang 等人 [11] 开发并评估了一种基于规则的模型，该模型用于安装在固定桌子上的机械臂；它会调整机器人向人交接时的运动速度，以及两次交接之间的暂停时长，以复现人类在卸碗碟任务中的决策。这项工作为交接中的时间协调提供了宝贵见解。然而，要理解人机交接如何作为一种社交互动实现时间和空间协调，以及如何适应不同类型和目标的物体传递，仍需进一步研究。

3 方法

本文概述了我们的研究设计，包括人类研究伦理、实验方案、定制的机器人远程操作框架以及测量数据的收集。

3.1 人类伦理与数据收集

我们的研究方案经莫纳什大学人类研究伦理委员会审查并批准（编号：31927）。我们从该校教职员工和学生中招募了20名参与者（女性10名，男性10名，年龄为 27.00 ± 5.17）：其中15人来自工程学院，4人来自艺术学院（P7、P8、P10、P15），另有1人（P13）来自商学院与经济学院。所有参与者均知情同意参加研究，并同意将其数据记录为用于研究目的的公共数据集的一部分。作为一项绿野仙踪研究，我们没有在实验前明确告知参与者机器人是由远程操控的。相反，实验人员在之后的事后说明中解释了绿野仙踪方法的目的和细节。

3.2 实验方案

在这项协作任务中，参与者在 Fetch移动操作机器人的协助下组装并为鸟屋／喂食器上色。参与者可以留下自己的作品，以感谢他们付出的时间；这预计会提高他们对任务的参与度。如图1所示，一次会话涉及三种人类角色：一名参与者 坐在房间一侧的工作空间内，面前有一个收纳箱和一张桌子，桌面太小，无法一次容纳所有所需物体；一名实验人员 坐在房间另一侧的存储空间内，所有会话所需物体都存放在一个箱子里；一名操作员 坐在参与者身后、不会被参与者看到的位置，负责控制机器人。机器人在工作空间与存储空间之间移动，并在两侧进行物体交接。每个交接过程中的详细状态机如图3所示。机器人（及操作员）通过机器人自带的头戴式摄像头观察参与者，同时使用一台安装在工作台旁、位于参与者右前方的RGB-D摄像头（OAK-D）。工作台右上角放置了一份列出会话中所有物体的说明书，供参与者随时查阅。请注意，由于我们关注的是如何让机器人通过选择最佳的交接时机和物体转移点（OTP）来提供协助，因此我们简化了交接问题：机器人拿着一个篮子来传递物体，而不是直接用夹爪抓取各种物体。

机器人辅助手工制作任务分为三个阶段：阶段1（准备）、阶段2（组装）和阶段3（绘画）。机器人和参与者在每个阶段都会进行交接：参与者既可以作为接收方，在机器人从存储空间取来物品时接收物品；也可以作为给予方，在需要机器人将物品放回存储空间时交出物品。图2概述了实验会话，整个会话时长约为一小时。阶段1旨在为协作任务做好准备，并促进参与者与机器人（操作员）之间的隐式相互学习。阶段2旨在了解功能性任务情境中的交接与人机协作。阶段3旨在了解创造性任务情境中的交接与人机协作。功能性与创造性活动在交接前后的任务情境各不相同，这有助于我们实现研究情境化交接的目标。在功能性活动中，参与者应专注于快速组装鸟屋，并确保其结构牢固。在创造性活动中，参与者应具有不同的心理情境（即按照自己的喜好设计鸟屋外观）和行为情境（即通过绘画实现个人设计）；这些情境会影响交接应在何时以及如何进行，也会影响参与者在任务过程中的感知与体验。

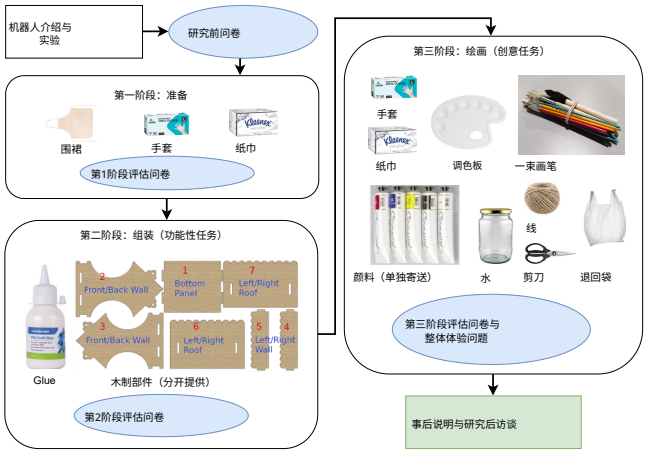

图 2：会话概览：会话时长一小时，分为三个阶段，每个阶段都会使用不同的物体。参与者在会话期间填写在线问卷。最后进行事后说明和访谈。

操作员通过第3.3节详细介绍的遥操作界面控制机器人。操作员坐在隔壁房间（见图1），并在参与者和实验人员就座后就位。作为一项绿野仙踪研究，参与者在实验前或实验期间都不会被告知操作员的存在。这样，我们便能了解人们在人机协作过程中会表现出哪些社交线索，以及如何利用这些社交线索实现适用于自主机器人的自适应交接。

3.3 远程操作框架

我们使用机器人操作系统（ROS）开发了一个定制的远程操作框架。[1] 一名经验丰富的 Fetch 操作员接受了使用该远程操作框架的培训，并在所有实验会话期间控制机器人。操作员的角色是确定开始和完成每个交接过程的适当时机、确定合适的交接位置（OTP），并评估交接过程的质量。此外，每次会话结束后，操作员都会参加访谈，描述其策略并纳入参与者的反馈。

