Tactile Interaction Needs and Behavioral Feedback Design for Embodied Intelligent Robots in Home Office Scenarios

Xu He WenqiYu Pengfei Chao Shitong Lin

School of Art and Design, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai, 201620, China

Abstract

As embodied intelligent robots increasingly enter unstructured environments such as homes and offices, robot interaction is expanding beyond traditional interfaces like screens and buttons to include physical movements and tactile contact. Touch not only enables the collection of information such as pressure, vibration, temperature, and friction, but also influences a robot's judgment regarding grasping risks, object states, and human-robot contact dynamics. Addressing the current research gap—overemphasis on perception performance at the expense of behavioral expression—this study takes the EIR tactile perception agent as the subject, establishing a design framework from the intersection of embodied intelligence and industrial design: "scenario needs—tactile judgment—behavioral intent—external feedback." Five types of behavioral feedback are proposed: confirmation, warning, correction, yielding, and failure. The study emphasizes expressing internal robotic states through physical behaviors such as movement speed, gripping force, trajectory, pauses, and withdrawal, thus forming an embodied interaction model where "behavior becomes the interface." This approach extends industrial design beyond aesthetics and conventional interfaces to encompass perception, behavior, and human-robot relationship design, offering valuable insights for tactile interaction and safe collaboration in home office robots.

Keywords

embodied intelligence; industrial design; tactile interaction; behavioral feedback; human-robot interaction; intelligent robots

面向家庭办公场景的具身智能机器人触觉交互需求与行为反馈设计研究

何旭 虞文琦 巢鹏飞 林师潼

上海工程技术大学艺术设计学院，中国·上海 201620

摘要

随着具身智能机器人逐渐进入家庭与办公等非结构化环境，机器人交互正由屏幕、按钮等传统界面扩展到身体动作与物理接触。触觉不仅承担压力、振动、温度和摩擦等信息采集功能，也影响机器人对抓取风险、物体状态及人与机器接触关系的判断。针对现有研究重感知性能、轻行为表达的问题，本文以EIR触觉感知Agent为研究对象，从具身智能与工业设计交叉视角构建“场景需求—触觉判断—行为意图—外显反馈”的设计框架，并提出确认型、警示型、修正型、退让型和失败型五类行为反馈。研究强调以动作速度、夹持力度、轨迹、停顿与退让等身体行为表达机器人内部状态，形成“行为即界面”的具身交互方式。该方法将工业设计由外观与传统界面进一步延伸到感知、行为和人机关系设计，为家庭办公机器人的触觉交互与安全协作提供设计参考。

关键词

具身智能；工业设计；触觉交互；行为反馈；人机交互；智能机器人

1 引言

人工智能、机器人控制与多模态感知的发展，使智能产品逐渐由数字空间中的信息系统转向能够进入物理环境并主动执行任务的具身智能系统。机器人不仅需要理解指令，还需要持续感知环境、判断自身与物体的接触关系，并根据实时状态调整动作。由此，人机交互的载体也从屏幕、按钮和语音界面延伸到机器人的动作、速度、力度与空间行为。

触觉是这一转变中的关键模态。ThinTact、F-TAC Hand等研究持续提升机器人触觉感知的空间分辨率和接触信息获取能力[1-2]；Sparsh尝试通过自监督学习获得更加通用的触觉表示[3]；Octopi与Tactile-VLA进一步探索触觉与语言、多模态推理及机

【基金项目】市级大学生创新训练项目“EIR触觉感知agent开发设计”（项目编号：csz2607001）。

【作者简介】何旭（2005-），男，中国安徽芜湖人，本科，从事产品设计、具身智能机器人研究。

器人动作之间的结合[4-5]。此外，PoseIt、多模态触觉纹理数据集及跨传感器触觉表示研究，也表明触觉研究正在从单一传感器指标走向多模态、可迁移和任务相关的理解[6-8]。

但对于实际产品而言，“感知正确”并不等于“交互合理”。当机器人判断物体正在滑落、夹持过强或接触对象不确定时，系统不仅要在内部完成识别，还需要通过外部行为让用户理解其状态与意图。若异常时只突然停止，用户很难判断这是故障、任务完成还是安全策略。因此，本文关注的核心问题是：机器人感知触觉状态后，应如何将其转译为稳定、可理解的行为反馈。

2 家庭办公场景中的触觉交互需求

EIR触觉感知Agent面向日常生活与办公场景。与工业生产线相比，这类环境中的物体种类、材质、摆放方式和人员活动更加开放，机器人难以依赖完全预设的条件完成任务。因此，触觉设计不应先从传感器参数出发，而应从“机器人要处理什么物体、存在什么风险、用户需要理解什么状态”反向定义感知需求。

