frontiers

迈向锂离子电池的再利用与回收：用于拆解电动汽车电池的远程机器人技术

Jamie Hathaway [1, 2, †], **Abdelaziz Shaarawy** [1, †], **Cansu Akdeniz** [1], **Ali Aflakian** [1, 2], **Rustam Stolkin** [1, 2], **Alireza Rastegarpanah** [1, 2, *]

[1]冶金与材料科学系，伯明翰大学，伯明翰，*B15 2TT*，英国。[2]法拉第研究所，*QuadOne*，哈韦尔科学与创新园区，迪德科特，*OX11 0RA*，英国。

[†]这些作者对本研究的贡献相同。

通讯作者*：Alireza Rastegarpanah，冶金与材料科学系，伯明翰大学，伯明翰，B15 2TT，英国。a.rastegarpanah@bham.ac.uk

arXiv:2304.01065v1 [cs.RO] 3 Apr 2023

摘要

电动汽车电池的拆解是高价值电池材料回收利用与再利用过程中的关键阶段，但由于标准化程度有限、设计复杂性高，加之寿命终止状态各异所带来的不确定性和安全问题，拆解过程十分复杂。远程机器人技术为应对这些挑战提供了一种半自主机器人拆解途径。然而，有研究指出，对于精细、接触密集且安全关键的任务而言，用户与环境进行触觉交互的质量和真实性至关重要。为探究这一观点，我们演示了对一组2011款日产聆风电池模组堆叠的拆解，并以此为基础，依据任务完成时间和成功率指标，对传统的非对称触觉“协作机器人”主从框架与主端和从端相同的协作机器人进行比较研究。我们演示了在一系列拆解任务中，使用相同协作机器人可将耗时缩短22%–57%；但这一改进主要源于扩大的工作空间和1:1位置映射，同时首次尝试成功率降低了10–30%。对于拆卸螺栓和抓取任务，力反馈的真实性相较而言不如交互中编码的方向信息重要；然而，在真空拾放和接触式切割任务中，1:1力映射增强了环境触觉提示。

关键词：机器人拆解、远程机器人技术、锂离子电池、电动汽车电池、触觉、远程操作

1 引言

由于对电动汽车（EV）的需求不断增加（Rietmann 等，2020年），预计将有大量电动汽车电池达到寿命终止状态。由于其中含有锂、镍和钴等高价值材料（Thies 等，2018年），且使用寿命有限，仅为10至15年（Ai 等，2019年），人们对电动汽车电池处置的研究兴趣日益浓厚。电池拆解是对寿命终止（EoL）电池部件进行初步检测和分拣，以实现再利用和回收的关键步骤，以及

回收利用高纯度材料。这一过程目前仍主要由受过培训的人员手动完成，需要高度的精度和专注力（Tang 和 Zhou，2004；Tan 等（2021））。然而，由于电池内部残余电荷以及热失控风险，电动汽车电池存在多种相关的热危害和化学危害。尽管 Lander 等（2023）先前的研究强调了自主拆解对于降低拆解成本的重要性，但由于电动汽车电池型号具有高度可变性（Pehlken 等，2017年），同时缺乏灵巧性，且工作环境高度动态化、非结构化，仍存在诸多限制，这主要是由于型号和制造商的多样性以及设计标准化的缺失所致。因此，人们提出了用于电动汽车电池拆解的混合框架，在该框架中，机器人和人类紧密协作（Tan 等（2021））。然而，在生产过程中，机器人与人类处于同一工作环境并执行任务，这会给人类带来风险。电动汽车电池拆解环境被认为不适合人员进入，因此，在此类环境中与机器人进行直接协作至关重要。对于受损电池而言，这一点尤为重要，因为受损电池更难拆解，其部件寿命终止状态存在更大的不确定性，从而进一步加剧了现有的安全风险。

远程机器人技术旨在让人类操作员通过本地接口远程执行拆解任务，同时将人类操作员的部分灵巧性和精细运动控制能力传递给机器人，从而降低拆解带来的危险。由于触觉设备能够在执行任务时向操作员提供力反馈，因此常用于远程操控研究。然而，触觉设备面临的一项关键挑战是运动学方面的主从不对称（Li 等人，2020）；因此，存在多种映射方案，可将主设备的运动映射到从设备。此前已有研究强调，这种接口的特性对于执行危险或敏感任务十分重要（Bernold，2007）。此外，对于危险环境中的拆解任务，有研究指出，向操作员提供的反馈质量与真实感以及接口，都可能显著影响任务表现（Bolarinwa，2022）。

远程机器人技术在电动汽车电池拆解中的应用尚未得到充分探索，尤其是受损电池会给拆解过程带来更多严峻挑战。电池拆解的每个阶段都包含一系列复杂且精细的高接触任务，需要结合触觉和视觉反馈才能成功完成拆解。鉴于并非所有电动汽车电池拆解任务都能自主完成，本研究展示了远程机器人技术在多种电池拆解任务中的应用，例如拆卸螺栓、分拣和切割。我们专门设计了一系列工具来完成这些任务。我们评估并比较了两种平台的成功率和任务执行时间：一种是使用两台相同协作机器人的高成本平台，另一种是使用触觉设备搭配一台协作机器人的相对低成本平台。我们针对每项任务，探究造成这两种平台性能差异的因素。

本文其余部分的结构安排如下：第2节综述拆解和远程机器人技术相关研究。第3节建立用于执行拆解任务的实验装置，第4节介绍适用于两个平台的双边遥操作控制架构。第5节定义不同电动汽车电池拆解任务的实验案例研究，随后第6节根据客观性能指标对每个远程操控平台进行评估，最后第7节总结全文。

2 相关工作

电池拆解方法大致可分为完全手动、完全自主和半自主方法。鉴于电动汽车电池拆解环境对人类操作员构成的危害，相关文献更倾向于基于效率和安全性方面的潜在提升来开发自主方法和半自主方法。自主方法旨在通过利用视觉和触觉反馈，使机器人能够在非结构化环境中规划并执行重复性任务，从而提高拆解效率。相关工作示例包括Zorn等人（2022）；Zhang等人（2023）；Choux等人（2021）；Farhan等人（2021）。这些方法的共同特点是采用标记和检测方法，自主识别部件和紧固件，并据此构建规划方案。然而，这些方法依赖数据和先验知识，并存在误识别电池部件的风险。对于受损电池，现有的先验知识数据集可能并不适用，或者自主拆解过程可能失败；例如，紧固件必须由人工手动拆除，或者由于部件发生结构变形而导致自主抓取失败，从而需要手动对齐。此外，对于分拣和提升应用，规划和避碰的复杂性仍是一个尚未解决的问题（Zhou等人（2019）；Tang等人（2022））。其他方法则试图通过工具设计来降低不同场景下拆解的复杂性，例如使用夹爪延长件Borr`as等人（2018）或柔性夹爪Schmitt等人（2011），以辅助拧卸、抓取及其他高接触操作任务。然而，即使进行了此类改进，自主方法仍难以推广至一系列任务以及不同的电池设计。Baazouzi等人（2021）等其他研究考察了电动汽车电池拆解过程的优化，强调了电池设计因素对于拆解的重要性。由于目前电动汽车在这方面仍存在不足，这使拆解过程具有高度的变异性和不确定性。