操作员使用手持控制器和计算机界面控制机器人。如图 4 所示，操作员可以查看 OAK-D 摄像头和机器人的机载摄像头的实时画面，还可以根据 OAK-D 摄像头画面，使用 Blazepose [2],获取参与者上半身和面部关键点的估计结果，并使用 EmoNet [27] 从两个摄像头的画面中获取类别化情绪估计。参与者的姿态、机器人姿态以及机器人末端执行器（EE）的姿态会显示在三维地图视图中，该视图绘制了机器人在工作空间和存储空间之间移动所遵循的路径。操作员可以沿预定义路径驾驶机器人，并旋转机器人的底座。操作员也可以在每个环节进行期间或环节之间，对路径端点的位置进行微调。进行交接时，操作员可以将末端执行器伸向一个物体交接点（手臂伸展），也可以将其收回至默认收回姿势（手臂收回）。交接动作序列基于 He等人 [9]的方法。我们指定了三个默认物体交接点：机器人左侧（参与者右手侧）、机器人右侧（参与者左手侧）以及中央位置。操作员可以微调这些物体交接点的位置和方向。路径端点和物体交接点的更改可以保存或重置。每个环节结束后，操作员使用控制器评估交接质量，并指定参与者与机器人之间交接的类型（人到机器人、机器人到人或双向）。手臂伸展期间，机器人会自动向下倾斜头部，使其朝向末端执行器并展现共同注意 [17, 30]。手臂收回期间，机器人会将头部恢复至中立位置。

3.4 测量

远程操作框架中的数据通过 ROS 袋文件持续记录，其中包括同步的操作员控制信号、视频录制内容、机器人状态、根据 OAK-D 摄像头画面估算的面部和上半身关键点，以及来自两个摄像头画面的情绪估计。此外，我们还收集了参与者对问卷的回答，其中包括有关参与者人口统计背景和机器人自我效能感的研究前问题 [24]。在三个阶段的每个阶段结束后，参与者都会对该阶段的体验进行评估，使用五点李克特量表测量流畅度、信任，以及他们与机器人之间的工作联盟 [20],他们对机器人的感知（通过 GodSpeed 问卷评估） [1], 他们的整体愉悦度和满意度，并填写文本评论框。所有阶段完成并评分后，在事后说明和访谈之前，参与者还会选择他们认为机器人是远程操控还是完全自主、是否认为机器人具有自适应能力，并在文本框中填写其他评论。

除了通过问卷和远程操作框架记录收集的定量数据外，我们还收集了定性观察笔记和会后访谈。实验人员在会话期间记录参与者的行为、操作员的控制指令与调整，以及值得关注的事件。访谈中，我们请参与者描述他们对机器人的印象和人机协作体验、他们对机器人工作方式的猜测、他们对会话期间某些值得关注事件的理解、他们的设计与创作过程，以及机器人未来可进行哪些改进以成为更好的助手。操作员也参与了访谈，介绍自己的观察和自适应策略，并回答参与者提出的问题。

4 FACT HRC 数据集

我们收集了一个由绿野仙踪控制的人机交接与协作数据集，涵盖 Functional And Creative Tasks（FACT）。FACT HRC 数据集包含三个部分：

(1) *FACT-raw*[2]（需签署最终用户许可协议方可访问）包含第 3.4 节所述的可识别 ROS 包录制数据。(2) *FACT-processed*[3] 包含从同步后的原始数据中每隔 0.1 秒提取的不可识别 CSV 数据（总计约 600K 条数据实例），包括机器人的

[1]远程操作框架：https://github.com/tianleimin/fetch-teleop

[2]FACT-raw：https://doi.org/10.26180/21671789.v3
FACT-processed 和 FACT-support：https://doi.org/10.26180/21671768.v1

