arXiv:2303.00362v2 [cs.HC] 8 Aug 2023

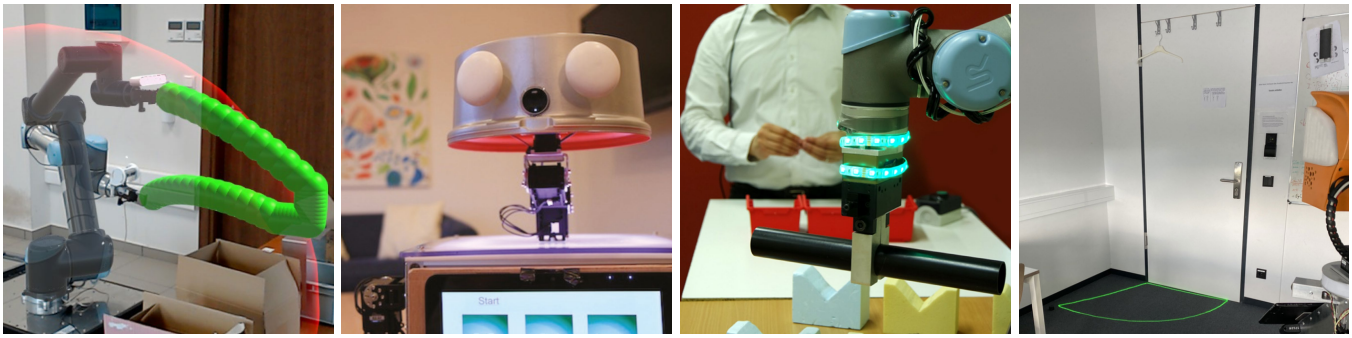
# 如何传达机器人运动意图：范围综述

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

Uwe Gruenefeld
uwe.gruenefeld@uni-due.de 杜伊斯堡-埃森大学，德国埃森

Stefan Schneegass
stefan.schneegass@uni-due.de
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



(a)运动 [121] (b)注意力 [68] (c)状态 [118] (d) 指令 [129]

**图 1：（a）机器人运动意图：机器人传达其预期运动（例如，在增强现实中呈现机器人预期运动路径的轨迹 [121]）。此外，我们的分析发现了另外三种意图类型，可补充机器人运动意图。（b）注意力：机器人试图吸引用户的注意力，以便用户随后进行运动活动（例如，通过移动整个机身 [68]）。（c）状态：机器人传达自身状态，使人类能够预测未来的运动，并在潜在冲突发生前识别冲突（例如，机器人借助彩色 LED 灯带传达其运动活动 [118]）。（d）指令：机器人旨在提供具体指令，以便人类协助后续运动（例如，请求打开一扇门 [129]）。**

## 摘要

机器人正日益普遍地融入我们的日常生活，为我们提供支持并执行自主任务。在人机交互中，人类参与者若能理解机器人的运动意图，便可避免任务失败并促进协作。近期，如何有效地向用户传达这一意图日益受到研究关注。然而，尚未形成用于系统化描述机器人运动意图的统一语言。本文提出一项范围综述，旨在整合现有知识。基于分析结果，我们提出一种意图沟通模型，通过不同的意图维度（意图类型、意图信息、意图位置）。我们讨论这些不同的意图维度，以及它们与不同类型的机器人和人类角色之间的相互关系。在整个分析过程中，我们依据意图沟通模型对现有研究文献进行分类，从而识别关键模式和未来研究的可能方向。

## CCS 概念

• **通用与参考** → **综述与概览**； • **以人为中心的计算**； • **计算机系统组织** →机器人学；

## 关键词

意图、运动、机器人、协作机器人、无人机、调查

**ACM参考格式：**
Max Pascher、Uwe Gruenefeld、Stefan Schneegass 和 Jens Gerken。2023年。如何传达机器人运动意图：范围综述。收录于 *2023*年*CHI*计算系统中的人为因素会议论文集（*CHI '23*），*2023*年*4*月*23*日至*28*日，德国汉堡。ACM，美国纽约州纽约市，17页。https://doi.org/10.1145/3544548.3580857

允许为个人或课堂使用而免费制作本作品的部分或全部内容的数字版或纸质副本，但不得为营利或商业利益而制作或分发副本，且副本必须附有本声明和首页上的完整引文。必须尊重本作品中第三方组件的版权。其他用途请联系所有者/作者。*CHI '23*，*2023*年*4*月*23*日至*28*日，德国汉堡 ©2023年版权归所有者/作者所有。ACM ISBN 978-1-4503-9421-5/23/04。
https://doi.org/10.1145/3544548.3580857

## 1 引言

人机交互（HCI）领域已经超越了传统的用户界面和交互技术。人工智能（AI）研究与开发的无处不在，要求本领域重新审视既有设计实践的适用性 [2, 107]。人类与人工智能的交互正逐渐从操作工具转变为更像是与伙伴互动，这一点对于人机交互（HRI）尤其值得关注 [54]。HRI领域在人机交互领域，尤其是在CHI社区中，已经被长期研究 [4, 66, 76, 91, 123]。例如，Arevalo Arboleda等人 [4] 和Villanueva等人 [123]研究了结合机器人与增强现实（AR）技术以实现直观远程操作的方法，而其他研究者则探索了对机器人群进行现场控制 [66] 和家用机器人 [76]，以及向人类传达情绪和意图 [91]。

机器人用途广泛，可以在工作场所为我们提供帮助、在家中支持我们，并陪伴我们出现在公共空间 [1, 9, 77]。机器人的应用多种多样，显著增强了人类的能力并提升了效率 [47]。机器人形态各异，其中机械臂尤其适用于多种不同场景，例如生产线 [15]和家庭护理 [97]。在这些场景中，它们被称为协作机器人，能够协助用户完成日常生活活动（ADL），例如吃喝、梳洗打扮或休闲活动。

机器人具有实体形态，因此往往会在人类所在的同一空间中移动和运行。随着自主程度不断提高，机器人能够有效进行近距离交互，因此人类与机器人之间需要形成共同理解。机器人研究从感知和路径规划的视角着手解决这一问题（例如人类感知导航 [70]），而人机交互领域（尤其是人机交互研究）则关注人类如何更好地理解机器人行为 [12, 100, 125]。在这一情境下，人类沟通中的微妙之处通常会丢失，因此需要从机器人自身的参考框架来理解其行为。机器人并非铁板一块；其类型多种多样，相应地，传递信息的方式也各不相同，这可能导致其人类交互对象产生错误解读。近距离情境日益增多，又带来了额外的复杂性，因为人们几乎没有时间识别并纠正错误。近年来，这促使大量研究尝试寻找有效方式，让机器人向用户传达其意图 [69]。这包括直接传达机器人在空间中的计划运动 [55],，也包括不那么显而易见的方式，例如吸引用户注意机器人 [68],、传达机器人的运动活动状态（例如处于活动状态，或因故障而处于非活动状态） [111],，以及通过传达机器人对外部世界的感知来促进人类监督 [58]。

尽管这些示例都关注于传达机器人运动意图，但它们在方法和目标方面差异显著。其他研究人员，如Suzuki 等人，随后将机器人运动意图确定为一个重要的研究领域 [114]。然而，除了进一步探索解决方案之外，该领域还需要对机器人运动意图这一概念形成共同理解（即我们所说的意图究竟是什么、哪些意图维度与之相关，以及机器人运动意图的传达如何影响机器人与人类之间的关系）。

为此，我们对文献中传达机器人运动意图的现有方法进行了范围综述。根据研究结果，我们提出了一个运动意图沟通模型，通过不同的意图维度（意图类型、意图信息和意图位置；见图 1）描绘机器人与人类之间的关系。我们还进一步讨论了这些不同意图维度及其与不同类型机器人和人类角色之间的相互关系。在整个分析过程中

-

析中，我们依据意图沟通模型对现有研究文献进行分类，构建用于传达机器人运动意图的设计空间。从业者和研究人员都可以进一步借鉴这项工作，设计和选择具体的机

-

制来传达运动意图。我们指出了未来的研究方向和当前的研究空白，并通过一个交互式网站进一步呈现；该网站列出了相关论文，并允许根据用户选择的类别进行比较。[1]

**我们的贡献**包含两个方面：1）综述性贡献，包括对以往文献的分析与分类，以及未来研究（参见Wobbrock 和 Kientz [130]的贡献）；2）理论贡献，提出一种意图沟通模型，并阐述其各实体之间的关系。

## 2 背景

本节将阐释传达机器人运动意图的必要性，并讨论该术语目前的理解，为我们的范围综述奠定基础。

机器人是一个统称，涵盖了各种能力、技术和外观各异的（半）自动化设备[53]。这些信息物理系统通常按其自由度（DoF），或按其移动和操控周围环境的能力加以区分。在工业装配线上，机械臂会搬运并焊接大型零件 [127],，且通常处于受限区域内 [60]。得益于轻质材料和安全传感器，机器人开始适应其用户——如今，当人类靠得太近，或检测到机器人运动受到阻力时，机器人便会停止运行。这促成了无围栏人机交互 [10], 的发展，也为更多应用场景铺平了道路，例如在日常生活中为残障人士提供支持 [98]。Ajoudani 等人在其综述论文中追溯了人机交互的多种方法、其演进历程，以及过去二十年来的发展 [1]。他们得出结论：人机交互之所以成功，是因为它将人类认知技能（即智能、灵活性以及应对意外事件的能力）与机器人的高精度和执行重复性任务的能力结合起来。

Matheson 等人提出了不同类型的此类无单元人机交互，其定义依据是交互的接近程度 [79]。其中包括共存（在空间上分离，但在时间上不分离）、同步（在空间上不分离，但在时间上分离）、合作（在空间和时间上均不分离，但仍未执行同一任务），以及协作（人类和机器人共同完成一项任务，其中一方的行动会立即对另一方产生影响）。这些研究表明，机器人与人类之间的通信和交互对于成功的人机交互至关重要。尽管以人为中心的导航研究旨在使机器人足够智能，以理解人类

[1]论文语料库交互式数据可视化 [21]。 https://rmi.robot-research.de，最后检索于2023年8月9日。

行为并对此作出反应 [70]，帮助人类理解机器人行为同样重要 [69]。正如Matheson 等人的研究所强调的那样，在人机交互中，人类和机器人日益共享同一物理空间，这使得传达机器人运动意图成为实现安全有效协作的一个尤为重要的方面，也是可解释机器人学 [79]的先决条件。

然而，机器人运动意图是一个相当模糊的术语，缺乏明确的定义。此外，该术语并未被该领域的研究人员一致使用。相反，类似的潜在概念通常以态势感知 [75], 即将进行的操作 [81], 或机器人信号系统 [118]等术语进行研究。Suzuki 等人在其涵盖增强现实与机器人学之间关系的广泛文献综述中，强调了基于增强现实的可视化在传达运动轨迹或机器人内部状态方面的潜力 [114]。然而，由于其文献综述的范围超出了意图传达，他们没有进一步讨论或定义不同类型的意图，也未能更深入地理解意图属性。

**我们的工作**通过开展范围综述，对该领域进行了系统概述，并应对当前问题。这类综述或综述性贡献有助于整理该领域已发表的研究，并使人们能够在该领域达到一定成熟度后，对以往研究结果进行反思 [130]。我们的综述旨在清晰理解并定义机器人运动意图、其属性及其在 HRI 中的关系。此外，我们的工作首次讨论了如何将 HRI 研究结果与自动化车辆（AVs）这一不断发展的领域联系起来，即所谓的外部人机界面（eHMIs）；该领域已发现类似的研究与设计挑战 [11, 29, 33, 34, 101]。

## 3 方法

范围综述概述了不断发展的研究领域的规模、范围和性质，有助于总结研究成果并识别研究机会 [5, 124]。我们的方法与 Ghafurian 等人 [49], 、Muñoz 等人 [86], 和 Wallkötter 等人 [126]的先前工作一致。我们采用了系统综述优先报告条目（*PRISMA*） [95] 指南，重点关注范围综述的系统综述与荟萃分析扩展版（*PRISMA-ScR*） [120]。

有关论文筛选流程各步骤的概览，请参阅图2。我们将在以下小节中讨论各步骤的具体细节。（1）根据对相关文献的初步筛选，我们确定了潜在的检索词，并使用该领域的三个主要数据库进行系统检索，即 HRI 的数据库（ACM数字图书馆、IEEE Xplore 和 ScienceDirect；参见第 3.1 节）。（2）基于对整个语料库的算法分析进行筛选，以确定与该主题相关性最高的术语（参见第 3.2 节）。（3）对由此得到的 822 篇论文进行两步人工筛选，最终通过核对入选论文中的参考文献，找到其他来源（参见第3.3节）。最终语料库由 77 篇论文组成。

### 3.1 初始检索

我们尝试了多种检索词及其组合，因为如前所述，该领域目前尚缺乏一致且确立的术语。此外，我们还发现有几个术语的用法存在歧义，尤其是通信 和运动等术语。因此，我们决定在第一步进行广泛检索，以提高查全率并降低遗漏相关文献的风险。我们的目标是在聚焦意图这一概念的同时，涵盖多种不同的机器人技术，尽管“意图”一词在各种情境中都可能出现。我们在数据库全文库的标题、摘要和关键词中检索了以下组合词：[2]

(机器人* 或 协作机器人* 或 无人机*) 且 (意图*或 打算*) (1)