近年来，人机协作（HRC）在报废产品拆解领域受到关注，将机器人在重复性任务中的高效率与人类更高认知能力所带来的灵活性相结合。然而，现有文献中针对这一主题的研究较少。Kay 等人（2022年）采用高速旋转切割轮，在电池模块外壳的不同位置执行机器人切割。所提出的框架使机器人能够高效完成半破坏性拆解过程，同时允许人类操作员快速分拣电池部件并移除连接器。Rastegarpanah等人（2021年）进一步提出了利用移动操作机器人，对从电动汽车电池包中提取和分拣不同物体的过程进行半自动化的框架。该研究采用行为树模型，以模块化形式连接包括导航、目标跟踪和运动规划在内的不同机器人能力，从而执行认知任务并进行跟踪。另一项研究考察了拆解场景中的人类与多机器人协作（Gil等人（2007年））：一名技术人员与多个机器人在同一环境中共存，并相互交互以完成拆解任务。这些研究表明，与针对电动汽车锂离子电池的手动拆解和自主拆解策略相比，人机协作场景能够同时提升安全性并缩短时间。然而，机器人与人类之间的协调和任务分配，以及摄像头遮挡的处理（Fan 等人（2022年））等问题，仍是有待研究的重要课题。此外，在某些情况下，机器人无法与人类处于同一环境中，因为该环境被认为对人类具有危险性。

远程操控已被广泛应用于核工业，用于精细处理会对工作人员造成辐射危害的废弃物。例如，Tokatli 等（2021）在远程机器人技术背景下考察了手套箱的使用，将其作为降低工作人员辐射暴露风险的一种手段。另一项研究进行了真实世界实验，让用户执行核退役

任务，使用单边遥操作机器人系统 Mizuno 等（2023）。该研究比较分析了三种遥操作场景：完全手动、基于示教和基于规划，考察其安全性、认知负荷和准备时间。研究结果表明，基于规划的方法在时间效率方面最高，但安全性不足。尽管这些文章展示了遥操作在危险环境中的成功应用案例，但并未研究双边系统，因此未能体现力反馈对用户任务表现的重要性。触觉设备已被广泛用于针对各种应用开发双边遥操作系统的众多研究中 Giri 等（2021）。触觉设备使操作员能够感受到外力/力矩，以及在复杂虚拟环境中进一步获得的触觉提示。一项研究使用触觉设备作为主设备，控制双台七自由度串联机械臂，以执行核电站中的维护与维修任务 Ju 和 Son（2022）。他们开发了一种共享式双边遥操作系统，其中包含三项基础技术：自我中心遥操作、虚拟夹具和振动抑制控制，以协助人类操作员执行基于轴和离合器的插孔任务。此外，他们还开展了以人为中心的评估，从完成时间、轨迹长度和人力等方面衡量任务表现。该研究结果表明，触觉提示显著改善了任务表现。类似方法旨在考察虚拟约束和力反馈引导对任务表现的影响。He 和 Chen（2008）提出了此类方法，其基础是在组件与目标轴向对齐时对组件施加旋转约束。Abi-Farraj 等（2016）提出了一个相关概念，该概念基于使用视觉信息进行远程物体操控的共享控制方法，并在（Abi-Farraj 等，2018）中扩展到真实环境。在这种方法中，通过将夹爪方向约束为以物体质心为中心的虚拟球体的表面法线方向，辅助用户完成抓取任务。尽管已有文献记录了这些任务在任务表现方面的改进，但这些方法限制了操作员所拥有的灵活性；此类约束通常针对特定任务，并且在边缘情况下容易失效，例如自主识别的抓取点不合适时。针对非结构化环境中的物体分类与分离，有研究提出了基于触觉引导提示的替代方法 Abi-Farraj 等（2020）。在这种方法中，通过视觉检查物体来生成合适的抓取点，并通过触觉提示和振动将用户引导至建议的抓取点，同时不限制对机器人的自由操控。

所研究的大多数文献主要关注远程机器人技术在装配任务、核设施退役和废物处理应用中的使用。然而，围绕远程机器人技术在电动汽车拆解环境中的应用，研究仍然十分有限。此外，尽管许多研究探讨了共享自主性和控制系统设计对任务表现的影响，但只有少数研究考察了呈现给操作员的界面性质及其对任务表现的影响。Gliesche 等（2020）对键盘鼠标配置、XBOX 控制器以及使用触觉设备的双边配置进行了比较研究。对于一系列患者护理任务（包括抓取和移动远程物体以及调整摄像机视角），研究发现，触觉设备能够提高操作员执行任务的速度，但在心理负荷方面未发现主观差异。Singh 等（2020）提出了一个使用一对相同协作机器人的框架，并探讨了在插销入孔任务中，不同的引导和环境力呈现方法对用户表现的以人为中心的性能指标。然而，所涉及的任务范围仍然有限，对于拆解环境中更广泛任务而言，界面的影响仍不明确。