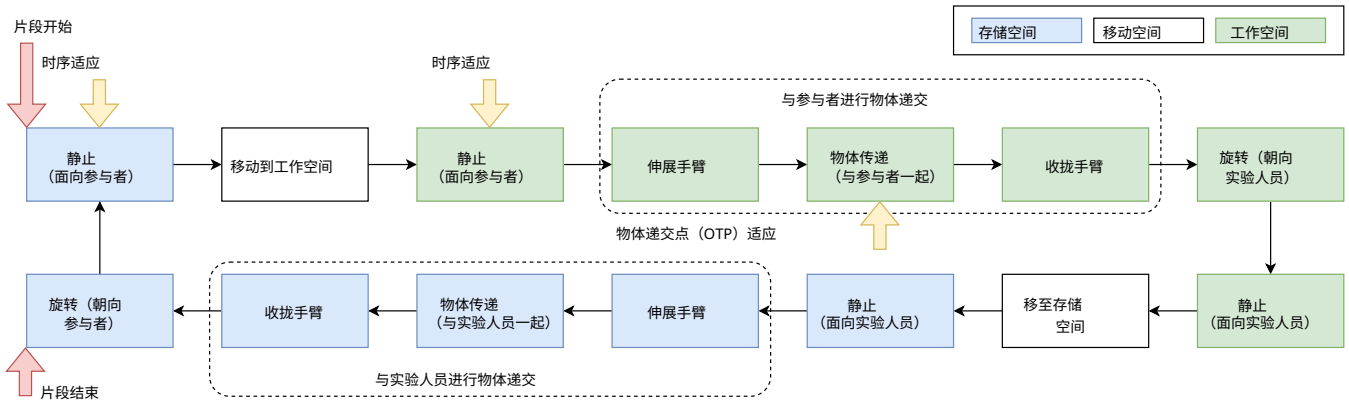

图3：一次交接过程：操作员在等待将机器人移至工作空间，以及等待与参与者开始物体传递时进行时序适应。物体传递过程中也会发生空间适应。

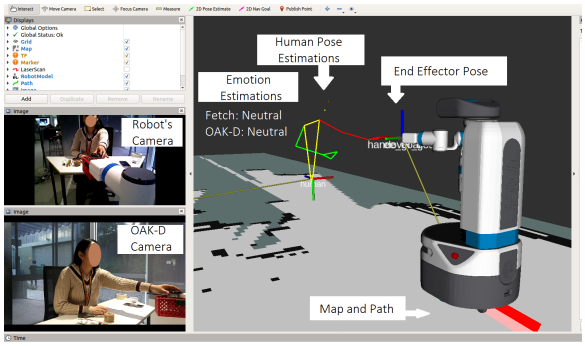

图4：远程操作框架的可视化：操作员可以查看机器人机载摄像头和额外的RGB-D摄像头拍摄的实时视频流、包含机器人姿态的三维地图视图，以及估计出的参与者姿态和情绪。

状态、操作者的控制指令、根据 OAK-D 摄像头画面估算的面部和上半身关键点，以及根据两个摄像头画面估算的情绪。此外，还提供了去标识化的问卷回复。

(3) *FACT-support* 包含支持材料，包括说明书、远程操作框架控制的操作员速查表、问卷、用于激光切割鸟屋部件的CAD文件、远程操作框架的实现以及数据处理脚本。

FACT HRC 数据集包含565个交接环节，即：

- 52人向机器人交接（9.2%）：人员将物体放入机器人用夹爪握持的空篮子中，从而将物体交给机器人。
- 320 机器人到人交接（56.6%）：人员从篮子中取出物体，从而接收机器人交付的物体。
- 193 双向交接（34.2%）：人员与机器人之间的物体交换，可以同时进行，也可以通过连续两次的交付和接收动作完成，在此过程中，机器人的手臂可以保持伸出状态，也可以收回，在交付和接收动作之间等待。

5 操作员的适应策略

操作员根据参与者通过注视和手势所表现出的意图与偏好、交接过程中的安全考量，以及交接与任务情境的高效衔接，调整了交接方式。

5.1 社交线索的观察与表达

操作员报告称，他们会留意对方的注视（例如与机器人进行眼神接触）、手势（例如挥手）和上半身动作（例如身体前倾），这与现有研究一致 [4, 20]。操作员并未依赖估计得出的情绪估计结果，因为自动模型的准确度不如人类。不过，情绪估计可能有助于自主模型区分操作员评为良好或不佳的交接环节；在评为良好的环节中，模型预测出的情绪更积极或中性。此外，操作员还会留意交接前后的情境，包括工作台上的物体布局、对方进行手工制作任务时所处的空间，以及对方的一只手或双手是否正被占用。

操作员通过机器人的位置和动作向人类协作者传达机器人的意图。当机器人等待向参与者递送物体或从参与者处接收物体时，如果预计等待时间较长，操作员就会控制机器人在存储空间等待，以免给对方造成压力，催促其匆忙完成任务；正如一些参与者在访谈中所建议的那样（第6.3节）。如果预计等待时间较短，操作员则会控制机器人在工作空间等待，以便在人准备好后立即进行交接。五位参与者认为，机器人在物体转移过程中的歪头行为表明机器人意识到了自身及其协作者的存在。操作员的观察和控制策略表明，对社交线索的感知与表达是促进人机协作的关键。

5.2 交接时机的适应

如图3所示，操作员主要关注选择恰当时机将机器人移至工作空间以启动交接过程（即决定机器人在存储空间的等待时间），并在交接过程中伸出机器人的手臂以启动物体传递（即决定机器人在工作空间的等待时间）。参与者做出个人化的“开始”手势后，交接便会启动（第6.1节）。除了由参与者发起的交接外，在阶段2和阶段3中，如果操作员预计参与者完成手头任务所需的时间会短于机器人从存储空间移动到工作空间所需的时间（9秒），便会在参与者发出信号前将机器人移至工作空间，从而发起由机器人启动的交接。如果待递送的物品对正在继续手头任务的人来说急需，也会由机器人启动交接。

阶段1中每个交接过程的平均时长为113.6±42.1秒，阶段2中为97.1±22.8秒，阶段3中为108.1±22.0秒，也就是说，在组装这一功能性活动中，交接环节的时长最短（S1 对比 S2 $p = 0.03$、S2 对比 S3 $p = 0.02$、S1 对比 S3，$p = 0.26$）。阶段1中交接环节时长的较大方差，与我们在第3.2节中的讨论一致：该阶段旨在促进参与者与操作员之间的隐式相互学习。阶段1中，交接环节里机器人在工作空间暂停的平均时长（机器人在参与者一侧等待合适时机开始物体传递）为7.5±3.8秒，在存储空间暂停的平均时长（等待合适时机移向参与者）为47.9±24.4秒；阶段2中，在工作空间暂停的平均时长为19.0±15.6秒，在存储空间为26.3±14.7秒；阶段3中，在工作空间暂停的平均时长为16.2±13.6秒，在存储空间为40.1±27.9秒。也就是说，操作员控制机器人在存储空间的等待时间长于在工作空间的等待时间（阶段1中$p \ll 0.01$、阶段2中 $p = 0.08$、阶段3中 $p = 0.004$），以避免给参与者造成压力，这与我们在第5.1节中的讨论一致。

5.3 交接位置调整

操作员在确定交接位置时考虑了效率和安全性。为提高效率，他们希望末端执行器停在大致与参与者的惯用手或空闲手所在位置相同的地方，或停在参与者示意“开始”手势的位置。为确保安全，他们会考虑工作台上的物体布局，以避免碰撞，尤其要避开参与者正在制作的鸟屋。当这两方面的考虑发生冲突时，操作员会优先考虑安全。操作员可以根据参与者的行为实时调整交接位置，也可以根据以往的观察，在物体转移之间进行调整。