### 3.2 算法筛选

由于我们的初始检索范围较广，因此需要进一步筛选以识别相关论文。初始结果集使我们能够采用一种算法方法，该方法与 O'Mara-Eves 等人 [93] 此前的研究方法类似。具体而言，我们应用词频-逆文档频率（TF-IDF） [103] 方法来识别语料库中频繁使用的术语。研究表明，TF-IDF 适用于文献综述中的信息检索 [74, 113]。首先，我们对条目进行预处理：a) 将每篇论文的标题、关键词和摘要合并到一个字段中；b) 修正编码问题，例如 &(与)、°(度)和 –(破折号)；c) 将字符串转换为小写，并从语料库中删除标点符号、数字、符号和标准英语停用词，再将词元替换为其词形还原形式 [78]。为了构建 TF-IDF 加权的文档-词项矩阵，我们计算了语料库中每个词项的词频（TF），同时考虑静态逆文档频率（IDF），并计算了每个词项在所有文档中的 TF-IDF。所得的 TF-IDF 加权文档-词项矩阵见 表1。从 TF-IDF 排序后的词元列表的前 150 项中，三位研究人员分别判定与通信和运动相关的术语——这两个术语由于存在词义歧义，我们决定不纳入初始的宽泛检索式。在随后的共识讨论过程中，我们排除了过于宽泛且含义模糊的相关术语（例如，“show”常用于“Our results show[...],”，“present”用于“In this work we present[...],”，“demonstrate”用于“We demonstrate in our results[...],”，或“perform”用于“We performed a study[...]”）。随后，我们将所有识别出的术语用于筛选步骤，并对语料库中每篇论文的标题、关键词或摘要应用以下逻辑：

(沟通* 或 视觉*或 反馈*)且 (运动*或 运动* 或 交互*) (2)

若要使论文被纳入，标题、关键词或摘要中必须出现“通信”词簇中的一个术语，以及“运动”词簇中的另一个术语（两者之间为或运算；整体为与运算）。最终，我们的语料库中剩下822篇论文。

[2]ScienceDirect 不支持通配符“*”，而是使用词干提取和词形还原技术。为了获得基于通配符“*”的搜索结果，我们将组合词修改为：(机器人 或 协作机器人 或 无人机 ) 且 ( 意图 或 意图 或 打算 或 预期 )。

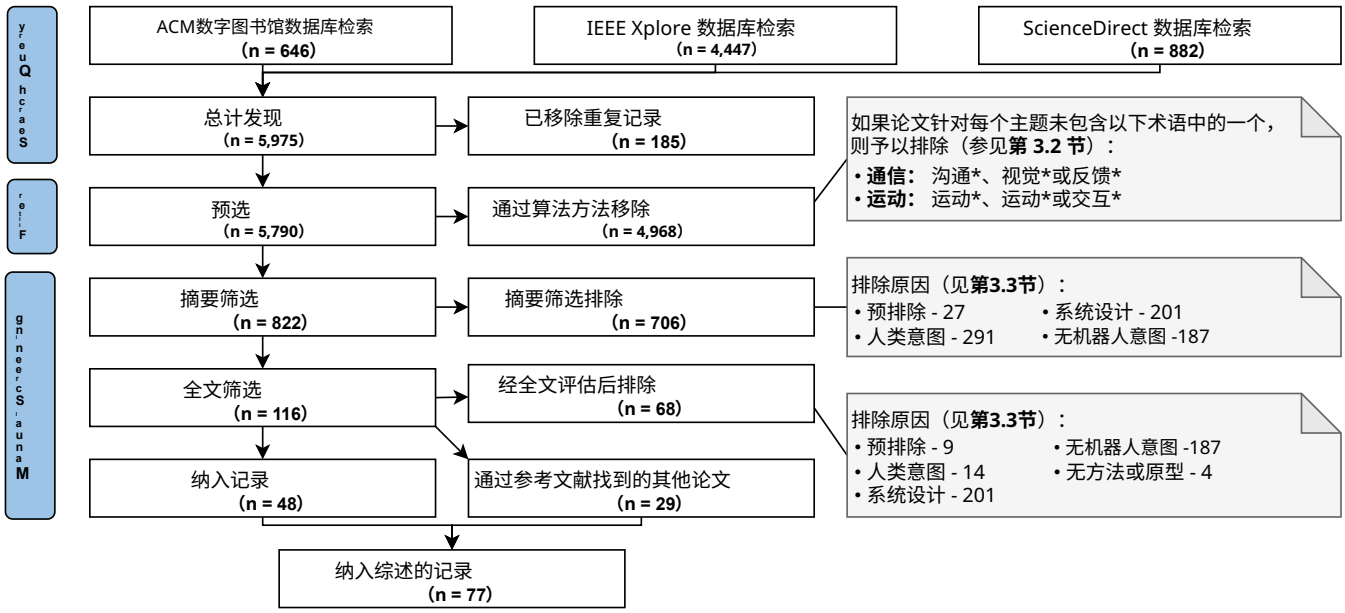



**图2：语料库筛选过程的流程图，其中包括出版商的识别和初始搜索查询（见 第 3.1 节）、通过算法筛选缩减集合（见 第 3.2 节）以及人工筛选（见 第3.3节），最终得到77篇论文。**

**表1：术语排序列表　　来自 TF-IDF 加权的文档-词项矩阵。选定的术语以粗体突出显示**

| Rank | Term | TF | IDF | TF-IDF | Rank | Term | TF | IDF | TF-IDF |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 人类 | 6,547 | 0.92 | 6,052.89 | 7 | **交互** | 3,383 | 1.33 | 4,515.61 |
| 2 | 控制 | 6,769 | 0.87 | 5,902.24 | 15 | **运动** | 1,920 | 1.88 | 3,606.34 |
| 3 | 系统 | 7,612 | 0.69 | 5,218.61 | 61 | **沟通** | 1,059 | 2.32 | 2,455.03 |
| 4 | **运动** | 3,640 | 1.42 | 5,154.59 | 140 | **反馈** | 665 | 2.74 | 1,820.08 |
| 5 | 模型 | 3,978 | 1.24 | 4,938.74 | 143 | **视觉** | 674 | 2.67 | 1,802.90 |

## 3.3 人工筛选

论文筛选流程的最后阶段要求进行人工筛选，所采用的方法类似于 Doherty 和Do- herty [35]。该流程包括 摘要筛选、全文筛选和参考文献筛选。在筛选所有摘要期间，我们认定822篇论文中有706篇不符合本综述的范围。对剩余116篇论文进行全文分析后，论文数量减至48篇。此外，我们还筛选了这116篇接受全文筛选评估的论文所引用的参考文献，并进一步发现29篇相关参考文献，随后将其纳入。这使最终论文集达到77篇，以下将对这些论文进行考察。在摘要和全文筛选期间，我们**预先排除了**语料库中仍存在的36篇格式不合适的论文，例如会议录前置内容、研讨会征稿启事、综述论文或基本重复的论文——当两篇论文本质上呈现相同贡献时，其中一篇是正在进行中的工作，另一篇是完整论文。我们还排除了305篇旨在传达**人类的意图**（传达给机器人）而非机器人的意图的论文（例如，Kurylo 和 Wilson [71]）。同样，我们还删除了210篇研究重点并非机器人的意图的论文运动（**无机器人意图**）。例如，1:1 远程操控设备（如，van Waveren 等人 [122]），或聚焦于自动驾驶车辆和外部人机界面的研究。我们还排除了另外 220 篇**系统设计**论文，这些论文关注美学、运动规划的数学模型或定义等方面（例如，Girard 等人 [51]）。最终，我们剔除了四篇未开发并报告任何方法或原型的论文（例如，Thellman 和 Ziemke [119]）。

## 4 意图传达模型

通过文献综述，我们旨在通过分析以往研究来增进对传达机器人运动意图的理解。为此，每位作者都对我们的文献语料库（n=77）进行了多步骤分析。在此过程中，我们发现有几篇论文呈现、结合或通过实证比较了多个意图（平均每篇论文超过两个）。因此，我们首先系统地提取了所有个体意图，共计172个意图。通过筛选这些意图，我们确定了主要实体（机器人、意图和人类），以及这些实体之间的一种通信流程，该流程与Schomaker [105]的人机交互模型相平行。然而，与人机交互模型不同，我们重点关注

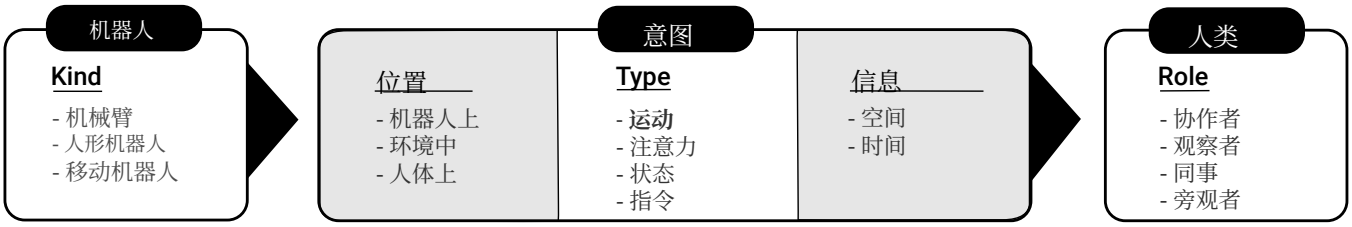



**图 3：从机器人到人类的意图传达模型概览。这三类实体（即机器人、意图、人类）及其维度源自我们的文献语料库。通信流程与 Schomaker 提出的人机交互模型相似 [105]。主要维度（即类型、类型、角色）将在第 4 节中讨论，而对意图信息和位置的深入分析则见第 5 节。**

机器人向人类传达意图，因为已有研究涵盖了相反方向的传达 [63]。此外，我们确定了一个顶层实体“目标”，用于描述传达意图的动机；以及一个底层实体“情境”，用于描述传达意图时所处的情况。综合考察所有实体后，我们通过以下问题分析这些意图：1）为什么传达这些意图（目标）；2）谁传达这些意图（机器人）；3）传达了什么（意图）；4）向谁传达这些意图（人类）；以及5）在什么情况下传达这些意图（情境）。通过对所提取答案进行开放式编码，数据中涌现出了维度、类别和属性；具体而言，我们确定了机器人种类、位置、意图类型、意图信息和人的角色这几个维度。最终形成的意图沟通模型如图3所示。下文将介绍我们针对三个主要实体（机器人、意图和人类）的研究发现，并通过示例对其进行定义和支持。我们还将讨论传达机器人运动意图的情境。

## 4.1 人类

在人机交互中，我们可以根据人类参与机器人所执行任务的程度，区分不同的场景。对于人类这一实体，我们利用机器人与人类之间不同的亲近程度来定义不同的人类角色。此外，四种人类角色均见图 4所示。

*4.1.1* 定义。人类在人机交互中发挥着至关重要的作用，并且会显著影响需要沟通哪些意图。根据对语料库中意图的分析，我们归纳出四种不同的人类角色（协作者、观察者、同事和旁观者）。这些角色按照人类与机器人协作和参与的程度排序，从参与程度最高的角色开始（见图 4）。这些角色也与人机交互的总体目标密切相关。我们发现，支持协作、监督和共存尤为重要。下文将定义不同角色，讨论它们与总体目标之间的关系，并通过示例加以说明。

协作者。 当人类扮演协作者的角色时，会与机器人在同一空间、同一时间共同完成一项任务 [79]。因此，在此情境下促进协作是机器人运动意图 通信的目的。其旨在促进机器人与人类在空间和时间上的行动协调，使他们能够共同完成一项任务（例如，制造场景中的人机装配团队 [3]）。双方（即机器人或人类）中一方的行动会立即影响另一方。例如，设想机器人将一个物体递给人类的情景 [37, 90]。在这种情况下，人类必须准确预判物体放置的时间和位置，并与之协调，以实现高效交接。为此，Dragan 等人 提出了一种采用所谓可理解运动的机械臂，使人类能够快速而确定地推断出运动目标 [37]。 协作者 这一角色代表了最紧密的人机交互关系，因为双方组成了一个彼此依赖的团队。在我们的文献语料库中，有 18 篇论文描述了协作者，并将其视为 37 种不同意图的接收者。

观察者。 当人类的主要工作是监督机器人执行任务时，他们便充当 观察者 。虽然他们大多只是观察，但 观察者 必须随时准备进行干预并接管机器人的控制。在此情境下，通信机器人运动意图 的目的是 支持监督。在这里，机器人必须向人类提供信息，以便在需要时进行有效干预。从根本上说，支持监督是指人类判断和评估机器人是否在其预定参数范围内运行的能力。例如，在 Hetherington 等人的研究中，机器人向观察者传达其运动路径，使 观察者 能够预见并防止机器人与障碍物发生潜在碰撞 [61]。其他研究则传达机器人的内部状态，使观察者 能够预判机器人自身问题可能导致的任务失败，例如传感器信息出错 [8, 58]。 观察者 在 47 篇论文中有所描述，并接收了 94 种意图。

同事。在同事角色中，人类在机器人旁边工作，但负责自己的任务。尽管这些任务可能是共同总体工作的一部分，也可能完全无关，但它们都在同一个共享工作空间中进行（例如，机械臂从两个物体中拾取一个，并将另一个留给人类 [72]）。在同事情境下，通信机器人运动意图旨在支持共存。在此情境中，人类需要理解机器人的运动，以避免安全关键情境（例如与机器人发生碰撞）。在Aubert 等人的研究中，机器人和人类从共享料箱中拾取物体，以完成各自的任务 [6]。在此情境中，通信机器人运动意图可以帮助人类协调行动，并避免与机器人发生碰撞。

Chadalavada

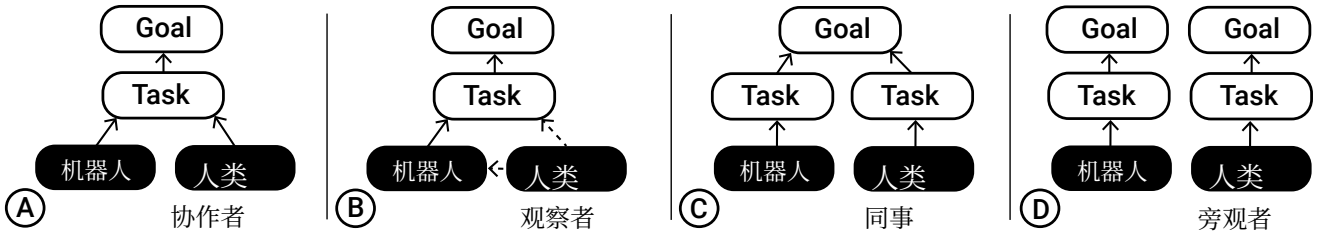



**图 4：四种人类角色的比较。进一步按照任务细分目标，以说明三个实体（人类、机器人和目标）之间的关系。A）人类（协作者）和机器人执行同一项任务。B）人类（观察者）观察机器人和任务，但不直接参与其中。C）人类（同事）和机器人执行不同的任务，但这些任务共同服务于同一目标。D）人类（旁观者）和机器人执行不同的任务，且这些任务服务于不同的目标。**