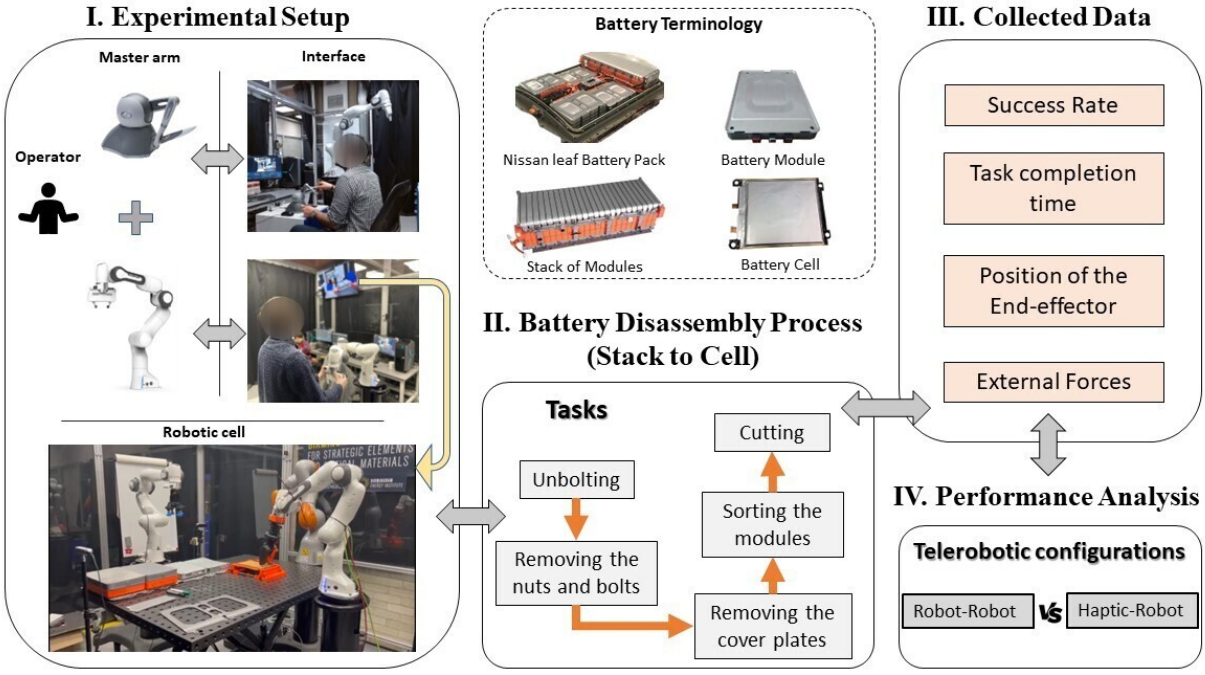


图 1. 本研究所采用实验装置的概览图，以及电动汽车电池拆解过程的简要说明，展示了从电池包到电池单体的拆解过程。

3 实验装置

本研究以2011款日产聆风电池包为案例，展示通过远程操控执行的一系列拆解任务。2011款日产聆风电池包由192个电池单体组成，封装在48个模组中，排列为前部两个各含12个模组的垂直堆叠，以及后部一个含24个模组的水平堆叠。表1概述了电池包至电芯拆解的主要拆解阶段；为简洁起见，表中仅列出了前部模组堆叠的内容。表1所示的自主性水平是根据对当前手动拆解过程的理解，以及对紧固件类型和部件可访问性等设计特征的分析推断得出的。一般而言，半自主和完全自主任务的范围会因电池设计和制造商而异；不过，总体而言，提高自主性水平有助于降低拆解成本，Lander 等（2023）。我们设计了一套基础电池拆解工作站，包括2台Franka Emika Panda协作机器人和一台Phantom Omni触觉设备。Franka Emika Panda是一款具有7个自由度（DoF）、额定载荷为3 kg的机器人。该机器人结合了力矩控制、机载力矩传感能力和低额定载荷，适合在共享人机协作工作空间中执行精密装配任务和拆解任务。Phantom Omni由一个具有6个自由度的手持式关节臂组成，可沿3个轴独立控制力反馈，最大施力能力为3.3 N。所有设备均通过ROS 网络连接至一台台式电脑，该电脑配备Intel(R) Core(TM) i7-8086K八核处理器，基础时钟频率为4 GHz，内存为32 GB。实验装置概览如图1所示。

基于表 1 中的拆解顺序，我们参考相关研究 Tan 等（2021），选取了一些重复性任务；在这些任务中，机器人相比人工拆解更具优势。这些任务包括拆卸螺栓，例如拆卸连接模块堆的紧固件；对拆解后的废弃部件进行移除和分拣（抓取与放置）；以及在无法无损移除紧固件时，通过切割以机械方式分离组件

步骤编号	拆解任务		Type
1	顶盖	拆下维修插头固定器	M
2		拆下上壳体螺栓并抬起顶盖	At
3	电池控制器	拆下安装螺栓	S-At
4		断开线束连接器并拆下电池控制器	M
5	接线盒和线束	断开互锁电路线束和加热器线束连接器	M
6		拆下安装螺母和前堆连接母排	S-At
7		拆下电池支撑管	S-At
8		拆下接线盒盖	M
9		拆下中央母排螺栓，然后拆下中央母排	S-At
10		拆下电流传感器母排安装螺栓	S-At
11		拆下开关支架安装螺栓	S-At
12		翻转开关支架 ，断开线束并拆下开关支架	M
13		拆下高压（HV）线束螺栓并拆下高压线束	S-At
14		断开电压和温度传感器线束	M
15		拆下接线盒安装螺母并取下接线盒	M
16	加热器	断开加热器和加热器继电器单元的线束连接器	M
17		拆下加热器和加热器继电器的安装螺母	S-At
18		拆下加热器控制单元和加热器	M
19	前模块堆叠	拆卸电池组安装螺母	At
20		取出模组堆叠	At
21		拆下母排盖	M
22		拆下母排端子安装螺栓和安装螺钉	S-At
23		拆下端板螺栓	At
24		拆下端板	S-At
25		电气测试与分拣模组	S-At
26	模块	分离模块盖	S-At
27		胶粘剂分离	At
28		将电芯极耳与端子组件分离	S-At

表 1. 2011款日产聆风电池包至电芯拆解的拆解操作序列。为简洁起见，仅考虑前部模组堆叠的拆解。任务类型可分为：完全手动（M），需要使用专用工具或进行灵巧的手动操作；半自主（S-At），机器人可在人类操作员协助下完成；以及完全自主（At），无需人工干预即可完成。在模组堆叠的拆解与分拣过程中，可以观察到一系列连续的半自主流程；本研究所考虑的任务已加以强调。

。为应对电池拆解过程中的各种任务，我们采用了多种商用工具和定制工具，如图 2 所示。在本研究中，我们设计了一种定制的套筒扳手工具，可适用于不同的紧固件尺寸。针对切割任务，我们专门为文中所述的低负载协作机器人设计了一种电动开缝锯工具，以完成低功率切割任务。针对抓取与放置任务，我们采用 Franka Hand 两指夹爪来抓取螺栓和板材等薄而轻的废弃物，同时使用 Robotiq EPick 吸盘夹爪来处理电池模组等更大、更重的材料。

3.1 使用触觉设备作为主端、协作机器人作为从设备的主从式遥操作

实现远程操控任务的一种常见框架是，将低成本的手持平台（如触觉设备）与采用主从配置的机器人结合使用。在本例中，我们考虑 Phantom Omni 触觉设备和 Panda协作机器人（图 3）。由于 Omni 与 Panda 机器人之间的自由度不匹配，更普遍地说，由于任何超驱动机器人都存在这种问题，因此无法独立控制机器人的所有自由度，从而降低了为用户提供的控制程度



(a) 套筒扳手工具 (b) 电动切割工具 (c) 两指夹爪 (d) 真空夹爪

图 2. 用于拆卸螺栓、切割和分拣任务的工具附件。

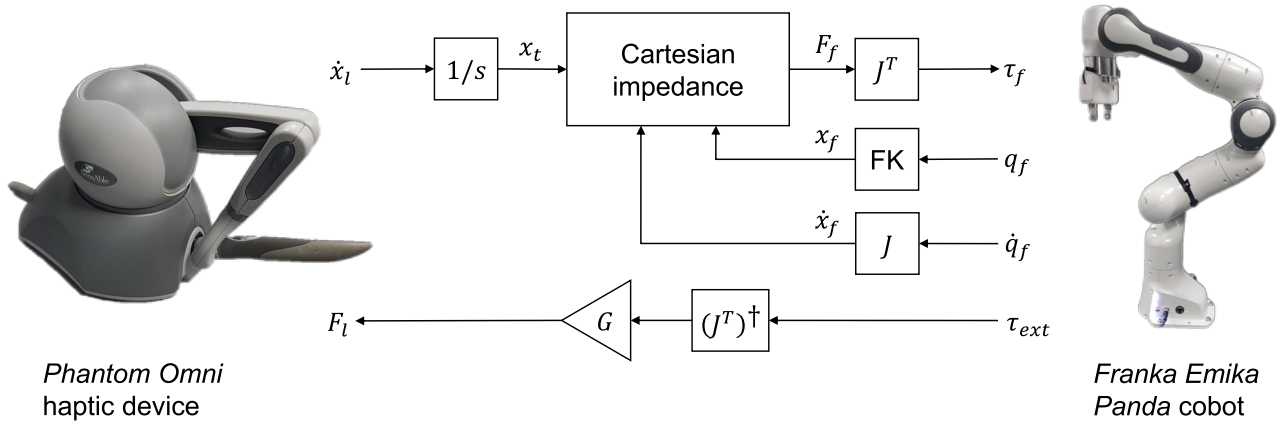


图 3. 遥操作框架示意图，由 Phantom Omni 触觉设备和 Franka Emika Panda 协作机器人组成。FK 指从动关节构型 q_f 到末端执行器位姿 x_f 的正向运动学映射。为简洁起见，省略了连接触觉设备与协作机器人基坐标系的变换矩阵。