对于玻璃杯、电子设备等易碎对象，机器人需要同时关注夹持稳定性与过度施力风险，触觉重点包括压力变化、接触确认与滑移趋势；对于纸张、文件和轻薄物体，则更需要识别摩擦变化、微小滑移与接触连续性；面对织物、软包装等柔性对象，还需判断局部形变与弹性状态；当机器人与人体或未知柔性对象发生意外接触时，则应优先进入减速、停止、释放或退让状态。

由此可以形成“场景任务—操作风险—所需触觉属性—机器人行为”的设计链。工业设计在这里承担的不是末端造型修饰，而是通过场景与任务分析确定系统真正需要感知和表达的内容。

3 触觉状态到行为反馈的映射设计

机器人实现精细化触觉交互的核心核心逻辑，是在底层触觉传感原始信号与外部执行动作之间，搭建适配实际作业场景、具备任务解读能力的中间映射层级。本研究将该映射体系拆解为触觉状态感知层、行为意图解析层与外显行为执行层三个递进层级。其中触觉状态感知层负责捕捉作业过程中的各类物理接触变化，涵盖平稳贴合接触、接触压力过载、持续性接触面滑移、接触物体形变凸起及未知物体突发接触等多元工况状态。行为意图解析层依托感知数据完成工况语义转化，将物理信号转化为掉落隐患、物体损伤风险、作业安全不达标等可识别任务判定结果。外显行为执行层最终将语义意图落地为可控机械动作，包括速率调节、夹持力动态调控、作业位置校准、工况暂停、轨迹回撤及物体释放等操作。例如检测到持续滑移趋势时，系统不会依托单一传感阈值触发固定动作，而是先判定物体存在脱落隐患，再同步执行二次夹持校准与运动降速操作；若接触压力异常激增，则预判持续施力会损坏作业对象，及时下调夹持力度或暂停作业进程。该分层映射模式可将原始工程传感数据转化为标准化、可解释、可落地的机器人作业逻辑，大幅提升触觉交互的可控性与适配性。

4 具身智能机器人的五类行为反馈

结合家庭办公场景下人机交互、物体操作的各类潜在安全风险特征，本文将智能机器人的触觉驱动行为反馈机制划分为五类标准化反馈模式，适配不同作业风险等级与工况状态。第一类为确认型反馈，针对接触状态稳定、无安全隐患、作业工况良好的场景，机器人保持平稳连贯、规律可控的运动轨迹，让用户直观感知任务正常推进，提升人机交互的适配感。第二类为警示型反馈，适用于风险逐步攀升但未达到作业终止标准的工况，通过自主降低运动速率、缩减动作执行幅度、短时停顿缓冲等方式，传递系统谨慎处理异常的作业状态。第三类为修正型反馈，针对接触面滑移、抓取点位偏移等可修复性作业偏差，机器人通过小幅位置校准、重新贴合夹持、运动轨迹微调等方式修正误差，最大限度保障任务连续性。第四类为退让型反馈，当检测到人体接触、超软易碎物体或高危接触工况时，主动下调作业优先级，通过减速、停机、松夹、后退等动作拉大安全间距，规避安全事故。第五类为失败型反馈，在触觉传感信息缺失、物体工况无法精准判定、多次自主修正仍无法恢复正常作业时，系统主动终止当前任务并锁定安全姿态，同时通过交互界面提示用户人工复核任务状态。

5 “行为即界面”的工业设计方法

传统工业产品的人机交互模式较为单一，主要依托灯光闪烁、声响提示、屏幕图形及文字标注等可视化、听觉化方式，向使用者传递设备运行状态与操作信息。区别于传统设备，具身智能机器人依托自身躯体的动态运动形态搭建交互链路，无需依托辅助媒介即可完成意图传递。设备持续平稳的运动状态，可直观反馈作业流程有序推进；运行速度放缓、临时暂停的肢体动作，能够暗示设备感知到环境异常与潜在风险；机身微调位置、重新校准姿态的行为，代表设备正在开展自主纠错与参数优化；而主动后退、脱离作业接触的动作逻辑，则凸显出设备以人员安全为核心的优先级运行机制。

基于这一特性，机器人的人机交互界面可划分为

数字交互、物理形态与行为表达三大核心维度，三者协同完成完整的人机信息传递。其中数字界面承担复杂数据展示、指令播报、文字提示等精细化信息传递工作；物理界面依托产品整体造型、机械结构及材质特性构建基础交互载体；行为界面则依靠机器人运动快慢、动作力度、肢体空间位移关系，隐性传递设备运行意图与工作状态。触觉智能体作为行为界面的核心驱动载体，构建了完整的人机交互闭环：机器人通过躯体感知外界物理接触信号，完成环境与自身状态的研判分析，生成对应的作业行为意图，再通过标准化躯体动作对外输出，让用户精准识别设备运行状态，形成“物理接触—状态研判—意图生成—动作输出—用户感知”的完整交互链路。