等人指出，通过空间增强现实（SAR）传达运动意图可以提升人们对移动机器人安全性的感知 [20]。在他们的研究中，这意味着参与者可以选择更安全的行走路径，并在不触发后续安全停机的情况下靠近机器人。在我们的文献语料库中，有六篇论文描述了同事，并且其是18种意图的接收者。

旁观者。当人类与机器人没有共同的任务或任务目标，但仍处于与机器人物理工作空间重叠的区域时，人类便是旁观者。与同事角色类似，旁观者角色涉及沟通机器人运动意图，以支持支持共存这一目标。旁观者需要运动信息来避免碰撞并感到安全。例如，设想一个人和一台机器人在走廊中相遇。为了让人能够选择一条避开碰撞的行走路径，机器人可以移到一侧，并提前沟通其预期运动路径 [84, 128]。17篇论文描述了旁观者，并将其列为23种意图的接收者。

## 4.2 意图

我们识别出四种不同类型的意图，机器人可以通过沟通人类来表达自身意图，从而提高透明度。在下文中，我们将这些类型视为对意图进行分类的主要维度。此外，我们还识别出位置和信息这两个维度，如图3所示，它们有助于进一步分类和描述意图。鉴于它们十分重要，我们将在第5节中单独讨论。

*4.2.1* 定义。由于我们的文献综述聚焦于沟通机器人运动意图，因此语料库中的大多数论文（占全部论文的69%；占所有独特意图的54%）都涉及运动意图。尽管如此，我们还识别出其他与运动意图相关且同等重要的意图类型（即注意力、状态和指令）。所有意图类型将在下文中介绍，并说明它们各自与运动的关系。此外，我们发现，对于每种意图类型，还可以进一步区分与机器人相关的意图和与世界相关的意图（更多详情见下文各段）。所有意图类型及相关论文的概览见表2。

运动。这些意图是主要的意图类型。运动意图关注的是明确传达未来的运动（即，机器人将执行的动作）。由于我们的调查聚焦于机器人运动意图，因此它涵盖了语料库中已识别出的独特意图的 50% 以上。大多数已描述的意图都涉及机器人自身动作，旨在指示机器人未来的运动。由此，用户或许能够更好地协调自身动作与机器人的行为，从而避免碰撞并提高安全性。例如，Chadalavada 等人采用空间增强现实来传达未来的运动方向以及机器人将采取的具体路径，这有助于旁观者在机器人叉车周围感到安全 [20]。世界动作是指操控机器人周围世界的活动。同样，这可能有助于旁观者协调他们的活动，同时也能帮助观察者理解何时应从机器人手中接管控制。Psarakis 等人在 VR 仿真中运用了世界动作这一概念，通过视觉方式增强显示机器人计划抓取的附近物体 [99]。

注意力。传达需要注意力的意图是一种支持性要素。它们先于 运动意图 出现，用于将人类的注意力转向机器人或相关过程，尤其是在人类的注意力无法得到保证时（例如，他们正专注于自己的任务）。例如，Bolano 等人 使用听觉反馈提醒人类，并在检测到可能发生碰撞时将其注意力转向机器人 [14]。一个 以机器人为中心的注意力 示例由 Furuhashi 等人 提出。他们基于商用 Roomba 设备设计了一种辅助机器人，将其作为听力犬，用于向聋人用户通知重要事件 [46]。在这里，系统通过轻轻撞击人类的身体，以物理触碰获得人类的注意力。作为 以世界为中心的注意力的示例，Mutlu 等人 让一个人形机器人迅速注视一个感兴趣的物体。他们研究了协作者是否能够理解机器人的注视线索，并正确识别出机器人选定为其感兴趣物体的物体（在多个其他物体之中） [89]）。

状态。机器人沟通自身状态，可让人类 推断其可能的后续运动，并在冲突发生前识别冲突。例如，传感器系统出现错误时，机器人 可能会与附近物体发生碰撞。然而，机器人沟通检测到的物体，能让人类 接管控制并缓解问题。对于状态意图，我们区分机器人自我感知和机器人世界感知：前者是指机器人 传达自身状态（例如，在显示屏上呈现简单的文本反馈，指出“停止”或“正在移动”等状态 [81]）；后者是指

**表2：不同意图类型概览，按类别和子类别排序，并列出相关论文（最多77篇）及独特意图（最多172种）的数量（及百分比）。注意：论文可能包含多个独特意图，因此可能出现在多个类别和子类别中。**

| 类别 | 子类别 | 数量 论文 (%) | 意图 (%) | 参考文献 |
|---|---|---|---|---|
| 运动 | 机器人自身动作 | 38 (49.35%) | 75（43.60%） | [3, 12–14, 16, 17, 20, 22, 24, 28, 31, 32, 36–38, 43, 45, 50, 55, 56, 59, 61, 64, 73, 80–84, 100, 102, 116, 121, 125, 128, 129, 131, 133] |
| | 世界动作 | 15（19.48%） | 18（10.47%） | [3, 6, 22, 26, 41, 42, 58, 62, 65, 67, 72, 85, 90, 96, 99] |
| 注意力 | 以机器人为中心的注意力 | 6 (7.79%) | 8 (4.65%) | [6, 14, 19, 25, 46, 68] |
| | 以世界为中心的注意力 | 4 (5.19%) | 5 (2.91%) | [75, 89, 110, 112] |
| 状态 | 机器人自我感知 | 23 (29.87%) | 27 (15.70%) | [3, 7, 8, 18, 30, 32, 39, 44, 56, 64, 75, 80, 81, 92, 106, 111, 115, 117, 118, 125, 129, 132, 133] |
| | 机器人世界感知 | 8 (10.39%) | 12 (6.98%) | [3, 22, 31, 32, 58, 102, 129, 133] |
| 指令 | 以机器人为中心的指令 | 10 (12.99%) | 16（9.30%） | [8, 19, 40, 46, 52, 68, 75, 87, 109, 118] |
| | 以世界为中心的指令 | 9（11.69%） | 11（6.40%） | [3, 8, 13, 16, 22, 23, 85, 99, 129] |

对感知到的世界状态进行通信（例如，以视觉方式突出显示环境中传感器系统成功检测到的物体，让用户能够预测并理解机器人接下来的运动 [58]）。

指令。 在多篇论文中，我们发现 指令 意图伴随着机器人运动。例如，如果 机器人 被障碍物挡住，它可以指示人类 移除障碍物，以便继续运动。 指令 可以是 以机器人为中心的指令，即以机器人自身为参照（例如，Moon 等人应用头部注视线索，向用户传达指令，使其完成将物体从机器人的夹爪中交接出去的任务 [85]）。相反，指令 也可以是 以世界为中心的指令，即以周围世界为参照（例如，机器人指示人类按下墙上的按钮以打开电梯，从而继续运动 [129]）。

*4.2.2* 与人类的关系。 向人类传达机器人的预期运动，有助于提升人们对机器人的行为的感知和理解。然而，对于那些例如未参与机器人任务的人类——可能是因为他们专注于自己的任务（同事），或通常只是未参与其中（旁观者）——往往需要额外的提示，才能理解机器人运动意图，因此有必要采用注意力 意图（例如通过声音提示 [6]）。状态 意图不仅能让人类看到下一步运动，还能了解内部状态和规划，从而使他们能够提前理解机器人的行动。这类意图还支持观察者监督机器人的任务。最后，协作意味着当人类和机器人共同完成一项共同任务时，负责方会不断发生转换。因此，运动、状态、注意力和指令 都是提供协作基线（协作者）所必需的意图。

## 4.3 机器人

在我们的语料库中，我们识别出三种不同的机器人类型，它们共同构成机器人 实体。

*4.3.1* 定义。我们识别出三种主要的机器人种类：机械臂、人形机器人和移动机器人。按此顺序，它们代表了根据部署区域划分的、机动性和灵活性逐渐增强的光谱：从固定式机器人（仍具有许多自由度）到天生具有移动能力的机器人（其中也包括安装在平台上、具有许多自由度的移动机械臂）。针对不同的机器人，研究人员考察了不同的意图，其研究频率各异。下文将通过文献语料库中的实例，展示每种机器人种类。

机械臂。机械臂可描述为由轴和连杆组成的链条。它们通常固定在一个位置，并配有操纵器 [48]。如今，它们已成为工厂生产线的行业标准 [15]，并在人机交互环境中与人类协同工作 [36]。机械臂见于 13 篇论文，共发出 22 种意图。

人形机器人。人形机器人配有两条带操纵器的机械臂、一个躯干、一个头部、眼睛，并且通常具有基本的面部表情。由于配有两条机械臂，人形机器人比单臂机器人拥有更多自由度。不过，人形机器人通常固定在一个位置，缺乏机动性。尽管如此，它们在共享工作空间中与人类协作时，是人机交互的重要组成部分 [73, 100]。少数情况下，它们能够在空间中移动，模仿人类的运动。此时，机器人的拟人特征——例如注视或某些手势——可以缩短预测机器人意图所需的时间 [50]。人形机器人见于 11 篇论文，共发出 21 种意图。

移动机器人。 随着机动性的增加，灵活性也随之提高。移动机器人 可以部署在空中、地面或水中。对于这类机器人，我们主动选择将其定义得更宽泛，纳入

在语料库中仅出现一次的机器人。对于 移动机器人 （也称为无人机），我们区分了 不带机械手、在各个位置之间移动的地面无人机 、带机械手的地面无人机，它们也能操控周围环境；还有 飞行无人机，它们在空中穿行；以及 水面及水下无人机，它们在水面或水下运行。沟通运动意图 有助于 不带机械手的地面无人机 例如，引导或跟随人类前往特定地点 [52]。这也有助于 带机械手的地面无人机 例如，传达它们打算拾取哪个物体 [22]。 飞行无人机 或 水面及水下无人机则可以通过按特定模式飞行或行驶来传达其运动意图 [92, 115]。所有类型的无人机都可以单独出现 [28]，也可以组成无人机群 [17]。移动机器人 在 53 篇论文中有所描述，共发出 129 个意图。

*4.3.2* 与意图的关系。随着移动机器人能够更自由地移动，它们经常会遇到与其路径交叉的人类旁观者。因此，移动机器人通常必须先将人类的注意力引向机器人的显示屏，使其为接收机器人预期运动的通信做好准备。例如，机器人前方的投影可以吸引旁观者的注意力，同时告知其行驶方向 [80]。与此同时，移动机器人需要提前传达其状态和动作规划，包括内部状态（例如，当前的任务状态是什么 [75]）或感知到的世界状态（例如，检测到了哪些物体 [32]）。另一方面，人形机器人和机器人手臂通常部署在协作场景中，与人类组成团队。在此，机器人需要传达其预期运动，以便与人类协作者协调动作（例如，机器人打算接下来从共享料箱中拾取哪些物品 [6]，或者何时将物体交给协作者 [90]）。

## 4.4 情境

情境描述了人机交互场景的设置。虽然位置是情境的重要组成部分，但情境还涉及更多内容，例如社会环境 [104]。尽管如此，我们认为位置有助于界定人机交互场景。在分析中，我们发现了多种位置类型，包括工作场所、家庭环境和户外环境。在工作场所环境中，机器人通常是装配线或更广义上的制造流程的一部分（例如，与人类工人协作 [118]）。不过，工作场所也包括工业环境、办公室或一般的工作室。总计有42篇论文以工作场所为场景。在家庭环境中，机器人协助完成家务任务（例如，从厨房餐桌上拿起杯子 [37]）。我们在此类情境中发现了5篇相关论文。最后，有两篇论文中的机器人可以在户外自由移动（例如，执行任务并传达其状态 [39]）。除此之外，还有28篇论文未指定具体位置，而是研究更为一般的机器人运动意图场景（例如，只说明机器人在两个位置之间移动，却未详细说明这些位置 [81]）。对于这些场景，哪些位置最为相关尚不明确。

# 5 意图信息与位置分析

除上一节讨论的不同意图类型外，数据中还呈现出意图的另外两个维度：意图信息（指由机器人传达的数据）和意图位置（描述意图从何处传达给人类）。本节将对这些维度加以定义，通过示例说明其应用，并概述有关其使用情况的实证研究结果。

## 5.1 意图信息

根据我们对意图如何传达以及传达什么内容的分析，我们归纳出两项用于对意图信息进行分类的主要属性：空间属性和时间属性。

*5.1.1* 空间属性。传达空间信息的主要方法是将其直接嵌入环境中，也就是使其**空间注册**。我们识别出105个符合条件的意图。还可以进一步将这类意图分为传达局部信息（74个意图）或方向性信息（31个意图）。局部信息旨在通过显示精确位置，将信息与周围空间准确关联起来；该位置自然也可能包含方位信息。Han 等人举例说明，他们通过使用 SAR 多边形可视化，在桌面上框定并突出显示检测到的物体，从而传达局部信息，使人类观察者能够监督机器人的预期运动和操作动作 [58]。相比之下，方向性信息旨在传达明确的运动方向（例如，用箭头指示运动方向 [20]，或指向某个物体或相关人员 [62]）。

然而，**空间中未注册**的信息采用空间属性的抽象编码。总计，我们确定了 67 个匹配的意图。此类别包括以下意图类型：描述、符号和信号。描述（11 个意图）适用于使用文本或口头信息的情境（例如，机器人在开始执行触碰动作之前，通过口头方式告知人类 [26]）。符号（25 个意图）适用于使用符号表示来形成意图通信的情形（例如，移动机器人在朝目的地移动之前点头，请求人类跟随 [40]）。信号（31 个意图）适用于通过开启或关闭组件来表示变化的情形（例如，开启声音提示，以引起注意，为即将进行的运动意图通信做准备 [6]）。迷你地图提供抽象但具有地理特征的编码，其中包含环境中不同物体之间的关系 [23, 125, 133]。