。通常，这需要定义一个映射函数，将触觉设备的关节位置映射到从动机械臂的关节位置。这种映射可以通过将触觉末端执行器的笛卡尔位姿或旋量镜像到从机器人来实现。这为用户定位机器人以完成任务提供了更直观的框架。然而，由于需要通过逆运动学计算所需的关节空间运动，这通常会使控制容易受到奇异点和关节限位的影响。此外，Omni 在关节空间和任务空间中所能提供的较小运动范围意味着需要在粗略运动速度和精细位置对准精度之间进行权衡：在前者中，通过缩放触觉设备的运动来实现机器人更大范围的运动；在后者中，则将触觉设备的运动直接映射到机器人，甚至进一步缩小映射比例。此外，由于触觉设备的力输出能力有限，无法将机器人的力反馈以 1:1 的比例映射到触觉设备。因此，反馈可能会让操作员感觉不自然，或提供不足的提示，例如在超过施加于力的安全限值时。

3.2 使用两台相同协作机器人的主从式遥操作

或者，在本研究中，我们考虑采用由两台配置完全相同的 Franka Emika Panda 协作机器人组成的平台，并以主从配置运行。在这种方法中，用户直接操控 Franka 主臂，其运动会直接映射到从动机械臂。由于两台机器人具有相同的配置，因此关节位置和力矩均可在两台机器人之间进行 1:1 映射。这种

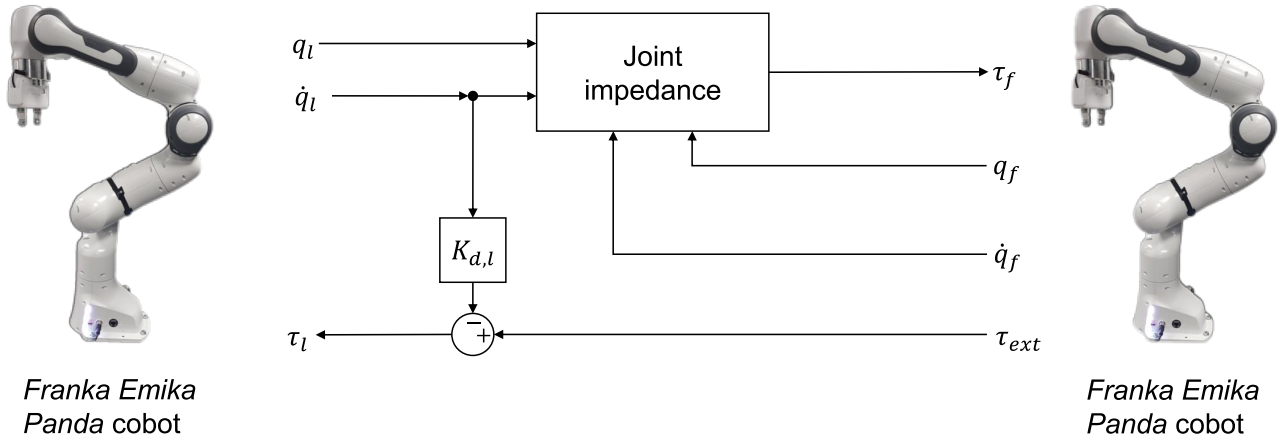


图 4. 由两个相同的 Franka Emika Panda 协作机器人组成的遥操作框架概述。

1:1 映射能够向用户提供自然且灵敏的反馈。然而，这也带来了安全隐患，因为用户可能会承受特定任务中涉及的全部力。两条机械臂采用关节空间控制，在处理奇异点和关节限位问题方面也具有优势；而将主端的笛卡尔末端执行器位姿映射到从机器人的任务空间位姿时，则会遇到这些问题。然而，缺乏任务空间控制也可能带来潜在缺点：在沿特定任务方向执行任务时，例如拆卸螺栓或进行切割，任务会变得更加困难，用户操作也不够直观。

4 方法

为实现主从设备之间的虚拟耦合，我们首先考虑关节空间中刚性 N 连杆机械臂的动力学方程

$$\mathbf{M}(\boldsymbol{q})\ddot{\boldsymbol{q}} + \mathbf{C}(\boldsymbol{q}, \dot{\boldsymbol{q}}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) = \boldsymbol{\tau}_{\text{ext}} + \boldsymbol{\tau} \tag{1}$$

其中，$\mathbf{M} \in \mathbb{R}^{N\times N}$、$\mathbf{C}(\boldsymbol{q},\ \dot{\boldsymbol{q}}) \in \mathbb{R}^{N\times N}$、$\boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}) \in \mathbb{R}^{1\times N}$分别为关节空间惯性矩阵、科里奥利力和离心力矩阵以及重力力矩；$\boldsymbol{\tau}_{\text{ext}} \in \mathbb{R}^{1\times N}$、$\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^{1\times N}$分别为作用于各连杆上的外部力矩和控制力矩向量。我们用下标 l，f 分别表示主端和从设备的关节构型 $\boldsymbol{q}$ 及指令力矩 $\boldsymbol{\tau}$。

对于触觉设备而言，由于其运动链具有 6 个自由度，而 Franka 机械臂具有 7 个自由度，因此实际上无法实现各关节之间的 1:1 映射。因此，需要将关节空间映射到机器人完整关节空间的一个缩减子集，或在笛卡尔空间中进行操作。在本研究中，采用笛卡尔映射，在所有笛卡尔运动轴（XYZ 平移和旋转）上使用 Phantom Omni 主操作臂对从动 Franka 机械臂进行速度控制。当人类操作员在主操作臂的工作空间内移动主操作臂时，会计算由位置和姿态组成的增量笛卡尔位姿 $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{l}}$，然后将其指令发送至从动机械臂。然而，由于两条机械臂的参考坐标系不同（如图 5 所示），增量笛卡尔位姿 $\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{l}}$ 需要经过变换，才能相对于 Franka 机械臂基坐标系进行正确映射。该变换映射计算如下：

$$^{F}\mathbf{T}_{\Delta} = {}^{P}_{F}\mathbf{T} \cdot {}^{P}\mathbf{T}_{\Delta} = \left[\begin{array}{cc} {}^{F}\mathbf{R}_{\Delta} & {}^{F}\boldsymbol{t}_{\Delta} \\ \hline 0 & 1 \end{array}\right] \tag{2}$$