该设计理念彻底拓宽了工业设计的创作边界，让设计对象从传统静态产品实体，延伸至机器人动态行为逻辑的构建层面。设计人员需深度参与机器人行为准则制定、运动节奏调控、风险反馈机制搭建、运行状态表达体系优化等核心环节，保障机器人自主作业行为具备稳定、可预判、可解读的核心特质。

6 “工程—管理—设计”协同框架

EIR项目采用工程、管理与设计协同的“三旋翼”研究方式。工程模块负责触觉传感、信号处理、属性识别及机器人执行控制，为行为反馈提供物理基础；管理模块负责任务分类、数据采集、标注规范、质量控制和测试流程；设计模块负责用户需求、场景风险、触觉语义和行为反馈之间的关系构建。

以机器人拿取玻璃杯为例，设计模块首先提出避免破损与掉落的使用需求，工程模块据此识别夹持压力和滑移状态，管理模块定义测试条件与异常样本，设计模块再把结果转化为“正常夹持”“存在滑移”“压力过高”等状态，并分别对应正常运动、修正、减速或停止。由此形成“场景提出需求—工程获取信息—数据形成规则—设计赋予意义—Agent执行行为—场景再次验证”的循环。

7 场景验证与设计评价

本文当前主要建立触觉交互和行为反馈的设计方法，对于尚未取得完整实验结果的部分不作虚构性量化结论。后续验证可从技术与设计两个维度展开。技术评价包括触觉状态识别准确率、行为响应时间、抓取成功率及不同材质对象的适应能力；设计评价则关注机器人行为是否容易理解、是否具有可预测性，以及风险反馈能否形成稳定的一致性。

实验可设置正常抓取、夹持过强、持续滑移、人体接触和未知对象等情境，让参与者在尽量减少文字提示的情况下观察机器人行为，并判断机器人当前状态及下一步动作。可理解性、可预测性、安全感、反馈一致性与任务连续性可作为主要设计评价指标。工程研究回答“机器人有没有判断正确”，工业设计还需要回答“正确判断之后，机器人有没有以合理的方式表现出来”。

8 结论

本文从具身智能与工业设计交叉视角出发，围绕家庭办公场景中的触觉交互问题，构建“场景需求—触觉判断—行为意图—外显反馈”的设计框架，并提出确认型、警示型、修正型、退让型和失败型五类行为反馈。研究认为，触觉数据只有在进一步进入任务语义和产品行为之后，才真正成为人机交互的一部分。

具身智能时代的工业设计对象因此可以由产品形态、材料和数字界面进一步扩展到感知方式、行为逻辑与人机关系。机器人知道“接触了什么”属于感知，判断“可能发生滑落”属于认知，而通过调整抓取、减速或退让让用户理解其意图，则进入交互设计。未来可依托真实机器人平台验证不同反馈方式的用户理解度、安全感与行为一致性，并持续完善触觉语义与行为之间的映射机制。

参考文献

[1] XU J, CHEN W, QIAN H, et al. ThinTact: Thin vision-based tactile sensor by lensless imaging[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2025, 41: 1139-1154.

[2] ZHAO Z, LI W, LI Y, et al. Embedding high-resolution touch across robotic hands enables adaptive human-like grasping[J]. Nature Machine Intelligence, 2025.

[3] HIGUERA C, SHARMA A, BODDULURI C K, et al. Sparsh: Self-supervised touch representations for vision-based tactile sensing[C]//Proceedings of the 8th Conference on Robot Learning. Proceedings of Machine Learning Research, 2025, 270: 885-915.

[4] ZHUANG Y, WANG S, SHE D, et al. Octopi: Object property reasoning with large tactile-language models[C]//Robotics: Science and Systems. 2024.

[5] HUANG J, WANG S, LIN F, et al. Tactile-VLA: Unlocking vision-language-action model's physical knowledge for tactile generalization[EB/OL]. arXiv:2507.09160, 2025.

[6] KANITKAR S, JIANG H, YUAN W. PoseIt: A visual-tactile dataset of holding poses for grasp stability analysis[C]//-/IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. 2022.

[7] LIMA B M R, DANYAMRAJU V N S S, DE OLIVEIRA T E A, et al. A multimodal tactile dataset for dynamic texture classification[J]. Data in Brief, 2023, 50: 109590.

[8] ZHAO J, MA Y, WANG L, et al. Transferable tactile transformers for representation learning across diverse sensorsand tasks[C]//Proceedings of the 8th Conference on Robot Learning. Proceedings of Machine Learning Research, 2025, 270.