当机器人位于工作空间时，操作员可以将机器人的底座移得离参与者更近或更远，但他们选择不使用此功能。相反，他们通过改变末端执行器目标位置来调整交接位置。如第 3.3 节所述，有三个默认的末端执行器目标位置（左侧、中央、右侧）。操作员可以调整这些默认交接位置。但由于三个默认位置之一已被认为足够接近操作员预想的交接位置，因此没有进行此类微调。此外，如果参与者在手臂伸展动作完成前伸出一只手或双手，操作员便会提前停止该动作，不让其到达默认的末端执行器目标位置（即交接位置比默认位置离参与者更远）。

机器人以手臂就绪状态完成一次物体传递需要 12 秒，无论是前往三个默认交接位置之一，还是在中央与左侧／右侧交接位置之间切换。然而，在左侧和右侧交接位置之间切换需要 30 秒，因为动作幅度更大。为避免打断协作流程，操作员在机器人与参与者交接时不会进行此类左右切换，而是在机器人与实验人员交接时，或机器人在存储空间待命时进行。相比之下，在机器人与参与者交接时，操作员更频繁地在中央与左侧／右侧交接位置之间切换，以便快速适应参与者的偏好。在全部 61 次交接位置切换中，49 次为左侧与中央之间的切换（80.3%），7 次为右侧与中央之间的切换（11.5%），5 次为左侧与右侧之间的切换（8.2%）。在 565 个交接环节中，186 次（32.9%）为左侧交接（参与者的右手侧），367 次（65.0%）为中央交接，12 次（2.1%）为右侧交接。左侧交接位置比右侧交接位置更受偏好，这与参与者群体的情况一致，其中只有 P1 是左撇子。

5.4 操作员与参与者的看法

在所有交接环节中，操作员将397次（70.3%）评为良好，32次（5.7%）评为较差，136次（24.1%）评为中性。操作员将参与者在每次会话后的事后说明和访谈中提供的反馈，纳入后续会话的观察和自适应策略中。因此，我们观察到操作员的专业能力和控制策略不断发展：对于P1和P2，操作员认为这两场会话中较差的交接环节数量最多（各5次）。此外，P1在首次交接过程中发生了一次碰撞事件：由于设置问题，机器人撞到了工作台；P2在阶段3也发生了一次碰撞事件：机器人伸展手臂，将剪刀交给P2并进行中央交接时，推到了组装好的鸟屋。P1和P2在访谈中提到了碰撞事件，但认为其他较差的交接环节并无特别之处。对于P5、P7和P12，操作员认为每场会话各有3次较差的交接环节；P5认为存在“一两次沟通失误”，P7没有注意到机器人的失误或其物体交接点的变化，而P12则提到“一次奇怪的情况”，称机器人的手臂动作看起来不自然。对于其余会话中操作员评为较差的1到2次交接环节，参与者在访谈中均未提及。

为了进一步了解操作员与参与者的感知差异，我们针对每个阶段计算了操作员的交接质量评分 $Q_o = 0.5 \times (\frac{N_{good} - N_{bad}}{N_{total}} + 1)$，并将参与者的交接质量评分计算为其对愉悦度 E和满意度 S水平 $Q_p = \frac{E+S-2}{10-2}(Q_o,\ Q_p \in [0,1])$ 评分的最小-最大归一化总和。图5展示了每个会话中 Q_o和 Q_p按阶段计算的均值（Q）和标准差（$\sigma_o,\ \sigma_p$）。请注意，参与者的评分彼此独立，而操作员对某个会话的评分则可能受到其先前会话经历的影响。如图所示，操作员与参与者对交接质量的感知并不总是一致。在9个会话中，$\sigma_o > 0.1$ (P4、P7-P9、P11-P14、P19)，$\sigma_p = 0.07$，$\sigma_o = 0.20$。这表明，与持有以交接为中心视角的操作员相比，参与者的感知可能较少受到

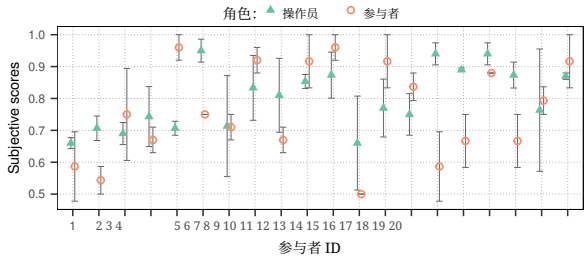

图5：操作员与参与者的看法：操作员以交接为中心的视角看待问题，而参与者则受到任务情境的影响。

单独交接的影响，而更多地受到任务情境的影响。访谈中也发现了这一点，详见第6.2节和第6.3节。

比较 Q_o 和 Q_p 在较早（P1-P10）与较晚（P11-P20）会话中的表现，后半部分三个阶段的平均评分均持续较高，尽管差异仅在 Q_o 的阶段2（$p = 0.03$）中达到统计显著。Q_o 的质量评分增幅大于 Q_p。这表明操作员在交接适应方面积累了专业能力，从而提升了参与者在后续会话中的体验。

6 用户的感知与行为

我们通过主观问卷、观察笔记和访谈数据，考察人们如何与机器人协作，以及他们如何看待机器人。分析显示，参与者对机器人和人机协作体验既有正面印象，也有负面印象。与阶段1相比，他们在阶段2和阶段3中的看法更为积极，因为操作员会根据他们的偏好进行调整，而参与者也更加专注于物体交接之外的功能性与创造性活动。此外，参与者的社交线索会在一次会话中发生变化，且不同参与者之间也有所不同。人机协作还直接影响了人们的设计和创作过程，尽管实际执行的只有人机物体交接。