**实证启示**。 虽然 空间注册的信息在现实世界中的物体与显示的信息之间建立了直接联系，但 空间中未注册 的信息缺乏这种联系，需要额外的心理步骤来建立联系。因此， 空间中未注册 的信息可能不够直观，因此研究人员探索了不同的信息组合来缓解这一问题。 Andersen 等人 以及 Wengefeld 等人表明，将多种 空间中未注册 的意图信息（例如文本 描述 和 符号 图标）结合起来，有助于有效地向用户传达运动意图 [3, 129]。另一方面， Staudte 和 Crocker 发现，将两类信息（已注册和未注册）结合起来——在他们的研究中，具体表现为机器人注视某个特定物体，同时播放该物体的口头描述——能够使用户成功感知并理解信息 [112]。类似地，Bolano 等人 随后表明，将目标的口头描述与运动终点的视觉反馈结合起来，也能实现同样的改善 [14]。

*5.1.2* 时间属性。 意图 信息 的时间属性涉及拥有 离散 或 连续 信息流之间的区别。 **离散** 信息在时间上具有固定且明确的呈现形式，有利于传达机器人运动意图 ，因为它使人类能够检测到变化（即信息出现），并指示信息在何时失去相关性（即信息消失）。例如， Aubert 等人为其人形机器人配备了一个显示屏，用于显示机器人将要前往的下一个料箱编号，从而使人类能够避免与机器人发生冲突 [6]。总体而言，我们识别出89种传达 离散 信息的意图。 **连续** 信息已在83种意图中得到提供，它贯穿整个任务或多个任务阶段（即无论其与当前任务的相关性如何，始终可见）。它使人类能够观察机器人，将其与现实世界进行比较，并评估任务是否正确执行。 Tsamis 等人，例如，为头戴式显示器（HMD）实现了增强现实可视化，通过在机械臂周围放置半透明的红色球体，持续传达机械臂的预期运动空间 [121]。

**实证启示**。 Faria 等人 表明，离散和连续信息对于传达球形机器人发出的跟我来意图均有效 [40]。 Koay 等人 也使用一只引导听力损失者的机器狗，评估了这两种时间属性。然而，他们发现，基于运动的方法（连续）比闪烁发光二极管（LED）灯带（离散）更有效；在这种方法中，机器狗通过头部动作示意用户跟随。他们认为这是因为头部动作更容易理解 [68]。 Aubert 等人 的研究结果表明，结合离散和连续信息是最有效的方法。他们发现，结合基于运动的方法（连续）和显示屏方法（离散来传达机器人运动终点，其效果优于单模态意图传达条件 [6]。

*5.1.3* 交叉关系。 从本质上说，每种意图信息都具有空间和时间属性。下文将介绍意图信息这些属性之间的关系。

对于空间中未注册的情况，时间属性在离散信息和连续信息之间几乎均匀分布。这里，信号是个例外，因为离散信息（23 种意图；例如，在移动机器人上安装闪烁灯光，以指示运动方向发生离散变化，类似于汽车 [61]）比连续信息（8 种意图；例如，在机器人上安装 LED 灯带，通过彩色编码进度条持续传达与目标位置之间的剩余距离 [8]）更常见。信号主要用于传达突发变化。因此，这类离散事件通常会以离散意图信息的形式自然地传达。

对于空间注册，我们看到两个子类别的分布都不均衡。被归类为局部 的信息意图大多以连续 信息的形式沟通（50 个意图；例如，使用 SAR 持续突出显示工作场所中机器人在运动和执行任务期间将活动的区域 [3]） ，而非离散 信息（24 个意图；例如，使用 SAR 突出显示墙上的一个按钮，人类必须按下该按钮，机器人才能继续运动 [129]） 。我们认为，机器人的运动 很可能与连续事件有关，因为它会随时间发生，并且持续进行。被归类为方向性的信息意图大多以离散 信息的形式沟通（23 个意图；例如，在移动机器人顶部安装一个显示屏，用箭头表示预期运动方向 [81]） ，而很少以连续 信息的形式沟通（8 个意图；例如，在增强现实中将无人机显示为一只眼睛，使其始终朝向运动方向 [125]） 。这是因为方向 主要用于向人类传达更新后的运动方向，因此，最常见的方式是将其作为离散 信息提供。

## 5.2 意图位置

各种技术都可用于传达机器人运动意图。我们发现，尤其是这些技术的部署位置（机器人上、环境中和人体上）有助于对文献中的不同方法进行分类，因为技术的部署位置与特定技术类型之间往往存在关联。

机器人上还可进一步分为仅机器人技术或额外的机器人附着 式设备。我们发现，通过机器人上技术沟通的意图共有 114 种。以仅机器人这一子类别为例， Moon 等人利用机器人的头部朝向模拟注视线索，将空中位置作为其预期运动的指令传达给用户 [85]。在所有使用机器人上技术的已分类意图中，近一半属于这一子类别。这一点尤其值得关注，因为它减少了对额外技术的需求，而且通常会模仿人际互动行为。机器人附着 式子类别则需要在机器人上安装一些额外硬件（例如空间增强现实、发光二极管或显示器）。例如， Wengefeld 等人将激光投影系统安装在机器人上，以此传达多种类型的意图，包括状态、运动和指令 [129]。

环境中在文献中受到的关注相对较少。例如，这类方式包括安装在工作空间物体箱旁的小型显示器 [6], ，或桌面显示器（用于可视化运动意图） ，以及放置在机器人工作空间旁的扬声器（用于吸引注意力） [14]。从普适性角度来看，无法改变环境或许不太理想，但对于某些技术而言，这反而带来了显著优势。尤其是，固定投影仪位置在环境中更易于实现空间增强现实，而且可以扩大投影区域。我们发现了八种不同的环境中意图。

人体上 包括 头部附着 式 技术，主要指头戴式显示设备，可实现更复杂的可视化。 Gruenefeld 等人例如，尝试了不同的空间可视化方式，例如将预期运动路径可视化、预览机械臂未来的位置，或将整个活动区域可视化 [55]。此外，一些方法依赖于 手持式 技术。 Correa 等人例如，使用平板设备显示多种类型的信息（地图、实时视图、后续步骤） ，以支持监督并传达 运动意图 [32]。我们识别出 50 种 人体上意图。

**实证启示**。 对于 意图位置而言，通常最好将信息输出在更靠近目标的位置。例如， LeMasurier 等人 比较了几种基于运动和基于灯光的方法，用于让人形机器人 在装配工作场所传达预期的运动起始位置。他们发现，位于最靠近工作空间处的 LED 手环最容易被注意到，也最不容易引起混淆 [73]。此外，研究人员发现，人类可能更倾向于使用人体上 的技术，而不是机器人上

的技术。例如，Che 等人证明，与仅采用基于机器人的方法并使用清晰的运动相比，用户佩戴振动触觉手环能够更好地表达机器人的运动意图 [24]，减少用户付出的努力，并在避碰运动过程中提高用户对机器人的信任。最后，结合多种输出技术可以进一步提升性能。例如，Mullen 等人 研究了一种用于在分拣场景中传达机器人干扰的多模态方法，该方法结合了增强现实头戴显示器可视化和通过振动触觉手环提供的主动反馈。他们发现，同时结合这两种反馈类型的效果优于单模态基线。这使人类能够更高效地教导机器人，并减少所需的交互时间 [87]。

## 5.3 位置与信息之间的关系

下面我们将探讨 意图位置 与意图信息 (参见 表3)。

5.3.1 空间注册。为了传达空间注册的位置信息，大多数研究人员依赖头部附着式技术，例如增强现实头戴式显示器（人体上）。例如，Tsamis 等人实现了增强现实可视化，用于传达机械臂的预期运动轨迹 [121]。他们沿着三维空间中从机器人的末端执行器到特定目的地的既定路径放置小球体。他们发现，使用该系统提升了任务完成效率，并减少了机器人空闲时间，同时降低了对整体工作流程的干扰。此外，用户表示对机器人的安全感和信任感有所提升。相比之下，Correa 等人提出了一种平板电脑可视化方案，显示移动机器人的实时摄像头画面，并通过可视化中的线框突出显示其环境中识别出的物体 [32]。除了显示在人体上的意图信息外，机器人也常通过特定运动或指向（机器人上）直接传达信息。例如，Holladay 等人使用机械臂及其末端执行器，通过指向桌上的物体来传达方向提示 [62]。据报告，这些指向配置让新手用户更容易推断目标物体。Hetherington 等人提供了另一个在机器人上显示信息的例子。他们使用空间增强现实，在地面上沿移动机器人的预期运动方向投影箭头 [61]。结果表明，与闪烁灯光相比，投影箭头具有更高的社会可接受性，也更容易理解。最后，空间注册的信息可以输出到环境中。例如，Cleaver 等人使用其基于网络的环境 [27]，比较了在环境固定显示器上可视化移动机器人预期运动轨迹的四种不同条件 [28]。相比之下，Aubert 等人在三个料箱上放置小型显示器，并使用料箱编号和进度条指示协作机器人接下来会从哪个料箱中取出物品。然而，这种基于显示器的方法未能显著减少物理冲突的数量 [6]。

*5.3.2* 空间中未注册。 有趣的是，相对较多的符号信息是通过机器人自身（机器人上）传达的。在此，我们发现了许多方法：机器人执行特定的运动模式，人类需要对其进行适当解读。LeMa-surier 等人 [73]采用了一种符号化方法。他们使机器人的机械臂略微向左、向右移动，以传达预期运动的起始信号。这种方法在多项指标上获得了相对较高的评价；然而，作者建议，在工作空间附近及运动起点处增设光信号（例如 LED 手环），可能有助于共享空间中的人机交互。 Song 和 Yamada提供了一个符号类型的示例：在机器人附着式彩色 LED 灯带上使用不同的静态和动态光模式，以展示机器人的不同状态 [109]。信号信息主要通过机器人附着式技术实现，例如 LED 或音频扬声器。可穿戴技术也可以展示空间中的未注册信息（人体上）。Che 等人提出了一种由用户佩戴的振动触觉手环，用于传达移动机器人已启动的避碰运动 [24]。这种方法使机器人的运动意图表达得更加清晰，降低了用户的付出，并增强了用户对机器人的信任。此外，Walker 等人在增强现实可视化一角实现了一个雷达式小地图，用于展示用户与无人机的相对位置 [125]。尽管该雷达为用户提供了快速定位机器人相对于自身位置的手段，但一些参与者提到，他们并不需要经常使用雷达，因为他们始终面向无人机。最后，未注册信息也可以呈现于环境中。Bolano 等人提出，除了共享工作空间中放置的屏幕外，还可以通过扬声器口头描述机器人末端执行器更新后的目的地 [14]。他们发现，用户能够更好地理解机器人的预期运动，包括机器人必须重新规划路径以避免碰撞的情况。

*5.3.3* 离散。 离散 信息通常直接呈现于 机器人上。作为一种机器人附着式 技术的示例，Domonkos 等人在机械臂底座上安装了一条彩色 LED 灯带，以向人类同事 [36]。相比之下，Glas 等人提出了一种移动机器人，它会做出头部手势，向人类发起跟随请求或引领请求 [52],，依靠机器人本身，属于仅机器人方式。 Gu 等人评估了通过增强现实头戴式显示器（人体上）呈现视觉反馈的效果，该反馈通过箭头可视化指示机器人的计划运动方向 [56]。他们发现，该可视化提升了感知安全性和任务效率。Mullen 等人Mullen 等人没有依赖视觉模态，而是提出通过振动触觉手环提供离散反馈；手环会被激活以传达机器人干扰，促使人类移动，从而让机器人继续运动 [87]。研究结果表明，振动反馈可以缩短察觉并回应意图所需的时间。Aubert 等人在环境中的料箱（可从中挑选物品）上配备扬声器，以发出离散听觉信息（世界范围内） [6]。他们建议不要单独依赖听觉信息，而应采用多模态方法；Bolano 等人 [14] 的研究也支持这一建议。

*5.3.4* 连续型。 与离散型信息一样，连续型信息主要显示在机器人上。 Matsumaru 等人在机器人上安装了全向显示器，投射出类似眼球的视觉呈现，有效地向人类传达运动方向 [82]。相比之下，Dragan 等人提出让机械臂本身执行可理解动作，以传达它接下来将抓取的物体 [37],，他们发现这种方式能够实现流畅协作。作为在人类上传达意图的例子，Walker 等人

**表3：不同属性的意图信息（按行）与意图位置（按列）组合下的意图概览——每个类别最多列出三个参考文献示例。请注意，每种意图都具有空间属性和时间属性。**

| 类别 | 子类别 | 人体上 | | 环境中 | 机器人上 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 头部附着式 | 手持式 | | 仅机器人 | 机器人附着式 |
| （空间）已注册 | 局部 | **35** [55, 100, 125] | **3** [32, 128] | **4** [6, 14, 28] | **22** [12, 16, 37] | **10** [31, 61, 129] |
| | 方向性 | **3** [56, 102, 125] | **0** | **0** | **14** [62, 84, 85] | **14** [20, 61, 81] |
| （空间）未注册 | 描述 | **0** | **1** [32] | **1** [14] | **0** | **9** [80, 112, 129] |
| | 符号 | **5** [125, 133] | **0** | **1** [23] | **14** [52, 68, 73] | **5** [3, 7, 109] |
| | 信号 | **0** | **3** [24, 25, 87] | **2** [6, 14] | **0** | **26** [36, 116, 118] |
| **总计** | | **43** (25.00%) | 7 （4.07%） | **8** (4.65%) | 50 （29.07%） | 64 （37.21%） |
| (时间)离散 | | **15** [56, 90, 99] | **4** [24, 25, 87] | **5** [6, 14] | **19** [46, 50, 73] | **45** [19, 40, 131] |
| (时间)连续 | | **28** [22, 121, 133] | **3** [32, 128] | **3** [14, 23, 28] | **31** [17, 18, 37] | **19** [30, 58, 82] |