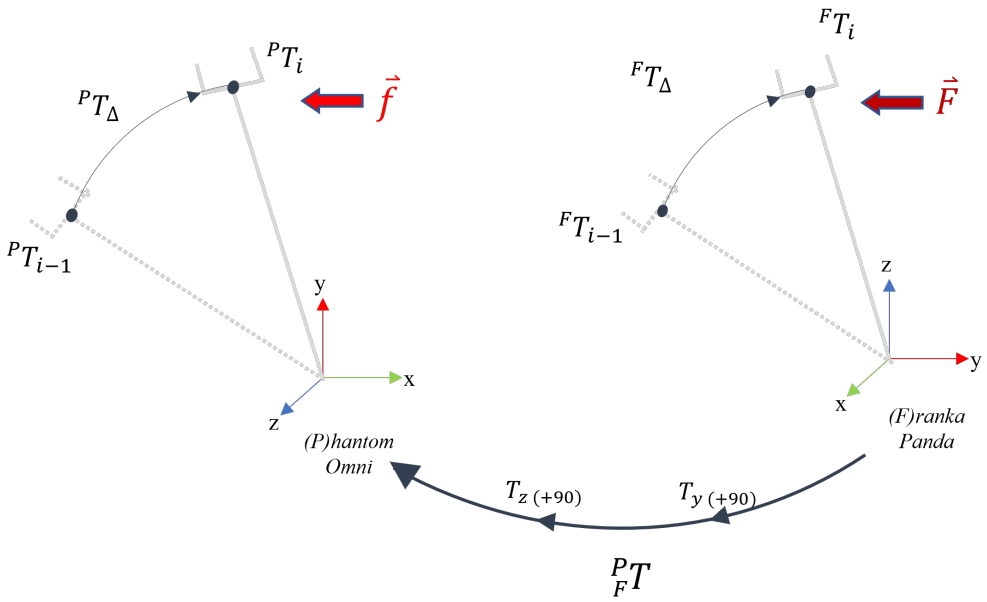


图 5。 在*Phantom Omni*触觉设备与*Franka Panda* 机械臂之间的主从式遥操作设置中进行笛卡尔映射。

其中，$^{P}_{F}\mathbf{T}$ 是从 Franka 机械臂基坐标系到 Phantom Omni 基坐标系的齐次变换矩阵，$^{F}\mathbf{T}_\Delta$和 $^{P}\mathbf{T}_\Delta$ 分别表示 Franka 和 Phantom 的增量变换矩阵。$^{P}\mathbf{T}_\Delta$ 的位置和姿态分量被赋值给期望位姿 $\boldsymbol{x}_t$，以计算从动机械臂的位姿误差$\boldsymbol{e}_x = \boldsymbol{x}_f - \boldsymbol{x}_t$。因此，从动机械臂的控制律为：

$$\boldsymbol{\tau}_f = \mathbf{J}^{\mathsf{T}}\left(-\mathbf{K}_p\boldsymbol{e}_x - \mathbf{K}_d\mathbf{J}\dot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{f}}\right) + \mathbf{C}(\boldsymbol{q}_{\boldsymbol{f}}) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}_{\boldsymbol{f}}) \tag{3}$$

其中，$\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{7\times6}$ 是从动机械臂雅可比矩阵，用于将关节速度映射为末端执行器速度；$\mathbf{K}_p$和$\mathbf{K}_d$分别是控制器的刚度矩阵和阻尼矩阵。这使系统实现了式（1）所示的期望闭环动态行为（其中 $\boldsymbol{\Lambda} \in \mathbb{R}^{6\times6}$ 是操作空间惯性矩阵）：

$$\boldsymbol{\Lambda}\ddot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{f}} + \mathbf{K}_d\dot{\boldsymbol{x}}_{\boldsymbol{f}} + \mathbf{K}_p\boldsymbol{e}_x = \boldsymbol{F}_{\text{ext}} \tag{4}$$

力反馈 是双边遥操作系统的重要组成部分，该系统以控制频率维持力反馈。这有助于用户通过触觉感知了解从机器人所处的环境。与式（2）类似，Franka 末端执行器所受的外力向量 $\boldsymbol{F}_{\text{ext}}$ 将相对于 Phantom 进行变换，使用户能够感知到力 $\boldsymbol{F}_l$，如下所示：

$$\boldsymbol{F}_l = G \cdot {}^{P}_{F}\mathbf{T}^{-1} \cdot \boldsymbol{F}_{\text{ext}} \tag{5}$$

由于主从设备的力输出能力不匹配，反馈按系数 $G = 0.1$ 进行缩放。该系数通过实验确定：将初步数据中所有任务的预期最大力与触觉设备（3.3 N）的最大力输出能力进行比较，并据此进行缩放。为尽可能减少对力反馈的失真，并与相同协作机器人配置下恒定的 1:1 反馈保持一致，该系数在所有试验中保持不变。

对于 Franka 机械臂，采用关节阻抗控制方案，将主操作臂的关节配置直接映射到从动机械臂（图 4）。控制律定义如下：

$$\boldsymbol{\tau}_f = -\mathbf{K}_p \boldsymbol{e}_q - \mathbf{K}_d \dot{\boldsymbol{e}}_q + \mathbf{C}(\boldsymbol{q}_f) + \boldsymbol{g}(\boldsymbol{q}_f) \tag{6}$$

其中 $\boldsymbol{e}_q = q_f - q_l$ 是关节空间误差。这将产生从动机械臂在关节空间中的闭环动力学

$$\mathbf{M}\ddot{\boldsymbol{q}}_{\boldsymbol{f}} + \mathbf{K}_d \dot{\boldsymbol{e}}_q + \mathbf{K}_p \boldsymbol{e}_q = \boldsymbol{\tau}_{\text{ext}} \tag{7}$$

为向用户提供力反馈，主端控制力矩计算如下：

$$\boldsymbol{\tau}_l = \boldsymbol{\tau}_{\text{ext}} - \mathbf{K}_{d,l} \dot{\boldsymbol{q}}_l \tag{8}$$

其中，力反馈直接计算为施加于从动机械臂的估计外部力矩。由于施加于主操作臂的力较大，而人类操作员的刚度较低，因此在主操作臂的响应中加入额外的阻尼项$\mathbf{K}_{d,\ l}$以减少双边主从耦合导致主操作臂位移所引起的振荡。

5 案例研究

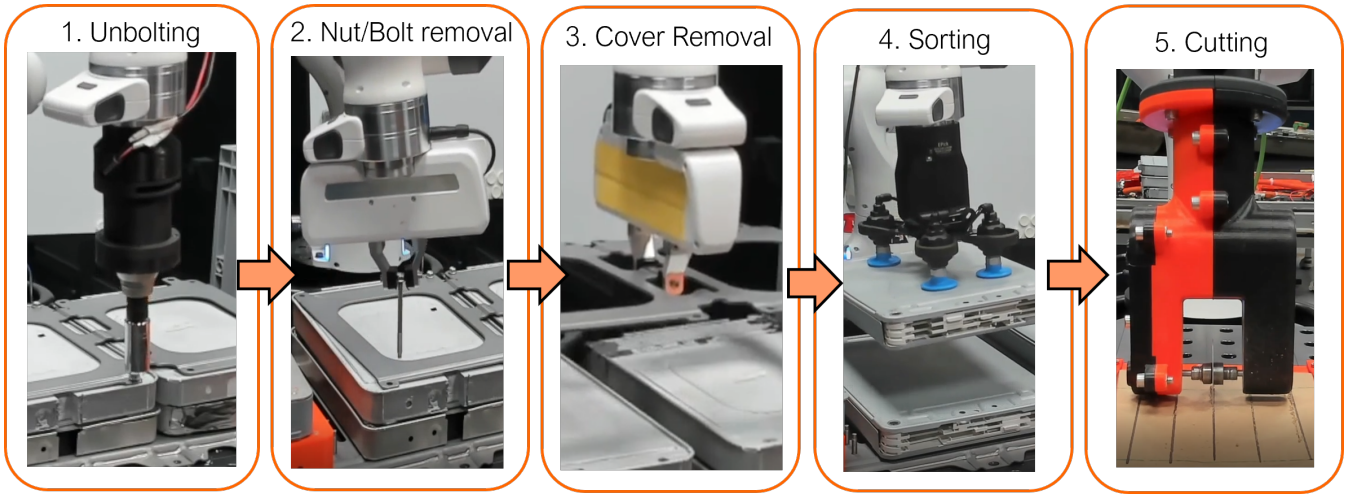


图6。电动汽车电池拆解流程的一部分，展示了本研究中按顺序进行实验的案例研究：1）拆卸螺栓紧固件。2）移除紧固件。3）移除模块盖板。4）模块分类。5）表面接触切割。