6.1 人机协作期间的用户行为

有趣的是，所有参与者都会向机器人的"脸部"（机载摄像头）示意，尽管他们知道 OAK-D 摄像头也用于监测他们的行为，而且位置离他们更近。曾与机器人合作过的 P6 是唯一一位在第一个交接过程中尝试向两个摄像头示意的参与者；在之后的所有交接过程中，他都只向机器人的机载摄像头示意。P6 表示，一开始他向 OAK-D 摄像头示意，是因为它"角度更好"，但后来觉得向机器人的机载摄像头示意更自然。此外，P15 表示，有时他觉得用大幅度手势示意机器人过来"很奇怪"或"太正式"，因为他认为机器人是与自己共同完成任务的平等伙伴，两者相处的方式很随意，而朝着某人的脸挥手可能会被视为不礼貌。这些现象凸显了人机交接中的社交互动层面。尽管参与者被告知机器人没有语音识别或交互能力，仍有五位参与者会对机器人说话，例如在交接后说"谢谢"。这表明语音是一种自然的交互模态，能够为人机协作带来益处。

参与者向机器人发出信号时，会结合一种或多种模态的社交线索，包括注视、手部动作和身体姿势。用于示意交接开始（即"开始"手势）的最常见社交线索，是在身体前倾的同时抬眼注视机器人，并用单手左右或前后挥动；共有17名参与者采用了这种方式。研究中观察到这种"开始"手势的若干变体，例如只使用注视而不做手部或身体动作，在挥手时拿着要交给机器人的物体，或使用语义手势来展示所需物体（例如通过模仿戴手套的手势来发起手套箱交接）。12名参与者在会话期间使用了不止一种"开始"手势，其中11人在后续环节中改用了付出更少力气的"开始"手势（P13除外），例如从同时使用注视和手部动作改为只注视。在访谈中，P1、P3、P10和P13提到，他们尝试了不同的手势，并观察机器人的反应，以决定哪些手势最有效。P10表示，会话开始时她使用的手势幅度更大，因为当时更加兴奋。P14表示，随着对机器人运行方式越来越熟悉，她在会话后期改用了幅度更小的手势，并觉得与机器人交流所需的努力更少。机器人到达工作空间后，5名参与者做出了后续的"开始"手势，示意机器人伸出手臂，并通过伸出一只手发起物体传递。完成物体传递后，6名参与者做出了"结束"手势，示意机器人收回手臂并返回存储空间；他们会在点头的同时做出单手"OK"手势，或向外挥动单手做出"走开"手势。

在各次会话中，参与者也逐渐适应了机器人的行为。由于机器人的动作相对缓慢，为了提高效率，参与者尽可能采用双向物体交换，而非单向物体交接。他们还利用等待时间开展其他活动，例如阅读说明书、检查组装或绘画进度，以及查看手机。此外，参与者会动态调整工作台的布局，以确保他们偏好的物体传递区域保持畅通。

我们的分析表明，在协作过程中，参与者将机器人视为社会行动者，并利用各种社交线索（包括注视、手部动作和身体姿势）来协调物体交接的时间和位置。他们还会调整自身行为以适应机器人，从而实现更高效的协作，例如利用等待时间完成其他任务，并尽可能进行双向交接。

6.2 对机器人的感知

在人机协作会话开始之前，参与者对机器人操作和应用效能的预期进行了评分。工程学院的参与者与艺术与商学院的参与者之间未发现显著差异。

事后说明前，参与者猜测机器人是自主运行还是远程操控，以及他们是否认为机器人具有自适应能力。15 名参与者回答说机器人具有自适应能力

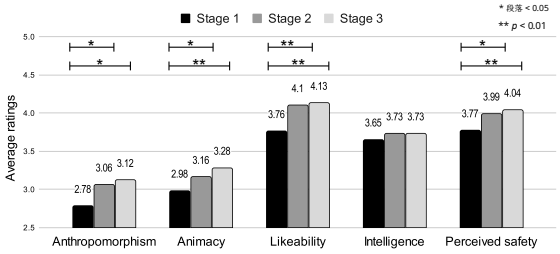

图6：对机器人的主观印象评分：与阶段1相比，参与者在第2阶段和第3阶段对机器人有更积极的印象。

；会话期间，3 名参与者回答说机器人不具备自适应能力，另有 2 名参与者表示不确定。9 名参与者认为机器人是完全自主的，9 名参与者认为机器人由人远程操控，另有 2 名参与者表示不确定。在事后说明中介绍操作员之前，没有参与者发现操作员所在的位置。参与者认为机器人由人远程操控或对自己的猜测表示不确定，主要是因为机器人能够根据他们的行为和任务情境进行调整，而他们认为这对完全自主的机器人来说难度太大。这表明，提升机器人的自适应能力是实现自然人机协作的关键。

在图6和表1中，我们报告了参与者对机器人在各阶段的主观印象（子项目均值，取值范围为 [1,5]）。如图所示，与阶段1相比，参与者在第2阶段和第3阶段对机器人的印象显著更加积极（智能方面除外）。第2阶段和第3阶段评分较高的一个可能原因是，操作员在阶段1期间学会了有效的适应策略，并在第2阶段和第3阶段进行了更流畅的交接。不过，正如第5.4节所讨论的，另一个原因可能是，与物体转移相比，参与者在第2阶段和第3阶段更加专注于功能性与创造性活动；也就是说，参与者的感知更多受到协作任务的影响，而非单独交接。