在增强现实头戴式显示器中显示聚焦眼部晶状体的符号表示，以编码与下一个目标的相对距离 [125]。他们的结果表明，用户对机器人运动意图的理解显著提高。 Watanabe 等人提出通过平板电脑呈现连续型视觉反馈，以告知轮椅乘客机器人的预期运动路径 [128]。最后，连续型信息可以显示在环境中。Chandan 等人提出了一种用于固定式平板电脑显示器的地图可视化方案，持续显示三台移动机器人及其他相关物体的位置 [23]。他们发现，这种方法显著提高了参与者观察机器人并协助机器人的能力。同样，尽管仅在基于网页的实验中进行研究，Cleaver 等人提出了一种显示在二维屏幕上的三维可视化方案，用于持续传达移动机器人的预期路径 [28]。

## 6 讨论与未来研究

接下来，我们将讨论文献综述中的主要发现，并提出未来研究方向，作为给人机交互领域的启示。本节按照意图沟通模型中的三个要素——人类、意图和机器人——展开，最后讨论整体模型。

人类。 根据对语料库中意图的分析，我们归纳出四种不同的人的角色(协作者、观察者、同事和旁观者）。在分析中，我们发现人的角色与沟通运动意图的总体目标密切相关——根据特定的人的角色，可以直接推导出具体目标。例如，如果人机交互场景中人类扮演观察者的角色，那么运动意图就需要有助于加强监督。因此，这表明从业者和研究人员应明确界定角色，进而确定所涉及的人类利益相关者，然后再决定使用何种机器人或希望沟通哪些特定意图。通过自下而上的分析过程发现的人类角色，与 Onnasch 和 Roesler [94]的先前研究十分吻合。与Onnasch 和 Roesler的研究不同，操作员这一角色并未出现在我们的分析中。我们认为，这是因为在我们的语料库中，机器人并非由人类手动操作；若是如此，机器人便无需沟通任何意图。

语料库中，机器人并非由人类手动操作，因为这不需要机器人沟通任何意图 [54]。

**未来研究**：我们的分析显示，几乎所有论文都 a）研究单个的人类角色，例如（通常是隐式地）选定一个角色并聚焦于此；b）只针对并研究人类与机器人之间 1:1 的关系。仅有的例外是Faria 等人、Kirchner 等人和Palinko 等人，他们研究机器人运动对一群人而言的可理解性 [42]，或探索如何利用注视线索，让机器人从一群人中选择人类协作伙伴 [67, 96]。多用户群体参与有限，这在一个新兴领域中当然是意料之中的，因为该领域首先需要确立一些基本事实。让多个人，甚至多个机器人与多个人参与其中，会极大地增加人机交互的复杂性；然而，我们认为这是研究必须迈出的下一步。尤其值得探讨的是特定技术是否适用（例如，与头戴式显示技术相比，空间增强现实可能更适合满足多用户场景的需求）。

意图类型。 通过对机器人运动意图进行范围综述，我们发现，运动的通信通常需要额外的意图，作为所沟通的运动意图的前置或后续环节。此外，我们发现，机器人运动也可以通过间接方式进行沟通：例如，仅传达机器人的状态（如 [8]），或者指示人类打开一扇门，以便机器人继续沿路径前进（如 [128]）。这些多种意图类型 展现了机器人运动意图的不同侧面，既包括实际预期的运动轨迹，也包括相关的通信。我们认为这是一个关键发现，使我们的工作有别于以往主要关注运动意图 通信的研究 [100, 114, 125]。通过这项综述，我们相信，其他研究人员将开始更全面、更准确地使用“机器人运动意图 ”这一术语，并着手强调相关意图的必要性，正如我们在分析中所发现的那样。

**未来研究**：研究人员应探讨如何最好地结合不同的意图类型，以实现特定的意图

传达目标。目前，关于机器人何时以及在多大程度上需要先传达注意力，才能有效地传达运动意图，例如，我们还缺乏实证知识。未来研究还应对我们对意图类型的分类提出质疑，并考虑对其进行扩展。

意图信息和位置。我们归纳出两个主要属性，用以对识别出的意图信息进行空间分类：空间注册（61.05%）和空间中未注册（38.95%）。这种近乎均等的分布表明，许多相关研究不仅关注旨在传达局部或方向性信息的内容（例如生成轨迹[28]），也关注更抽象的表征，即描述、符号和信号。这些表征通常简单得多，表明机器人运动意图无需借助未来运动的视觉三维表征也能传达。这说明，穿戴特殊的身体穿戴式技术并非唯一可行方案；替代方案可以降低系统成本并缩短设置时间。另一种选择是机器人上的意图位置。以往研究人员通过为机器人增添拟人化元素（如类眼特征或特定的运动手势）来传达运动意图。我们的文献综述发现了 15 个此类实例，具体做法是运用眼神或头部注视（例如通过注视某个物体来表示人类与机器人之间的交接 [85]）。拟人化元素可能不如通过技术手段实现的数字表征（例如增强现实中的可视化）精确，但它们与人际协作（HHC）具有相同的基础。一般认为，用户能够轻松理解这些元素，而且它们大多可以整合到实际的人机交互中。若与口头描述相结合，还能为用户提供多模态输出，从而更快地识别特定物体 [112]。

**未来研究**：尽管此前的研究探讨了空间已注册信息与未注册信息的组合 [112],，但据我们所知，尚无研究对比过它们的有效性。因此，目前的设计决策可能更多地取决于特定技术是否可用，而较少考虑预期结果。未来研究应进一步探索这一问题，以便从业者能够更准确地判断简单或复杂的信息与相关技术应用之间可能存在的权衡。关于拟人化特征的使用，研究已探讨了整合此类沟通线索在可理解性方面的表现，以及其传达机器人运动意图的有效性。然而，它们可能产生的隐含影响（例如，使人类将类人的行为归因于机器人）或许仍有待充分探索。沟通方式和线索会对人类与机器人之间的信任关系产生重大影响 [57]。

机器人。观察研究中使用的三种机器人 及其用途，可以发现，机器人的物理属性对沟通方式有很大影响，尤其是用于传达意图的机器人上 位置。有些机器人预装了显示器，有些则内置了拟人化特征。相比之下，飞行无人机需要某种远程通信工具（通常是头戴式显示器）才能进行远距离通信。机器人也是技术实验频繁涉及的领域，例如，许多研究人员会自行制造或定制机器人。比如，可以为机械臂添加拟人化特征。因此，研究人员倾向于使用这些内置或定制的特征来传达意图。他们通常可能只有某一种机器人可用，因此只能以特定方式传达机器人运动意图。当然，这限制了当前研究结果的普适性，因为每种机器人都有独特的特征，可能会影响人机交互。

**未来研究**：这些发现表明，许多研究只探索了某些类型的机器人。因此，有必要采取更系统的方法，研究各种类型的机器人及其对传达机器人运动意图的影响。我们还发现，越来越多的研究采用虚拟现实（VR）中的仿真环境来探索人机交互（HRI）。尽管如此，我们仍需要更多研究来验证这些发现，并为其普遍适用性提供更广泛的依据。

情境。与以往关于自动驾驶车辆的研究 [29, 33] 和外部人机界面的研究相比， [34], 尽管使用情境和机器人技术存在显著差异，我们仍能发现若干相似之处。Colley 等人 发现，将增强虚拟性（AV）处理的内部信息进行可视化，可以通过使人们感知车辆的检测能力（及其失误）来校准信任，同时只会带来较低的认知负荷 [29]。Currano 等人 探讨了抬头显示器的复杂程度、驾驶风格与情境意识之间的交互作用 [33]。在外部人机界面领域，研究人员已能区分不同 信息的性质 （例如危险区和安全区） [34]。这与我们所确定的意图类型相对应，凸显了所提供的意图对用户而言具有不同含义。在自动驾驶车辆的情境中，用于形成实际意图的信息主要未在空间中注册。它采用文本、符号和音频提示。意图主要描述车辆状态（例如自动驾驶/人工驾驶、巡航、让行），或向行人提供建议/指令（例如允许其安全过马路）。两个研究领域之间的显著差异主要源于汽车研究中的标准化，例如道路、道路标志、道路标线和限制规定。尽管如此，两者仍存在潜在的重叠之处。

**未来研究**：在我们看来，这两个领域的研究人员尚未开展多少跨领域合作，例如，可以将已证明在一个领域有效的运动意图 技术转移到另一个领域。我们可以设想，如果采用更全面的视角，未来研究将使双方都受益。尤其是，自动驾驶车辆外部人机界面的研究可以借鉴人机交互领域更具探索性的技术方法，例如使用增强现实头戴式显示器，并运用更先进的可视化技术来沟通运动意图。虽然这些方法在短期内可能并不适用，因为此类设备尚未达到消费级使用的条件，但未来几年情况或许会有所改变。

模型。该整体模型是对当前有关机器人运动意图文献的抽象概括。它可视为对当前机器人意图传达设计空间认知的总结，展示了所有组成部分并突出了它们之间的联系。因此，未来研究人员和从业者可在此类人机交互场景的设计阶段将该模型用作指导和检查清单，从而受益于该模型；也就是说，在其引导下，仔细思考并确定不同类型的意图，以及是否应以空间或时间方式编码意图信息。此外，该模型有助于统一机器人运动意图 的表述方式，从而支持

研究人员和从业者查找相关工作，并帮助识别研究空白。

**未来研究：** 我们邀请研究人员积极挑战该模型，从而进一步推动这一领域的发展。他们应仔细审视设计空间的分类是否足够充分，或者如何扩展设计空间，以及为涵盖未来研究需要如何扩展。由于我们的模型是基于对文献语料库的分析而建立的，因此它适用于已收集的研究。尽管如此，未来发表的新研究成果可用于重新审视和评估该模型（即考察新成果是否仍可用我们的模型描述）。此外，我们认为，在外部人机界面情境下展开更深入的讨论，并纳入其他关注意图传达的研究方向（例如Sodhi等人或Müller等人 [88, 108]。

## 7 结论

本文主要作出两项贡献：1）综述性贡献，包括对既有文献的分析与分类，以及对未来研究方向的探讨；2）理论贡献，提出意图沟通模型，并描述其实体、维度及底层属性之间的关系。特别是，我们的研究强调，机器人运动意图需要从更广阔的机器人意图视角来理解，其中包含一些乍看之下似乎与运动无关的意图类型。然而，在分析中，我们发现，注意力、状态和指令 是传达明确的运动意图之前或之后的重要环节，且往往不可或缺。我们还发现，只有少数论文明确讨论或呈现了其旨在传达的意图类型，而且对意图信息或位置的描述也不够清晰。我们的研究旨在帮助研究人员今后更好地依据建议的维度调整研究工作，从而更便于评估和比较不同研究。因此，我们希望为关于机器人意图（甚至超越运动范畴）的统一语言奠定基础。从实践角度来看，依据我们的意图沟通模型 对现有研究文献进行分类，有助于研究人员和从业者理解传达机器人运动意图的设计空间。作为一个新兴领域，大量研究致力于探索以各种方式传达机器人运动意图 的新方法和解决方案。我们已确定未来研究需要关注的多个方面。不过，我们想再次强调，最重要的是，该领域需要对不同方法进行更系统的分析和比较，以加深对不同意图维度和属性所产生影响的理解。我们相信，本文提出的意图沟通模型为此类研究提供了基于实证推导的基础，并可为其提供启发与指导。

## 参考文献

标有 • 的参考文献属于本次综述的论文集。


[1] Arash Ajoudani、Andrea Maria Zanchettin、Serena Ivaldi、Alin Albu-Schäffer、Kazuhiro Kosuge 和 Oussama Khatib。2017 年。人机协作的进展与前景。*Autonomous Robots* 42, 5（2017 年 10 月），957–975。https://doi.org/10.1007/s10514-017-9677-2

[2] Saleema Amershi、Dan Weld、Mihaela Vorvoreanu、Adam Fourney、Besmira Nushi、Penny Collisson、Jina Suh、Shamsi Iqbal、Paul N. Bennett、Kori Inkpen、Jaime Teevan、Ruth Kikin-Gil 和 Eric Horvitz。2019 年。人类与人工智能交互指南。载于*2019 年 CHI*会议人因工程论文集

19计算系统中的人为因素会议论文集——CHI '19，2019年5月4日至9日，英国格拉斯哥。ACM，纽约州纽约市，美国，1–13。https://doi.org/10.1145/3290605.3300233。

[3] • https://doi.org/。/。Rasmus S. Andersen、Ole Madsen、Thomas B. Moeslund 和 Heni Ben Amor。2016。将机器人意图投射到人类环境中。载于《2016年第25届IEEE机器人与人类交互通信国际研讨会》（RO-MAN）。IEEE，294–301。https://doi.org/10.1109/ROMAN.2016.7745145。/

[4] ROMAN.。Stephanie Arevalo Arboleda、Franziska Rücker、Tim Dierks 和 Jens Gerken。2021。利用增强现实视觉提示辅助机器人远程操作中的操作与抓取。载于《2021年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》（日本横滨）（CHI '21）。计算机协会，美国纽约州纽约市，文章728，14页。https://doi.org/10.1145/3411764.3445398。/。Hilary Arksey 和 Lisa O'Malley。。范围综述：迈向一种方法论框架。《国际社会研究方法学杂志》8，1（2月2005）[5]，19–32。https://doi.org/10.1080/1364557032000119616。/。Miles 2005