研究确定了一组连续任务，涉及从2011款日产聆风的电池包中拆解并取出一堆模块；这些任务被认为适合作为机器人拆解的目标，如图6所示。本案例研究涵盖了从单个模块堆中拆解并回收电池模组所需的一系列高接触任务。模组含有电池中的活性材料，因此，鉴于相关的操作风险，例如接线端子短路风险以及因操作不当而受到机械冲击的风险，它们被视为拆解过程中的安全关键环节。每项任务均尝试五次（试验）。对于每项任务，操作员可通过两个固定的摄像机视角观察模组堆，除此之外无法直接看到作业场景。除切割任务外，所有任务的摄像机视角均保持不变；在切割任务中，操作员看到的则是材料夹持器及其中切割工件的两个摄像机视角

。开始每项任务之前，主从机器人均会初始化至关节空间中的一个固定初始位置，该位置在所有任务中保持不变。本研究的重点并非人因分析，也不是基于终端用户评估的主观表现测量，而是任务表现的客观测量，因此假定操作员熟悉这两个远程操作平台并具备相关经验。此外，每位操作员在首次尝试每项任务之前，均使用两种遥操作系统分别接受了10分钟的任务训练。共有四名专家操作员参与研究。每次试验均随机选取一名操作员执行任务。以下将对各项任务作更详细的说明。

5.1 拆卸螺栓

此任务是拆卸一组用于固定单个模块堆的 4 个紧固件。操作员可以使用安装在机器人腕部的电动万用套筒扳手工具。操作员负责将套筒扳手与螺栓对准，并操作工具拧下紧固件。如果无需进一步拧卸操作，螺栓即可用手取下，则认为任务成功。如果首次尝试后未满足成功条件，或超过机器人设定的力阈值（40N），则认为任务失败。

5.2 拆除紧固件

本案例研究承接前一拆卸螺栓阶段，在拆除盖板之前，先从模块堆中逐一取下紧固件。此任务使用了 Franka Hand，设定的抓取力为 50N。操作员需要通过将机械手移向每个紧固件，抓取并从模块堆中取下螺栓，再将其放入容器，来拆除一组 8 个紧固件。由于物体的摄像机视角有限，操作员必须结合触觉与视觉探索，才能成功拆除紧固件。对于每个螺栓，如果首次抓取尝试后仍未抓住螺栓，或在目标容器外失去抓取，则满足失效条件。

5.3 移除模块盖板

移除紧固件后，操作员必须移除模块盖板，才能接触下方的模组堆叠。由于盖板的重量和几何形状，操作员必须找到合适的抓取点并向其移动，以确保移除过程中盖板能够安全搬运。所有实验中配置的抓取力均提高至 60N。如果首次抓取不成功，或盖板在搬运过程中失去抓取，则视为满足失效条件。

5.4 模块分类

本案例研究考察了使用真空吸盘夹爪对电动汽车电池模块进行拆垛和分拣。操作员必须从堆叠中移出一对模块，并将其放入容器中。该任务要求通过视觉定位，将夹爪定位到适合抓取的表面，同时保持接触，使吸盘与材料接合，且不超过机器人的力限值。与外壳移除案例研究类似，如果首次抓取不成功，或在搬运过程中失去抓取，则视为满足失效条件。

5.5 接触式切割

还可以执行其他半破坏性拆解任务，进一步拆解独立模块，以取出锂离子电芯，或分离并移除不适合

	触觉		Franka	
	成功率 [%]	平均任务时间 [秒]	成功率 [%]	平均任务时间 [s]
拆卸螺栓 (4×)	95	188±23	85	124±13
拆除螺母和螺栓 (8×)	63	713±89	50	410±63
外壳移除	100	101±15	100	70±6
模块分类 (2×)	90	179±19	60	77±5
切割	60	122±26	80	95±18

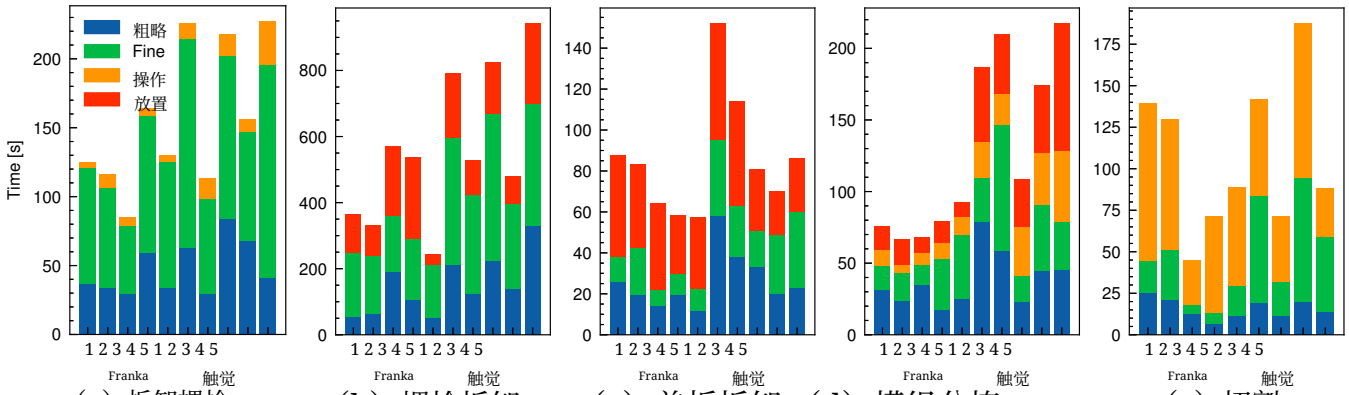
表 2. 使用 Phantom Omni 触觉设备和相同的协作机器人（Franka）平台进行远程操控时，各拆解任务性能指标的比较。

进行无损拆卸的紧固件或连接器。我们以使用开缝锯工具沿预先标记的视觉目标路径对平面材料进行接触式切割为案例研究。由于电池材料供应有限且主轴功率受限，我们将切割纸板作为切割不同平面材料这一更一般流程的基准。操作员必须利用触觉反馈来控制切割力，同时利用视觉反馈沿路径实现精确定位。目标切割路径为标记路径质心周围宽度为 $\pm 2.5\text{mm}$ 的窗口。如果切割偏离路径超过此阈值，或未能沿目标路径的部分区段完成切割，则满足失效条件。

6 结果与讨论

表 2 汇总了每个案例研究中所有试验的总体**成功率**和平均任务**完成时间** 。对于所有任务，两种平台的成功率均不低于 50%；其中，使用相同协作机器人执行螺栓拆卸任务时，成功率最低，为 50%。大多数任务的成功率超过 75%，表明使用协作机器人和触觉设备远程机器人平台均可行地完成模块堆叠拆卸流程。就各平台之间的表现而言，拆卸螺栓和螺栓拆卸的成功率大致相当，操作员的成功率比相同协作机器人的情况高 10–15%。不过，外壳移除显然是最简单的任务，因为它几乎只需沿平面轨迹运动；只要操作员能够在盖板上找到牢固的抓取点即可，而两种平台的所有操作员在所有试验中均 100% 成功找到了抓取点。另一方面，拆垛和切割任务的表现差异最大：前者中，触觉设备的表现比相同协作机器人高出 30%；后者则相反，成功率提高了 20%。拆垛结果可以通过真空吸盘夹爪的设计机制来解释：要成功抓取，夹爪必须与模块表面直接接触，更重要的是，夹爪姿态必须与模块表面垂直。因此，在触觉平台上通过笛卡尔空间操控吸盘夹爪的位置/姿态来满足这一要求，比在相同协作机器人平台上通过关节空间操控取得了更高的成功率；后者因方向错位而出现抓握失败。此外，切割试验的结果凸显了力反馈的重要性。相同协作机器人平台的成功率较高，因为其力反馈保持在 1:1 的比例；而触觉平台受限于其力输出能力，力反馈按比例缩小，如式 (5) 所示。因此，切割过程中，用户无法感受到末端执行器所受的全部比例缩放力。