在访谈中，参与者对机器人表达了正面和负面的印象。八位参与者称机器人“很酷”“令人印象深刻”“很棒”“讨人喜欢”，或表示与机器人交互时感到“着迷”“兴奋”或“满意”；四位认为机器人在交互中“反应灵敏”或具有“自适应”能力；三位认为机器人对任务“有用”“有效”或“有帮助”；两位认为机器人在执行动作和完成任务时“可靠”或“值得信任”。然而，也有八位参与者提到机器人速度较慢，以及等待机器人的经历。不过，这种缓慢感不一定会让每位参与者都感到负面。正如 P15 所述，机器人的缓慢让它显得可预测且不具威胁性，因此他觉得机器人“温顺”又“可爱”。此外，尽管 P2 和 P18 之前接触过机器人，他们仍表示不确定或困惑于如何与机器人交互，或如何触发机器人的某些行为。

参与者还讨论了他们希望机器人未来进行哪些改进，以使其成为更好的助手。八位参与者认为，除了目前基于手势的方法外，加入语音交互或语音指令有助于提升

表1：参与者对机器人和人机协作的印象（均值 ± 标准差）。总体而言，阶段2和阶段3的评价更为积极。

机器人印象	阶段1	阶段2	阶段3
拟人性	2.78 ± 0.78	3.06 ± 0.95	3.12 ± 0.96
生命性	2.98 ± 0.70	3.16 ± 0.71	3.28 ± 0.81
好感度	3.76 ± 0.66	4.10 ± 0.74	4.13 ± 0.70
智能	3.65 ± 0.71	3.73 ± 0.66	3.73 ± 0.83
感知安全性	3.77 ± 0.68	3.99 ± 0.62	4.04 ± 0.70
人机协作印象	**阶段1**	**阶段2**	**阶段3**
流畅度	3.62 ± 0.74	3.95 ± 0.69	4.12 ± 0.75
信任	3.93 ± 0.91	4.18 ± 0.78	4.20 ± 0.85
工作联盟	3.97 ± 0.91	4.09 ± 0.76	4.14 ± 0.86
愉悦度	3.70 ± 0.86	4.35 ± 0.59	4.30 ± 0.66
满意度	3.65 ± 0.75	4.10 ± 0.85	4.10 ± 0.85

协作的交互性和灵活性。同样，三位参与者建议，开发一本将手势指令与特定物体关联起来的词典，有助于减少混淆并提高灵活性。关于提升灵活性的这一需求，六位参与者表示，最好允许自定义机器人递送物体的顺序和种类。谈到机器人的行为，四位参与者希望机器人在更多交接环节中能够主动预判，而非被动响应；两位参与者希望机器人的反应时间和／或行为更加一致；三位参与者建议机器人除了进行物体交换外，还应更多地参与其中，例如直接与人协作组装：在人将一块部件粘到鸟屋主体上时，机器人帮忙扶住该部件。

如问卷和访谈回复所示，尽管参与者对机器人持有多样化的印象，但总体而言，他们认为机器人是一个自适应且有帮助的协作者，尤其是在组装和绘画阶段。若要提升机器人被感知到的流畅度及其对任务的贡献，可以增加其在物体交接之外的参与，并结合语音和手势进行多模态交互。

6.3 对协作的感知

图7和表1展示了参与者对人机协作的感知。与对机器人的感知类似，在愉悦度、满意度和流畅度方面，相较于阶段1，参与者在阶段2和阶段3对人机协作的印象明显更加积极。在访谈中，四位参与者表示，在三个阶段中，他们认为阶段2的协作性最强；在该阶段，他们与机器人作为一个高效团队开展工作，而三位参与者认为阶段3的协作性最强。

参与者在访谈中讨论了对人机协作的正面和负面看法。四位参与者表示这段体验“有趣”，例如，P17说阶段2的木制部件“像礼物一样送到了”；六位参与者认为交互“流畅”“高效”或“有效”；五位参与者认为这次会话具有“自适应性”，机器人随着时间推移不断改进，以更好地满足他们的需求。然而，也有五位参与者提到，当

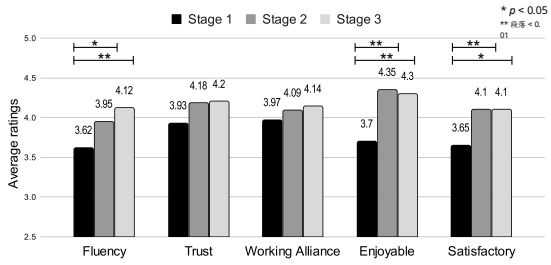

图 7：人机协作的主观评分：参与者认为阶段2和阶段3的协作体验更积极。

机器人在等待他们时，尤其是在工作空间里，会让他们感到压力，或想要加快动作。

参与者还可以在每个阶段结束后，在问卷的自由文本区域发表评论。对于阶段1，四位参与者谈到了他们不确定该如何示意机器人过来并进行物体传递，以及随着时间推移逐渐更了解机器人行为方式的体验。对于阶段2，六位参与者的评论表明，与阶段1相比，他们的协作体验更好，因为机器人显得更投入、更高效且更具自适应性。对于阶段3，六位参与者谈到了他们感到放松的积极感受，也提到了负面印象，例如部分交互过程较慢、希望以不同顺序递送物体，以及在某些情况下机器人在不理想的位置递交物体。问卷末尾，九位参与者补充了评论，既表达了对机器人显得像人且具有自适应能力的积极印象，也表达了对交互过程缓慢或有时不确定机器人意图的负面感受。