[6] • C. Aubert、Hayden Bader 和 Kris Hauser。。为工业人机团队设计用于冲突避免的多模态意图沟通策略。载于《2018年第27届IEEE机器人与人类交互通信国际研讨会》（RO-MAN）。IEEE，1018–1025。https://doi.org/10.1109/ROMAN.2018.8525557[7] • Alexandra Bacula、Jason Mercer 和 Heather Knight。2020。面向工厂机器人的易理解灯光通信。载于《2020年ACM/IEEE人机交互国际会议伴随会议》，Tony Belpaeme、James Young、Hatice Gunes 和 Laurel Riek（编）。ACM，美国纽约州纽约市，119–121。https://doi.org/10.1145/3371382.3378305。/。Kim Baraka、Stephanie Rosenthal 和 Manuela Veloso。2016。利用表现性灯光增强人类对移动机器人状态与动作的理解。载于《2016年第25届IEEE机器人与人类交互通信国际研讨会》（RO-MAN）。IEEE，652–657。https://doi.org/10.1109/ROMAN.2016.7745187[9] Andrea Bauer、Dirk Wollherr 和 Martin Buss。2008。人机协作：一项综述。《国际人形机器人学杂志》05，01（2008），47–66。https://doi.org/10.1142/S0219843608001303[10] Wilhelm Bauer、Manfred Bender、Martin Braun，以及 Rally、Peter und Scholtz、Oliver。2016。手工装配中的轻型机器人——从简单做起：考察企业使用轻型机器人的初期经验。

[8] •

https://www.edig.nu/assets/images/content/Studie-Leichtbauroboter-Fraunhofer-IAO-2016-EN.pdf

[11] Pavlo Bazilinskyy、Dimitra Dodou 和 Joost de Winter。2019。外部人机界面概念综述：文本、颜色和视角的影响。《交通研究F辑：交通心理学与行为》67（2019），175–194。https://doi.org/10.1016/j.trf.2019.10.013。Christopher Bodden、Daniel Rakita、Bilge Mutlu 和 Michael Gleicher。2018。用于合成意图表达型机械臂运动的灵活基于优化的方法。《国际机器人研究杂志》37，11（2018），1376–1394。https://doi.org/10.1177/0278364918792295。Gabriele Bolano、Yuchao Fu、Arne Roennau

[12] •

和 Ruediger Dillmann。2021。在共享工作空间中利用增强现实部署多模态通信。载于《2021年第18届普适机器人国际会议》（UR）。IEEE，302–307。https://doi.org/10.1109/UR52253.2021.9494689。/UR。。

[13] •

Gabriele Bolano、Arne Roennau 和 Ruediger Dillmann。2018。通过为运动重新规划加入直观的视觉与听觉反馈，实现透明化机器人行为。载于《2018年第27届IEEE机器人与人类交互通信国际研讨会》（RO-MAN）。IEEE，1075–1080。https://doi.org/10.1109/ROMAN.2018.8525671[15] Sara Bragança、Eric Costa、Ignacio Castellucci 和 Pedro M. Arezes。2019。工业4.0中协作机器人的应用概述：人的角色与安全。施普林格国际出版，尚，641–650。https://doi.org/10.1007/978-3-030-14730-3_68

[16] • Maya Cakmak、Siddhartha S. Srinivasa、Min Kyung Lee、Sara Kiesler 和 Jodi Forlizzi。2011。利用空间与时间对比实现流畅的机器人与人类之间的交接。载于《第六届人机交互国际会议论文集——HRI '11》，Aude Billard、Peter Kahn、Julie A. Adams 和 Greg Trafton（编）。ACM出版社，美国纽约州纽约市，489。https://doi.org/10.1145/1957656.1957823[17] • Beatrice Capelli、Cristian Secchi 和 Lorenzo Sabattini。2019。通过运动进行通信：多机器人系统的可理解性。载于《2019年多机器人与多智能体系统国际研讨会》（MRS）。IEEE，126–132。https://doi.org/10.1109/MRS.2019.8901100。/MRS.。Jessica R. Cauchard、Kevin Y. Zhai、Marco Spadafora 和 James A. Landay。2016。人机无人机交互中的情绪编码。载于《2016年第11届ACM/IEEE人机交互国际会议》（HRI）。IEEE，263–270。https://doi.org/10.1109/HRI.2016.7451761。/HRI.。Elizabeth Cha 和 Maja Mataric。2016。利用非言语信号在人机协作中请求帮助。载于《2016年IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议》（IROS）。IEEE，5070–5076。https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759744

[18] •

[19] •

[20] • Ravi Teja Chadalavada、Henrik Andreasson、Maike Schindler、Rainer Palm 和 Achim J. Lilienthal。2020。利用空间增强现实和眼动追踪眼镜进行双向导航意图通信，以提升人机交互中的安全性。《机器人与计算机集成制造》61（2020），101830。[21] Tathagata Chakraborti、Jungkoo Kang、Christian Muise、Sarath Sreedhatan、Michael Walker、Daniel Szafir 和 Tom Williams。2023。TOBY：用于探索学术综述论文数据的工具。载于 arXiv:2306.10051。[22] • Tathagata Chakraborti、Sarath Sreedharan、Anagha Kulkarni 和 Subbarao Kambhampati。2018。面向混合现实工作空间中有人参与的机器人操作的投影感知任务规划与执行。载于《2018年IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议》（IROS）。IEEE，4476– 4482 10 1109 2018 8593830 。https://doi.org/ 。/IROS.。Kishan Chandan、Vidisha Kudalkar、Xiang Li 和 Shiqi Zhang。 [未注明日期。]基于协商的人机协作：通过增强现实实现。https://doi.org/ 10 48550 1909 11227 。/arXiv.。Yuhang Che、Allison M. [24] • Okamura 和 Dorsa Sadigh。2020。通过显式与隐式的人机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 2020 2964824 。/TRO.。Yuhang Che、Cuthbert T. Sun 和 [25] • Allison M. Okamura。2018。利用触觉通信避免人机碰撞。载于《2018年IEEE机器人与自动化国际会议》（ICRA）。IEEE，5828–5834。https://doi.org/ 10 1109 2018 8460946 。/ICRA.。Tiffany L. Chen、 [26] • Chih-Hung King、Andrea L. Thomaz 和 Charles C. Kemp。2011。被机器人触碰。载于《第六届人机交互国际会议论文集——HRI '11》，Aude Billard、Peter Kahn、Julie A. Adams 和 Greg Trafton（编）。ACM出版社，美国纽约州纽约市，457。https://doi.org/ 10 1145 1957656 1957818 。/。Andre Cleaver、Darren [27] Tang、Victoria Chen 和 Jivko Sinapov。2020。HAVEN：基于Unity的虚拟机器人环境，用于展示基于人机交互的增强现实。https://doi.org/10.48550/ARXIV.2011.03464[28] • Andre Cleaver、Darren Vincent Tang、Victoria Chen、Elaine Schaertl Short 和 Jivko Sinapov。2021。用于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会议》，Cindy Bethel、Ana Paiva、Elizabeth Broadbent、David Feil-Seifer 和 Daniel Szafir（编）。ACM，美国纽约州纽约市，339–343。https://doi.org/ 10 1145 3434074 3447188 。/。Mark Colley、Benjamin Eder、Jan [29] Ole Rixen 和 Enrico Rukzio。2021。语义分割可视化对高度自动化车辆中的信任、情境意识和认知负荷的影响。载于《2021年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》。ACM。https://doi.org/10.1145/3411764.3445351[30] • Emily C. Collins、Tony J. Prescott、Ben Mitchinson 和 Sebastian Conran。2015。MIRO。载于《第十二届计算机娱乐技术进展国际会议论文集》，Adrian David Cheok、Mohd Shah Sunar、Ken Neo 和 Yoram Chisik（编）。ACM，美国纽约州纽约市，1–4。https://doi.org/ 10 1145 2832932 2832978 。/。Michael D. Coovert、 [31] • Tiffany Lee、Ivan Shindev 和 Yu Sun。2014。空间增强现实作为移动机器人传达预期运动的一种方法。《人类行为中的计算机》34（2014），241–248。https://doi.org/ 10 1016 2014 02 001 。/j.chb.。。Andrew Correa、 [32] • Matthew R. Walter、Luke Fletcher、Jim Glass、Seth Teller 和 Randall Davis。2010。与自动驾驶叉车进行多模态交互。载于《2010年第五届ACM/IEEE人机交互国际会议》（HRI）。IEEE，243–250。https://doi.org/10.1109/HRI.2010.5453188[33] Rebecca Currano、So Yeon Park、Dylan James Moore、Kent Lyons 和 David Sirkin。2021。Little Road驾驶抬头显示器：抬头显示器的复杂度影响驾驶员对自动化车辆的感知。载于《2021年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》。ACM。https://doi.org/10.1145/3411764.3445575[34] Debargha Dey、Azra Habibovic、Andreas Löcken、Philipp Wintersberger、Bastian Pfleging、Andreas Riener、Marieke Martens 和 Jacques Terken。2020。驯服外部人机界面丛林：用于指导、比较和评估自动化车辆外部人机界面设计原则的分类体系。《交通研究：跨学科视角》7（2020），100174。https://doi.org/ 10 1016 2020 100174 。/j.trip.。Kevin Doherty 和 Gavin Doherty。2018。人机交互中的经验建构：理解自我报告。《国际人机研究杂志》 110 2018 63 74 10 1016 2017 10 006 [35] （），–。https://doi.org/ 。/j.ijhcs.。。Mark Domonkos、Zoltan Dombi 和 J [36] • anos Botzheim。 。面向人机交互的基于LED灯带的机器人运动意图标志。载于《2020年IEEE第二十届计算智能与信息学国际研讨会》（CINTI）。IEEE， 121 126 10 1109 51262 2020 9305854 –。https://doi.org/ 。/CINTI 。 。Anca D. Dragan、Shira Bauman、Jodi Forlizzi 和 Siddhartha S. Srinivasa。2015。机器人运动对人机协作的影响。载于《第十届 [37] • ACM/IEEE人机交互国际会议论文集》，Julie A. Adams、William Smart、Bilge Mutlu 和 Leila Takayama（编）。ACM，美国纽约州纽约市， 51 58 10 1145 2696454 2696473 –。https://doi.org/ 。/。Anca D. Dragan 和 Siddhartha Srinivasa。《生成可理解的运动》。载于《机器人学：科学与系统》。[39] • Brittany A. Duncan、Evan Beachly、Alisha Bevins、Sebasitan Elbaum 和 Carrick Detweiler。2018年。小型无人航空系统交流性飞行路径研究 * 本研究获得 NSF NRI 1638099 的支持。载于 2018年IEEE机器人与自动化国际会议（ICRA）。IEEE， 602 609 10 1109 2018 8462871 –。https://doi.org/ 。/ICRA。 [38] • Miguel Faria、Andrea Costigliola、Patricia Alves-Oliveira 和 Ana Paiva。2016年。跟随我：用球形机器人传达意图。载于 2016年第25届IEEE机器人与人类交互通信国际研讨会（RO-MAN）。IEEE， 664 669 10 1109 2016 7745189 –。https://doi.org/ 。/ROMAN。Miguel Faria、Francisco S. Melo 和 Ana Paiva。。《理解机器人：让机器人在多方交互中更易理解》。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， 1031 1036 10 1109 50785 2021 9515485 –。 [41] • https://doi.org/ 。/RO-MAN。Miguel Faria、Rui Silva、Patricia Alves-Oliveira、Francisco S. Melo 和 Ana Paiva。2017年。“我和你在一起”运动对多用户协作任务的影响。载于 2017年IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议（IROS）。IEEE， 2793 2798 10 1109 2017 8206109 –。https://doi.org/ 。/IROS。Kerstin Fischer、Lars C. Jensen、Stefan-Daniel Suvei 和 Leon Bodenhagen。2016 2016 25 。可理解性与接触之间：注视在机器人接近中的作用。载于第 届IEEE机器人与人类交互通信国际研讨会（RO-MAN）。IEEE， 646 651 10 1109 2016 7745186 –。 [43] • https://doi.org/ 。/ROMAN。Paul Fletcher、Angeline Luther、Brittany Duncan 和 Carrick Detweiler。《无人机手势可感知性及视角变化影响研究》。载于 2021年IEEE机器人与自动化国际会议（ICRA）。IEEE，3531–3537。https://doi.org/10.1109/ICRA48506.2021. 9561094 [45] • Morten Roed Frederiksen 和 Kasper Stoey。2019年。增强非情感型机器人的音频表达模态。载于 2019年第八届情感计算与智能交互国际会议（ACII）。IEEE，144– 149 10 1109 2019 8925510 。https://doi.org/ 。/ACII。Michihiko [46] • Furuhashi、Tsuyoshi Nakamura、Masayoshi Kanoh 和 Koji Yamada。2015年。将基于触摸的信息从仿助听犬的机器人传递出去。载于 2015年IEEE模糊系统国际会议（FUZZ-IEEE）。IEEE， 1 6 10 1109 2015 7337981 –。https://doi.org/ 。/FUZZ-IEEE。Rinat R. Galin 和 Roman V. Meshcheryakov。《人机交互效率与人机协作》。施普林格国际出版，尚， 55 63 10 1007 978 3 030 37841 7_5 –。 [47] https://doi.org/ 。/ - - - - Rahul Gautam、Ankush Gedam、Ashish Zade 和 Ajay [48] Mahawadiwar。2017年。工业机械臂发展综述。《国际工程与技术研究期刊》（IRJET）4卷03期（2017）。[49] Moojan Ghafurian、Jesse Hoey 和 Kerstin Dautenhahn。2021年。用于照护痴呆症患者的社交机器人：系统综述。《人机交互期刊》 10, 4, 41 2021 31 10 1145 3469653 文章（9月），页码。 [50] • https://doi.org/ 。/ Michael J. Gielniak 和 Andrea L. Thomaz。《在机器人运动中生成预期》。载于 2011年 RO-MAN。IEEE，449–454。https://doi.org/10.1109/ROMAN.2011.6005255[51] Alexandre Girard、Jean-Philippe Lucking Bigué、Benjamin M. O'Brien、Todd A. Gisby、Iain A. Anderson 和 Jean-Sébastien Plante。2015年。表现出线性行为的软性双自由度介电弹性体位置传感器。《IEEE/ASME机电一体化汇刊》20卷1期（2015），105–114。https://doi.org/10.1109/TMECH.2014.2307006[52] • Dylan F. Glas、Takahiro Miyashita、Hiroshi Ishiguro 和 Norihiro Hagita。2007年。Robopal：对人机交互中的角色转换进行建模。载于《2007年IEEE机器人与自动化国际会议论文集》。IEEE，2130–2137。https://doi.org/ 10 1109 2007 363636 。/ROBOT。Michael A. Goodrich 和 Alan C. [53] Schultz。2008年。人机交互：综述。《人机交互基础与趋势》1卷3期（2008），203 275 10 1561 1100000005 –。https://doi.org/ 。/ Jonathan Grudin。《从 [54] 工具到伙伴：人机交互的演变》。《以人为中心的交互综合讲座》10卷1期（2017），i–183。 [55] • Uwe Gruenefeld、Lars Prädel、Jannike Illing、Tim Stratmann、Sandra Drolshagen 和 Max Pfingsthorn。2020年。Mind the ARm。载于《人类与计算机会议论文集》，Bernhard Preim、Andreas Nürnberger 和 Christian Hansen（编）。ACM，美国纽约州纽约市，259–266。https: //doi.org/ 10 1145 3404983 3405509 。/。Morris Gu、 [56] • Akansel Cosgun、Wesley P. Chan、Tom Drummond 和 Elizabeth Croft。2021年。透视墙壁：在增强现实中可视化移动机器人。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，406–411。https://doi.org/10.1109/RO-MAN50785.2021.9515322[57] Adriana Hamacher、Nadia Bianchi-Berthouze、Anthony G. Pipe 和 Kerstin Eder。2016年。相信 BERT：利用表达性沟通增强信任并减少实体人机交互中的操作错误。载于 2016年第25届IEEE机器人与人类交互通信国际研讨会（RO-MAN）。493–500。https://doi.org/10.1109/ROMAN.2016.7745163