图 7 按试验详细分解了任务完成时间，展示了各试验在每个阶段所耗费的时间。根据任务不同，这些阶段会将每项任务从开始到完成依次细分为以下类别：“粗略”阶段：操作员通过对工具进行粗略的视觉对准来远程操纵机器人；随后是“精细”阶段：利用触觉和视觉反馈，将工具精确定位至交互点。在“操作”阶段，操作员进行交互



（a）拆卸螺栓 （b）螺栓拆卸 （c）盖板拆卸 （d）模组分拣 （e）切割

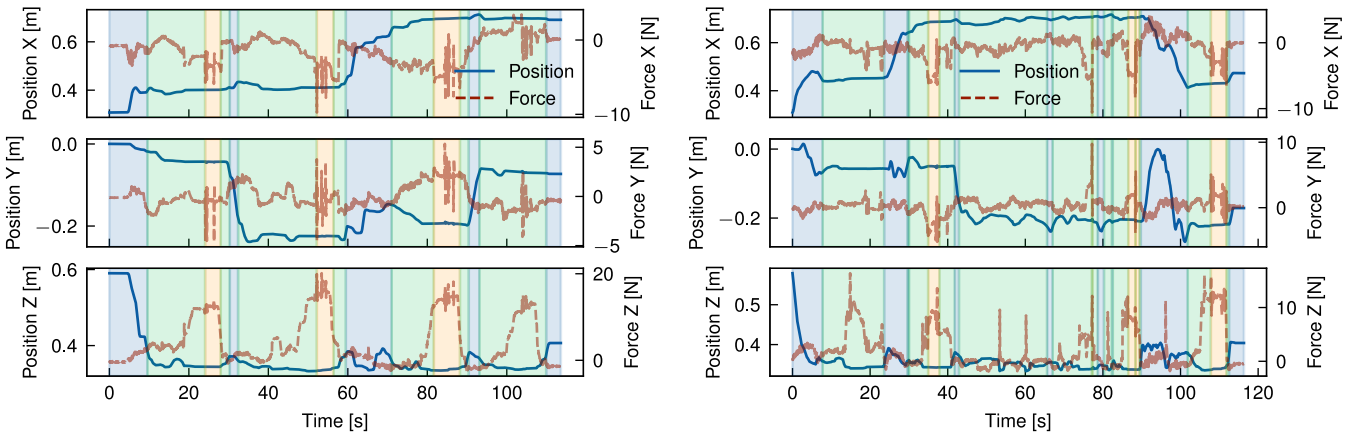
图 7. Haptic 与 Franka 远程操控主端设备在各任务试验中的任务完成时间细分。当任务完成前触发失效条件（例如违反设定的力限值）时，不显示相应数据。任务大致分为 4 个阶段：“粗略”阶段，即近似的工具视觉对准；“精细”阶段，即精确的视觉与触觉对准；“操作”阶段，即与任务相关的操作，例如拆卸螺栓、切割；以及“放置”阶段，即用户放下抓取的物体。

，在工具成功对准后与组件交互以执行任务。这些操作分别对应于拆卸螺栓、抓握以及启动切割器，分别用于拆除螺母和螺栓、分拣和切割。最后，在成功抓取目标物体后，抓取任务会进入“放置”阶段；在此阶段，操作员移动所抓取的物体，并将其释放到目标位置。粗略阶段和精细阶段根据工具与任务相关目标之间的接近程度进行标注；例如，当工具与目标（螺栓和盖板抓取点）的距离在 5 cm 以内时，即表示处于精细对准阶段。放置阶段定义为抓取后执行的粗略运动；释放所抓取物体后，运动会回到粗略阶段。操作阶段则根据特定任务的位置和力阈值进行标注。例如，对于分拣任务，与任务相关的操作是启动并移开吸盘，以抓取模块。根据图 7 所示的 4 个阶段分解，可以清楚地了解操作员在任务的大部分时间中处于哪些阶段，并表明他们在两个可比较平台上完成各阶段任务时所付出的努力。

从图 7 的概览可以看出，与触觉平台相比，相同的协作机器人平台在所有任务中的平均完成时间都更短。此外，两个平台的平均完成时间差异在螺栓拆卸和分拣任务中最大，使用触觉设备完成这些任务的平均耗时分别长 $\sim$1.7– 2.3$\times$ 。对于所有任务，使用相同的协作机器人平台时，各试验间的绝对任务完成时间更加一致。为了以不受时间尺度影响的方式评估任务完成时间的差异，采用标准化均差（SMD）效应量指标。给定各平台的均值和标准差（$\bar{t}_h$, σ_{t_h}）、（$\bar{t}_f$, σ_{t_f}），SMD 可定义为：

$$\mathrm{SMD} = \frac{\bar{t}_h - \bar{t}_f}{\sqrt{\sigma_{t_h}^2 + \sigma_{t_f}^2}} \tag{9}$$

并评估了各平台相对于试验间变异程度对完成时间的影响。$|\mathrm{SMD}| \geq 0.8$ 的数值越大，表明影响越显著；反之则表明影响较小或处于边缘水平。



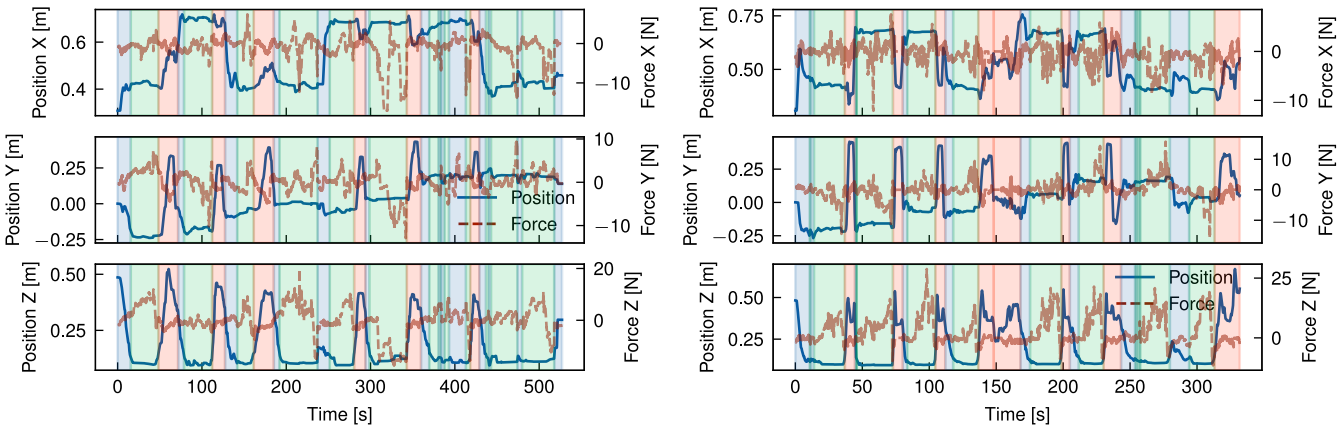
（a）触觉主端 （b）Franka 主端

图 8. 使用电动万用套筒扳手工具执行**卸螺栓任务**（试验 2）时，末端执行器的位置与估计外力的叠加图。力的增加（~10-15N）发生在表面法向（Z）方向，表明与螺栓接触，并通过触觉探索确定工具的正确对准位置。卸螺栓操作的执行过程表现为这些峰值附近的力快速波动。