访谈中，十二位参与者注意到机器人在会话期间调整了物体交接点，五位参与者没有注意到位置变化；而在与 P13、P14 和 P19 进行的会话中，所有交接环节都发生在中央位置。此外，三位参与者注意到机器人调整了手臂伸展距离，使其与人更近或更远。九位参与者指出，机器人在某些交接过程中表现得较为主动；而十一位参与者认为机器人完全是被动的，只有在他们发出信号后才会发起交接。还有两位参与者提到，他们也在适应机器人，随着会话的进行，逐渐更能理解机器人或熟悉其行为。

我们的分析表明，总体而言，参与者认为协作体验愉悦、高效且具有自适应性，尤其是在组装和绘画阶段，尽管他们没有注意到所有交接时机和物体交接点调整。

6.4 功能性与创造性活动

在访谈中，参与者讨论了与机器人协作如何影响他们在手工制作活动中的功能性与创造性活动。谈及组装鸟屋这一功能性任务时，P1表示，机器人有助于避免工作空间杂乱。类似地，P13、P15和P17表示，机器人逐一递送木制部件，引导他们以有条理的方式完成一项不熟悉的任务。此外，P8提到了自己过去参加家具设计课程的经历：当时人们常常要花很长时间等待使用共享设备。她评论说，在这种情况下，机器人可以把物体送到共享设备处进行加工，同时让人继续处理其他任务，因此会很有帮助。

关于鸟屋外观设计这一创造性活动，所有参与者都在实验期间构思了设计。由于只提供了五种原色，六位参与者在绘画阶段使用手机搜索调色方法（例如，P2 搜索了如何调出棕色），或搜索他们打算在设计中加入的特定物品图片（例如，P9 搜索了辉蓝细尾鹩莺的照片）。九位参与者表示，机器人递送颜料的顺序直接启发或影响了他们的设计；而十一位参与者则提到，他们已从说明书中得知会提供哪些颜色，因此颜色送达的顺序并未影响他们的设计。

此外，六位参与者表示，他们希望会话能再长一些，因为他们全身心投入到手工制作中。三位参与者提到，由于人机交接被融入手工制作活动，而非成为关注的中心，他们得以专注于创意设计过程。具体而言，P15谈到，由于自己能够专注于创作，他想起了鸟屋是用来喂食小鸟的，于是调整了设计，避免使用可能吸引捕食者的鲜艳颜色，让鸟屋看起来更具伪装性。P10提及自己过去与小型群体绘画机器人互动的经历：当时机器人犯了很多错误，她担心它们会弄坏东西或伤到人。然而，在这次会话中，她觉得机器人运行“流畅”且“有帮助”，因此能够专心创作并尝试不同的颜色混合。此外，P8结合自己辅导儿童美术课的经历评论说，课程结束后整理用品往往很耗时。她表示，机器人按照顺序递送和取回物品，让绘画阶段的安排更加有条理；这有望减轻儿童美术课场景中辅导教师的工作量。

正如访谈所示，参与者的功能性和创造性活动受到了机器人行为的影响。物体交接中的功能性协作不仅提升了个人的任务效率，还带来了设计和创造性方面的益处。

7 结论

我们在自然情境下的人机协作环境中研究了人机交接，其中由绿野仙踪（WoZ）控制的移动机器人协助用户完成功能与创意任务。对所收集的 FACT HRC 数据集进行分析后，我们发现社交线索，尤其是注视和手势，有助于实现交接的时空适应。此外，交接还会受到交接前后任务情境的影响。我们的研究结果可推广至其他人机协作任务，例如烹饪辅助机器人，以开发具备社会感知能力的机器人行为。下一步，我们计划利用收集到的数据集训练自动交接模型，根据社交和任务情境预测操作者的控制指令。