[58] • Zhao Han、Alexander Wilkinson、Jenna Parrillo、Jordan Allspaw 和 Holly A. Yanco。2020年。投影映射实施：直接外化感知结果和行动意图，以提升机器人可解释性。2020年AAAI-FSS人工智能研讨会论文集（2020）。https://doi.org/ 10 48550 2010 02263 。/arXiv。Jinying He、Anouk van Maris 和 [59] • Praminda Caleb-Solly。2020年。研究空间人机交互中不同交互模态的有效性。载于 Tony Belpaeme、James Young、Hatice Gunes 和 Laurel Riek（编）的《2020年ACM/IEEE国际人机交互会议伴随论文集》。ACM，美国纽约州纽约市，239–241。https://doi.org/10.1145/3371382.3378273[60] Abdelfetah Hentout、Mustapha Aouache、Abderraouf Maoudj 和 Isma Akli。2019年。工业协作机器人技术中的人机交互：2008—2017年十年文献综述。《高级机器人学》33卷15-16期（2019），764–799。https://doi.org/ 10 1080 01691864 2019 1636714 。/。Nicholas J. [61] • Hetherington、Elizabeth A. Croft 和 H. MachielF. van der Loos。2021年。嘿，机器人，你要往哪儿走？人机空间交互中的非言语运动可理解性线索。《IEEE机器人与自动化快报》6, 3 2021 5010 5015 10 1109 2021 3068708 ( )，– 。https://doi.org/ 。/ [62] • LRA。Rachel M. Holladay、Anca D. Dragan 和 Siddhartha S. Srinivasa。2014年。可理解的机器人指向。载于《第23届IEEE机器人与人类交互通信国际研讨会》。IEEE，217–223。https://doi.org/10.1109/ROMAN.2014.6926256[63] Siddarth Jain 和 Brenna Argall。2019年。辅助机器人技术中用于共享自主的概率性人类意图识别。《人机交互期刊》9卷1期，文章 2 2019 23 10 1145 3359614 （12月），页码。 [64] • https://doi.org/ 。/ Gunnar Johannsen。2002。《移动系统方向和状态的听觉显示》。载于《2002年听觉显示国际会议论文集》。[65] • Doğancan Kebüde、Cem Eteke、Tevfik Metin Sezgin 和 Barş Akgün。2018年。伸手抓取运动的交流线索：从人类到机器人。载于《第17届自主智能体与多智能体系统国际会议论文集》（AAMAS '18）。自主智能体与多智能体系统国际基金会，南卡罗来纳州里奇兰，874–882。[66] Lawrence H. Kim、Daniel S. Drew、Veronika Domova 和 Sean Follmer。2020年。用户定义的群体机器人控制。载于《2020年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》（美国夏威夷州檀香山）（CHI '20）。计算机协会，美国纽约州纽约市，1–13。https://doi.org/10.1145/3313831.3376814[67] • Nathan Kirchner、Alen Alempijevic 和 Gamini Dissanayake。2011年。利用模仿注视线索实现非言语机器人群体交互。载于《第六届人机交互国际会议论文集 - HRI '11》，Aude Billard、Peter Kahn、Julie A. Adams 和 Greg Trafton（编）。ACM出版社，美国纽约州纽约市， 497 10 1145 1957656 1957824 。https://doi.org/ 。/。K. L. [68] • Koay、G. Lakatos、D. S. Syrdal、M. Gacsi、B. Bereczky、K. Dautenhahn、A. Miklosi 和 M. L. Walters。2013年。嘿！门口有人。利用助听犬的视觉通信信号传达意图的助听机器人。载于 2013年IEEE人工生命研讨会（ALife）。IEEE，90–97。https: // doi.org/10.1109/ALIFE.2013.6602436[69] Danica Kragic、Joakim Gustafson、Hakan Karaoguz、Patric Jensfelt 和 Robert Krug。2018年。交互式协作机器人：挑战与机遇。载于《第27届国际人工智能联合会议论文集》（瑞典斯德哥尔摩）（IJCAI'18）。AAAI出版社，美国加利福尼亚州帕洛阿尔托，18–25。[70] Thibault Kruse、Amit Kumar Pandey、Rachid Alami 和 Alexandra Kirsch。2013年。具有人类意识的机器人导航：综述。《机器人与自主系统》 61, 12 2013 1726 1743 10 1016 2013 05 007 ( )，– 。 [71] 2019 https://doi.org/ 。/j.robot.。Ulyana Kurylo 和 Jason R. Wilson。《利用人类眼睛注视模式作为社会辅助机器人提供协助需求的指示信号》。载于《社交机器人学》，Miguel A. Salichs、Shuzhi Sam Ge、Emilia Ivanova Barakova、John-John Cabibihan、Alan R. Wagner、Álvaro Castro-González 和 Hongsheng He（编）。施普林格国际出版，尚，200–210。[72] • Mai Lee Chang、Reymundo A. Gutierrez、Priyanka Khante、Elaine Schaertl Short 和 Andrea Lockerd Thomaz。2018年。整合意图识别与沟通对人机协作的影响。载于 2018年IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议（IROS）。IEEE，3381–3386 10 1109 2018 8593359 。https://doi.org/ 。/IROS。Gregory [73] • LeMasurier、Gal Bejerano、Victoria Albanese、Jenna Parrillo、Holly A. Yanco、Nicholas Amerson、Rebecca Hetrick 和 Elizabeth Phillips。2021年。共享工作空间中人机协作的机器人意图表达方法。《ACM人机交互汇刊》10卷4期（2021），1–27。https://doi.org/ 10 1145 3472223 。/ Ivan Lerner、Perrine Créquit、 [74] Philippe Ravaud 和 Ignacio Atal。2019年。使用词嵌入进行自动筛选，在更新动态网络荟萃分析时实现高灵敏度并减少工作量。《临床流行病学杂志》 108 2019 86 94 10 1016 2018 12 001 （4月），– 。 [75] • https://doi.org/ 。/j.jclinepi.。Florent Levillain、David St-Onge、Giovanni Beltrame 和 Elisabetta Zibetti。2019年。迈向基于机器人群体运动的态势感知。载于 2019年第28届IEEE机器人与人类交互通信国际会议（RO-MAN）。IEEE， 1 6 10 1109 46459 2019 8956381 – 。 [76] 2011 https://doi.org/ 。/RO-MAN 。 。Kexi Liu、Daisuke Sakamoto、Masahiko Inami 和 Takeo Igarashi。 。Roboshop：用于机器人家务分配与管理的多层草图界面。载于《SIGCHI计算机系统中的人为因素会议论文集》（加拿大不列颠哥伦比亚省温哥华）（CHI '11）。计算机协会，纽约州纽约市，647–656。https://doi.org/10.1145/1978942.1979035[77] Hamza Mahdi、Sami Alperen Akgun、Shahed Saleh 和 Kerstin Dautenhahn。2022。社交机器人设计与演进综述——过去、现在与未来。《机器人与自主系统》156（2022），104193。https://doi.org/10. 1016 2022 104193 /j.robot. 。Christopher D. Manning、Prabhakar [78] Raghavan 和 Hinrich Schütze。2008。《信息检索导论》-。剑桥大学出版社，剑桥。[79] Eloise Matheson、Riccardo Minto、Emanuele G. G. 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 10 3390 8040100 （） 。 [80] • 2006 https://doi.org/ 。/robotics Takafumi Matsumaru。 。采用投影设备预告即将进行的运动并显示相关功能的移动机器人。载于《ROMAN 2006——第15届IEEE机器人与人类交互通信国际研讨会》。IEEE，443–450。https://doi.org/10.1109/ROMAN.2006.314368[81] • Takafumi Matsumaru。2007。采用平板显示器预告即将进行的操作并提供指示功能的移动机器人。载于《2007年IEEE机器人与自动化国际会议论文集》。IEEE，1774–1781。https://doi.org/10.1109/ROBOT.2007.363579[82] • Takafumi Matsumaru、Kazuya Iwase、Kyouhei Akiyama、Takashi Kusada 和 Tomotaka Ito。2005。以眼球表情预告并显示机器人后续运动的移动机器人。《Autonomous Robots》 18, 2 2005 231 246 10 1007 10514 005 0728 8 （） ，–。 [83] • 2006 https://doi.org/。/s - - - Takafumi Matsumaru、Takashi Kusada 和 Kazuya Iwase。 。使用光线预告即将进行运动的移动机器人。载于《2006年IEEE/RSJ智能机器人与系统国际会议》。IEEE， 1516 1523 10 1109 2006 281981 – 。 [84] • https://doi.org/ 。/IROS. 。Masahiko Mikawa、Yuriko Yoshikawa 和 Makoto Fujisawa。2018。通过头部旋转运动表达遥操作移动机器人的意图。载于《2018年IEEE第15届先进运动控制国际研讨会（AMC）》。IEEE， 249 254 10 1109 2019 8371097 – 。https://doi.org/ 。/AMC. 。 [85] • AJung Moon、Daniel M. Troniak、Brian Gleeson、Matthew K.X.J. Pan、Minhua Zheng、Benjamin A. Blumer、Karon MacLean 和 Elizabeth A. Croft。2014。跟随我的注视，与我会面。载于《2014年ACM/IEEE人机交互国际会议论文集》，Gerhard Sagerer、Michita Imai、Tony Belpaeme 和 Andrea Thomaz（编）。ACM，纽约州纽约市，334–341。https://doi.org/ 10 1145 2559636 2559656 . / 。John [86] Edison Muñoz 和 Kerstin Dautenhahn。2021。Robo Ludens：社交交互机器人多人游戏的游戏设计分类体系。《人机交互期刊》10，4，文章32（2021年7月），28页。https://doi.org/10.1145/3451343[87] • James Mullen、Josh Mosier、Sounak Chakrabarti、Anqi Chen、Tyler White 和 Dylan Losey。2021。利用被动增强现实和主动触觉反馈传达推断目标。《IEEE机器人与自动化快报》6，4（2021），8522–8529。https://doi.org/10.1109/LRA.2021.3111055[88] Florian Müller、Martin Schmitz、Daniel Schmitt、Sebastian Günther、Markus Funk 和 Max Mühlhäuser。2020。沿线行走：将行走路径的横向偏移用作头戴式显示器的输入模态。载于《2020年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》（美国檀香山）（CHI '20）。计算机协会，纽约州纽约市，1–15。https://doi.org/10.1145/3313831.3376852[89] • Bilge Mutlu、Fumitaka Yamaoka、Takayuki Kanda、Hiroshi Ishiguro 和 Norihiro Hagita。2009。机器人的非语言泄露。载于《第4届ACM/IEEE人机交互国际会议论文集——HRI '09》，Matthias Scheutz、François Michaud、Pamela Hinds 和 Brian Scassellati（编）。ACM出版社，纽约州纽约市， 69 10 1145 1514095 1514110 。 [90] • https://doi.org/ 。/ 。Rhys Newbury、Akansel Cosgun、Tysha Crowley-Davis、Wesley P. Chan、Tom Drummond 和 Elizabeth Croft。 [n.d.]。利用增强现实可视化物体交接中的机器人意图。https://doi.org/ 10 48550 2103 04055 。/arXiv. 。 [91] 2020 Yohei Noguchi 和 Fumihide Tanaka。 。OMOY：通过改变自身重量来表达情绪与意图的手持式机器人装置。载于《2020年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》。ACM。https://doi.org/ 10 1145 3313831 3376775 。/ 。Michael Novitzky、Charles [92] • Pippin、Thomas R. Collins、Tucker R. Balch 和 Michael E. West。2012。通过行为识别实现仿生多机器人通信。载于《2012年IEEE机器人与仿生国际会议（ROBIO）》。IEEE， 771 776 10 1109 2012 6491061 – 。https://doi.org/ 。/ [93] ROBIO. 。Alison O'Mara-Eves、James Thomas、John McNaught、Makoto Miwa 和 Sophia Ananiadou。2015。使用文本挖掘识别系统综述中的研究：当前方法的系统综述。《系统综述》4，1（2015年1月）。https://doi.org/10.1186/2046-4053-4-5