致谢
本研究由澳大利亚研究理事会未来学者奖 FT200100761 资助。

参考文献
[1] Christoph Bartneck、Dana Kulić、Elizabeth Croft 和 Susana Zoghbi。2009。机器人拟人性、生命性、好感度、感知智能和感知安全性的测量工具。《国际社会机器人学杂志》1, 1 (2009), 71–81。[2] Valentin Bazarevsky、Ivan Grishchenko、Karthik Raveendran、Tyler Zhu、Fan Zhang 和 Matthias Grundmann。2020。Blazepose：设备端实时人体姿态跟踪。*arXiv* 预印本 *arXiv:2006.10204* (2020)。[3] Hildo Bijl、Thomas B Schön、Jan-Willem van Wingerden 和 Michel Verhaegen。2017。通过带输入噪声的在线稀疏高斯过程回归进行系统辨识。*IFAC* 系统与控制期刊2 (2017), 1–11。[4] Maya Cakmak、Siddhartha S Srinivasa、Min Kyung Lee、Sara Kiesler 和 Jodi Forlizzi。2011。利用空间和时间对比实现流畅的机器人—人交接。载于第六届人机交互国际会议论文集。489–496。[5] Wesley P Chan、Matthew KXJ Pan、Elizabeth A Croft 和 Masayuki Inaba。2020。基于可供性和距离最小化的机器人与人交接物体朝向计算方法。《国际社会机器人学杂志》12, 1 (2020), 143–162。[6] Wesley P Chan、Tin Tran、Sara Sheikholeslami 和 Elizabeth Croft。2021。无约束交接伸手运动模型的实验验证与比较：为人机交接生成类人动作。载于*2020 IEEE-RAS* 第*20*届人形机器人国际会议（*Humanoids*）。IEEE，356–361。[7] Qing Feng、Ben Letham、Hongzi Mao 和 Eytan Bakshy。2020。利用贝叶斯优化，在上下文奖励未知的情况下进行高维上下文策略搜索。神经信息处理系统进展33 (2020), 22032–22044。[8] Elena Corina Grigore、Kerstin Eder、Anthony G Pipe、Chris Melhuish 和 Ute Leonards。2013。联合动作理解可提升机器人向人交接物体的效果。载于*2013 IEEE/RSJ* 智能机器人与系统国际会议。IEEE，4622–4629。[9] Kerry He、Pradeepsundar Simini、Wesley Chan、Dana Kulić、Elizabeth Croft 和 Akansel Cosgun。2022。移动操作机器人执行的随行式机器人向人交接。载于*IEEE* 机器人与人交互通信国际研讨会（*RO-MAN*）。[10] Guy Hoffman。2019。评估人机协作的流畅度。*IEEE* 人机系统汇刊49, 3 (2019), 209–218。[11] Chien-ming Huang、Maya Cakmak 和 Bilge Mutlu。2015。人机交接的自适应协调策略。*2015*年机器人科学与系统会议（*RSS 2015*）(2015)。[12] Nikos Karampatziakis、John Langford 和 Paul Mineiro。2020。上下文多臂老虎机的经验似然。神经信息处理系统进展33 (2020), 9597–9607。[13] Andras Kupcsik、David Hsu 和 Wee Sun Lee。2018。根据人类反馈学习动态的机器人向人交接物体。载于机器人研究。Springer，161–176。[14] Guilherme J Maeda、Gerhard Neumann、Marco Ewerton、Rudolf Lioutikov、Oliver Kroemer 和 Jan Peters。2017。用于协调多种人机协作任务的概率运动基元。《自主机器人》41, 3 (2017), 593–612。[15] Eloise Matheson、Riccardo Minto、Emanuele GG Zampieri、Maurizio Faccio 和 Giulio Rosati。2019。制造业应用中的人机协作：综述。机器人学8, 4 (2019), 100。[16] Ajung Moon、Maneezhay Hashmi、HF Machiel Van Der Loos、Elizabeth A Croft 和 Aude Billard。2021。用于人机非语言冲突协商的犹豫手势设计。*ACM* 人机交互汇刊（*THRI*）10, 3 (2021), 1–25。[17] AJung Moon、Daniel M Troniak、Brian Gleeson、Matthew KXJ Pan、Minhua Zheng、Benjamin A Blumer、Karon MacLean 和 Elizabeth A Croft。2014。与我注视之处相会：共同注意注视如何影响人机交接时机。载于*2014*年 *ACM/IEEE* 人机交互国际会议论文集。334–341。[18] Robin R Murphy 和 Debra Schreckenghost。2013。人机交互指标综述。载于*2013*年第*8*届 *ACM/IEEE* 人机交互国际会议（*HRI*）。IEEE，197–198。[19] Heramb Nemlekar、Dharini Dutia 和 Zhi Li。2019。用于实现流畅人机交接的物体转移点估计。载于*2019*年国际机器人与自动化会议（*ICRA*）。IEEE，2627–2633。[20] Valerio Ortenzi、Akansel Cosgun、Tommaso Pardi、Wesley P Chan、Elizabeth Croft 和 Dana Kulić。2021。物体交接：机器人学综述。*IEEE* 机器人学汇刊37, 6 (2021), 1855–1873。[21] Matthew KXJ Pan、Vidar Skjervøy、Wesley P Chan、Masayuki Inaba 和 Elizabeth A Croft。2017。利用运动学特征自动检测交接。国际机器人研究期刊36, 5-7 (2017), 721–738。[22] Sina Parastegari、Bahareh Abbasi、Ehsan Noohi 和 Miloš Zefran。2017。建模人际物体交接中的人类伸手阶段，并应用于机器人与人的交接。载于*2017*年 *IEEE/RSJ* 智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。IEEE，3597–3602。[23] Joelle Pineau、Michael Montemerlo、Martha Pollack、Nicholas Roy 和 Sebastian Thrun。2003。迈向养老院机器人助手：挑战与成果。机器人与自主系统42, 3-4 (2003), 271–281。[24] Nicole L Robinson、Teah Neal Hicks、Gavin Suddrey 和 David J Kavanagh。2020。机器人自我效能感量表：机器人授课教程后，机器人自我效能感、好感度和互动意愿均有所提升。载于*2020*年 *IEEE/RSJ* 机器人与人交互通信国际研讨会。IEEE，电气与电子工程师学会，272–277。[25] Rinat Rosenberg-Kima、Yaacov Koren、Maya Yachini 和 Goren Gordon。2019。人机协作（HRC）：社交机器人作为小组培训活动的教学助手。载于*2019*年第*14*届 *ACM/IEEE* 人机交互国际会议（*HRI*）。IEEE，522–523。[26] Leimin Tian 和 Sharon Oviatt。2021。人机交互中的社交错误分类体系。*ACM* 人机交互汇刊（*THRI*）10, 2 (2021), 1–32。[27] Antoine Toisoul、Jean Kossaifi、Adrian Bulat、Georgios Tzimiropoulos 和 Maja Pantic。2021。在自然情境下估计面部连续效价和唤醒水平。《自然·机器智能》(2021)。https: //www.nature.com/articles/s42256-020-00280-0 [28] Vaibhav V Unhelkar、Shen Li 和 Julie A Shah。2020。面向序列式人机协作任务中双向通信的决策。载于*2020*年第*15*届 *ACM/IEEE* 人机交互国际会议（*HRI*）。IEEE，329–341。[29] Min Wu、Bertram Taetz、Ernesto Dickel Saraiva、Gabriele Bleser 和 Steven Liu。2019。人机交接任务中的在线运动预测与自适应控制。载于*2019*年 *IEEE* 先进机器人及其社会影响国际会议（*ARSO*）。IEEE，1–6。[30] Minhua Zheng、AJung Moon、Elizabeth A Croft 和 Max Q-H Meng。2015。机器人头部注视对机器人向人交接的影响。《国际社会机器人学杂志》7, 5 (2015), 783–798。