[94] Linda Onnasch 和 Eileen Roesler。2020。用于构建和分析人机交互的分类体系。《国际社会机器人学期刊》13，4（2020 833 849 10 1007 12369 020 00666 5 年6月），–。[95] https://doi.org/ 。/s - - - Matthew J. Page、Joanne E. McKenzie、Patrick M. Bossuyt、Isabelle Boutron、Tammy C. Hoffmann、Cynthia D. Mulrow、Larissa Shamseer、Jennifer M. Tetzlaff、Elie A. Akl、Sue E. Brennan、Roger Chou、Julie Glanville、Jeremy M. Grimshaw、Asbjørn Hróbjartsson、Manoj M. Lalu、Tianjing Li、Elizabeth W. Loder、Evan Mayo-Wilson、Steve McDonald、Luke A. McGuinness、Lesley A. Stewart、James Thomas、Andrea C. Tricco、Vivian A. Welch、Penny Whiting 和 David Moher。2021。PRISMA 2020声明：系统综述报告指南的更新。《系统综述》10，1（2021年3月）。https://doi.org/10.1186/s13643-021-01626-4[96] • Oskar Palinko、Kerstin Fischer、Eduardo Ruiz Ramirez、Lotte Damsgaard Nissen 和 Rosalyn M. Langedijk。2020。一款通过注视选择交互对象的饮品服务移动社交机器人。载于《2020年ACM/IEEE人机交互国际会议伴随论文集》，Tony Belpaeme、James Young、Hatice Gunes 和 Laurel Riek（编）。ACM，纽约州纽约市，384–385。https://doi.org/10.1145/3371382.3378339[97] Max Pascher、Annalies Baumeister、Stefan Schneegass、Barbara Klein 和 Jens Gerken。2021。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》，Carmelo Ardito、Rosa Lanzilotti、Alessio Malizia、Helen Petrie、Antonio Piccinno、Giuseppe Desolda 和 Kori Inkpen（编）。Springer，尚，瑞士，331 351 10 1007 978 3 030 85623 6_21 – 。[98] https://doi.org/ 。/ - - - - Max Pascher、Stefan Schneegass 和 Jens Gerken。 。2019。SwipeBuddy：用于免提交互的遥操作平板电脑及电子书阅读器支架。载于《人机交互——INTERACT 2019》，David Lamas、Fernando Loizides、Lennart Nacke、Helen Petrie、Marco Winckler 和 Panayiotis Zaphiris（编），第11749卷。Springer，尚，瑞士，568–571。https://doi.org/10.1007/978-3-030-29390-1 39[99] • Loizos Psarakis、Dimitris Nathanael 和 Nicolas Marmaras。2022。促进人机协作中的人类短期预期行为。《国际工业人机工程学期刊》87（2022），103241。https://doi.org/10.1016/j.ergon.2021.103241[100] • Eric Rosen、David Whitney、Elizabeth Phillips、Gary Chien、James Tompkin、George Konidaris 和 Stefanie Tellex。2019。通过混合现实头戴式显示器传达和控制机械臂运动意图。《国际机器人研究杂志》38，12-13（2019），1513–1526。https://doi.org/10 1177 0278364919842925 。/ Alexandros Rouchitsas 和 Håkan Alm。[101] 2019。用于自动驾驶车辆与行人通信的外部人机界面：实证研究综述。《心理学前沿》10（2019年12月）。https://doi.org/10.3389/fpsyg. 2019 02757 。[102] • Emanuele Ruffaldi、Filippo Brizzi、Franco Tecchia 和 Sandro Bacinelli。2016。用于机器人意图可视化的第三视角增强现实。载于《增强现实、虚拟现实与计算机图形学》，Lucio Tommaso de Paolis 和 Antonio Mongelli（编）。《计算机科学讲义》，第9768卷。施普林格国际出版，尚，471–478。https://doi.org/10 1007 978 3 319 40621 3 _ 35 。/ - - - - { } Gerard Salton 和 Christopher [103] Buckley。1988。自动文本检索中的词项加权方法。《信息处理与管理》24，5（1988年1月），513 523 10 1016 0306 4573 88 90021 0 – 。[104] https://doi.org/ 。/ - ( ) - Albrecht Schmidt、Michael Beigl 和 Hans-W Gellersen。1999。情境不仅仅是位置。《计算机与图形学》23，6（1999），893–901。https://doi.org/10.1016/S0097-8493(99)00120-X [105] Lambert Schomaker。1995。人类信息处理系统中的多模态交互分类体系。（1995）。[106] • Megha Sharma、Dale Hildebrandt、Gem Newman、James E. Young 和 Rasit Eskicioglu。2013。通过飞行路径传达情感：探索运用拉班动作力效系统设计情感化移动路径。载于《2013年第8届ACM/IEEE人机交互国际会议（HRI）》。IEEE，293 300 10 1109 2013 6483602 – 。https://doi.org/ 。/HRI. 。[107] Ben Shneiderman。 。2022。以人为本的人工智能。牛津大学出版社。[108] Rajinder S odhi、Hrvoje Benko 和 Andrew Wilson。2012。LightGuide：用于手部动作引导的投影可视化。载于《SIGCHI计算机系统中的人为因素会议论文集》（美国得克萨斯州奥斯汀）（CHI '12）。计算机协会，纽约州纽约市，179–188。https://doi.org/10 1145 2207676 2207702 。/ 。Sichao Song 和 Seiji Yamada。2018。受[109] • 生物发光启发的人机交互。载于《2018年ACM/IEEE人机交互国际会议论文集》，Takayuki Kanda、Selma ˆSabanović、Guy Hoffman 和 Adriana Tapus（编）。ACM，纽约州纽约市，224–232。https://doi.org/10.1145/3171221.3171249[110] • Sichao Song 和 Seiji Yamada。2018。为外观受限机器人设计用于传达注视的LED灯。载于《2018年第27届IEEE机器人与人类交互通信国际研讨会（RO-MAN）》。IEEE，94–97。https://doi.org/10.1109/ROMAN.2018.8525661

[111] • Sichao Song 和 Seiji Yamada。2018年。表现性灯光对人类感知及其对功能型机器人的解读的影响。载于《2018年CHI计算系统中的人为因素会议扩展摘要集》，Regan Mandryk、Mark Hancock、Mark Perry 和 Anna Cox（编）。ACM，纽约州纽约市，美国，1 6 10 1145 3170427 3188547 –。https://doi.org/。/。Maria [112] • Staudte 和 Matthew W. Crocker。2009年。口语人机交互中的视觉注意。载于《第四届ACM/IEEE人机交互国际会议论文集——HRI '09》，Matthias Scheutz、François Michaud、Pamela Hinds 和 Brian Scassellati（编）。ACM出版社，美国纽约州纽约市，77 10 1145 1514095 1514111 。https://doi.org/。/。Didi Surian、[113] Florence T. Bourgeois 和 Adam G. Dunn。2021年。用于系统综述更新的相关试验注册筛查自动化：针对 ClinicalTrials.gov 大型注册数据集的评估研究。《BMC医学研究方法学》21, 1 2021 10 1186 12874 021 01485 6 （12月）。[114] https://doi.org/。/s - - - Ryo Suzuki、Adnan Karim、Tian Xia、Hooman Hedayati 和 Nicolai Marquardt。2022年。增强现实与机器人学：增强现实增强型人机交互和机器人界面的调查与分类体系。载于《2022年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》（美国路易斯安那州新奥尔良）（CHI '22）。计算机协会，美国纽约州纽约市，文章553, 33 10 1145 3491102 3517719 页。https://doi.org/。/。[115] • Daniel Szafir、Bilge Mutlu 和 Terrence Fong。。2014。辅助型自由飞行机器人的意图沟通。载于《2014年ACM/IEEE国际人机交互会议论文集》，Gerhard Sagerer、Michita Imai、Tony Belpaeme 和 Andrea Thomaz（编）。ACM，美国纽约州纽约市，358–365。https://doi.org/ 10 1145 2559636 2559672 。/。Daniel Szafir、Bilge [116] • Mutlu 和 Terry Fong。2015年。飞行机器人的方向性沟通。载于《第十届ACM/IEEE人机交互国际会议论文集》，Julie A. Adams、William Smart、Bilge Mutlu 和 Leila Takayama（编）。ACM，美国纽约州纽约市，19–26。https: //doi.org/10 1145 2696454 2696475 。/。Leila Takayama、Doug Dooley 和 Wendy Ju。[117] • 2011年。表达思想。载于《第六届人机交互国际会议论文集——HRI '11》，Aude Billard、Peter Kahn、Julie A. Adams 和 Greg Trafton（编）。ACM出版社，美国纽约州纽约市，69 10 1145 1957656 1957674 。[118] • 2019 https://doi.org/。/。Gilbert Tang、Phil Webb 和 John Thrower。。机器人灯光皮肤的开发与评估：一种旨在改善工业人机协作中沟通效果的新型机器人信号系统。《机器人与计算机集成制造》56 2019 85 94 10 1016 2018 08 005 （），–。[119] https://doi.org/。/j.rcim.。。Sam Thellman 和 Tom Ziemke。2021。感知信念问题。《ACM人机交互汇刊》10卷3期（2021年），1–15。https://doi.org/10. 1145/3461781[120] Andrea C. Tricco、Erin Lillie、Wasifa Zarin、Kelly K. O'Brien、Heather Colquhoun、Danielle Levac、David Moher、Micah D.J. Peters、Tanya Horsley、Laura Weeks、Susanne Hempel、Elie A. Akl、Christine Chang、Jessie McGowan、Lesley Stewart、Lisa Hartling、Adrian Aldcroft、Michael G. Wilson、Chantelle Garritty、Simon Lewin、Christina M. Godfrey、Marilyn T. Macdonald、Etienne V. Langlois、Karla Soares-Weiser、Jo Moriarty、Tammy Clifford、Özge Tunçalp 和 Sharon E. Straus。2018年。PRISMA范围综述扩展（PRISMA-ScR）：清单与说明。《内科学年鉴》169卷7期（2018年10月），467–473。https: //doi.org/10.7326/m18-0850[121] • Georgios Tsamis、Georgios Chantziaras、Dimitrios Giakoumis、Ioannis Kostavelis、Andreas Kargakos、Athanasios Tsakiris 和 Dimitrios Tzovaras。2021年。通过增强现实显示器，在多用户人机协作环境中实现直观且安全的交互。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，520 526 10 1109 50785 2021 9515474 –。https://doi.org/。/[122] RO-MAN。。Sanne van Waveren、Linnéa Björklund、Elizabeth J. Carter 和 Iolanda Leite。2019年。敲木头：材料选择对社交机器人感知的影响。载于《社交机器人学》，Miguel A. Salichs、Shuzhi Sam Ge、Emilia Ivanova Barakova、John-John Cabibihan、Alan R. Wagner、Álvaro Castro-González 和 Hongsheng He（编）。施普林格国际出版，尚，211–221。[123] Ana M Villanueva、Ziyi Liu、Zhengzhe Zhu、Xin Du、Joey Huang、Kylie A Peppler 和 Karthik Ramani。2021年。RobotAR：一种兼容增强现实的远程咨询机器人工具包，用于增强创客空间体验。载于《2021年CHI计算系统中的人为因素会议论文集》（日本横滨）（CHI '21）。计算机协会，美国纽约州纽约市，文章477, 13 10 1145 3411764 3445726 页。[124] https://doi.org/。/。Erik von Elm、Gerhard Schreiber 和 Claudia Cornelia Haupt。。2019。范围综述的方法指南（JBI方法学）。《卫生保健证据、继续教育与质量杂志》143（2019年6月），1–7。https://doi.org/ 10 1016 2019 05 004 。/j.zefq.。。[125] • 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国际人机交互会议论文集》，Takayuki Kanda、Selma ˆSabanović、Guy Hoffman 和 Adriana Tapus（编）。ACM

' 纽约 , NY, USA, 316–324. https://doi.org/10.1145/3171221.3171253

[126] Sebastian Wallkötter、Silvia Tulli、Ginevra Castellano、Ana Paiva 和 Mohamed Chetouani。2021。通过社会线索实现可解释的具身智能体：综述。《人机交互期刊》10卷3期，文章27（2021年7月），24页。https://doi.org/10.1145/3457188
[127] Lihui Wang、Robert Gao、Jozsef Váncza、Jörg Krüger、Xi Vincent Wang、Sotiris Makris 和 George Chryssolouris。2019。人机共生协作装配。*CIRP*年刊68卷2期（2019年），701–726。https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019. 05.002[128] • Atsushi Watanabe、Tetsushi Ikeda、Yoichi Morales、Kazuhiko Shinozawa、Takahiro Miyashita 和 Norihiro Hagita。2015。机器人导航意图传达。载于 *2015*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。IEEE，5763–5769。
https://doi.org/10.1109/IROS.2015.7354195[129] • Tim Wengefeld、Dominik Hochemer、Benjamin Lewandowski、Mona Kohler、Manuel Beer 和 Horst-Michael Gross。2020。用于机器人意图传达与人机交互的激光投影系统。载于 *2020*年第*29*届*IEEE*机器人与人类交互通信国际会议（*RO-MAN*）。IEEE，259–265。
https://doi.org/10.1109/RO-MAN47096.2020.9223517
[130] Jacob O. Wobbrock 和 Julie A. Kientz。2016年。人机交互领域的研究贡献。《*Interactions*》23卷，第3期（2016年4月），38–44页。
https://doi.org/10.1145/2907069[131] • Lisa Zahray、Richard Savery、Liana Syrkett 和 Gil Weinberg。2020 年。通过机器人手势声化提升对机器人状态的感知和交互乐趣。载于*2020*年第*29*届*IEEE*机器人与人类交互通信国际会议（*RO-MAN*）。IEEE，978–985页。https://doi.org/10.1109/ RO-MAN47096.2020.9223452[132] • Allan Zhou、Dylan Hadfield-Menell、Anusha Nagabandi 和 Anca D. Dragan。2017年。表现性机器人运动时序。载于*2017*年*ACM/IEEE*人机交互国际会议论文集，Bilge Mutlu、Manfred Tscheligi、Astrid Weiss 和 James E. Young（编）。ACM，美国纽约州纽约市，
22 31 10 1145 2909824 3020221 –。https://doi.org/./.Mark Zolotas 和
[133] • 2019
Yiannis Demiris。. 借助增强现实实现可解释共享控制。载于*2019*年*IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。IEEE，3020–3026页。
https://doi.org/10.1109/IROS40897. 2019.8968117