对于所研究的模块堆叠拆卸案例，最大比例的时间用于拆卸螺栓和移除固定紧固件。从图 7a 和图 7b 可以看出，在两个平台中，“精细”阶段分别占平均任务完成时间的 60%、63% 和 47%、50%；因此，精细对准阶段是整体任务完成速度降低的主要因素。这表明，无论使用哪种平台，这两项任务在其他拆解任务中都是最费力的；要成功拆卸螺栓并移除紧固件，需要将工具进行精确的视觉与触觉对准。然而，拆卸螺栓和螺栓拆卸的 SMD 分别为 1.09 和 1.24，这表明相同的协作机器人配置带来了显著改善。

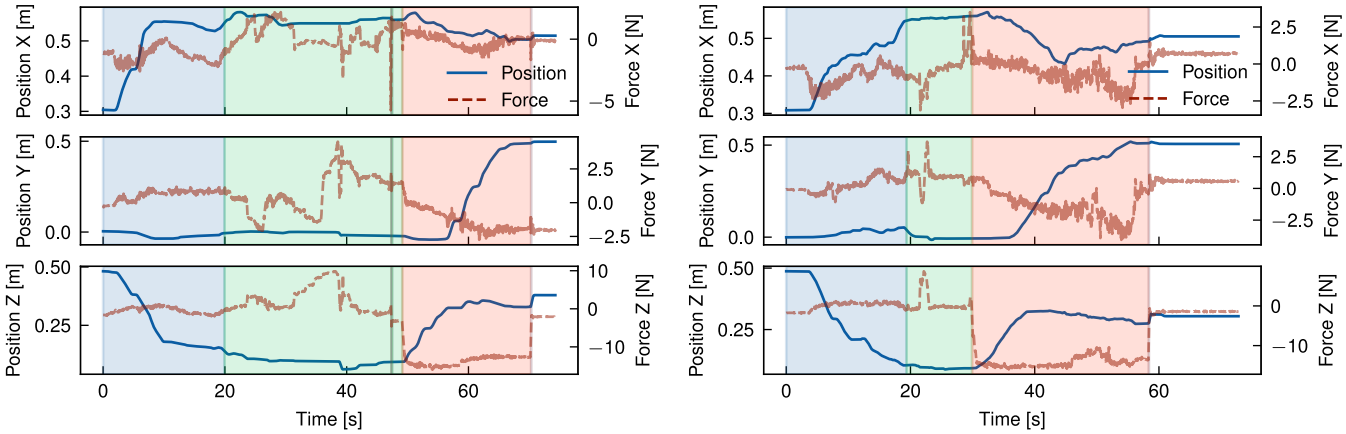
图 8–11 展示了案例研究中两个平台各项任务的抽样试验期间，Franka 从端末端执行器在笛卡尔空间中的位置图，以及其所受的外力。这些图还显示了试验时间跨度内各图背景中以不同颜色标示的 4 个分类阶段（“粗略”“精细”“操作”“放置”），对应图 7 中介绍的各阶段。图 8 中黄色区域（“操作”阶段）内力 z 图上的尖峰，对应于使用扳手工具拆卸螺栓紧固件的操作。类似地，图 9 展示了螺栓拆卸任务：抓取紧固件，将其从孔中提起并放入容器；因此，红色区域（“放置”阶段）出现了位置 z 尖峰。有趣的是，尽管两个平台的力反馈尺度不同，螺栓拆卸任务中观察到的外力大小随时间变化的情况在两个平台上相似。这表明，与力反馈在接触期间提供的方向引导相比，力反馈的真实感和缩放对于完成精确的拆解抓取任务并不那么重要。

一些任务涉及在拆解后将部件放入废弃物／回收箱中，例如盖板拆卸任务，其中大部分时间用于抓取后操作，即“放置”阶段。使用协作机器人和触觉平台时，操作员平均分别花费 39 秒和 37 秒放置物体，约占任务完成时间的 56% 和 35%。对于协作机器人平台，约 30% 的时间花费在“放置”阶段；由于缺乏笛卡尔控制，操作员会进入某些关节构型，需要在任务之间进行大幅重新构型才能进入工作空间。这一点在图 9 约 150 秒处十分明显。比较图 10 中的试验 4，其中任务



（a）触觉主端 （b）Franka 主端

图 9. 使用双指夹爪执行**螺栓拆卸**任务（试验 2）时，末端执行器的位置与估计的外力叠加图。位置对准大致可分为快速视觉对准阶段（Z 位置快速下降）和随后较慢的精细视觉与触觉对准阶段（Z 位置趋于平稳）。X-Y 平面内的力变化表明，系统正在进行触觉探索，以寻找合适的螺栓抓取点。

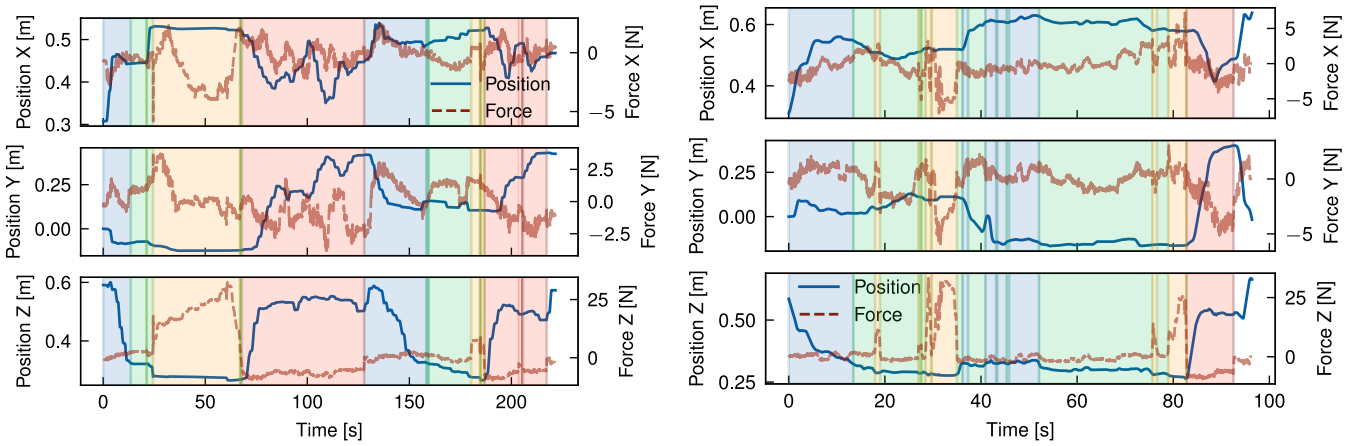


（a）触觉主端 (b) Franka 主端

图 10. 使用双指夹爪执行**外壳移除**任务（试验 4）时末端执行器位置与估计外力的叠加图。初始粗略对准阶段的标志是 Z 位置快速下降，随后是由触觉反馈引导的精细对准。盖板的抓取和释放表现为沿 -Z 方向施加和释放 ∼14N 的力。

时间差异较小（标准化均值差 0.85），表明在相近的 ∼20 秒时间尺度内即可完成带有正确抓取点的粗略对准。对于触觉平台，更多时间花费在与正确抓取点进行精细对准上；而对于 Franka，这段时间主要用于抓取后操作。

对于模块分拣任务，任务完成时间显著缩短，标准化均值差为 2.31。与其他任务类似，粗略和精细对准的速度均有所提升，不过完成时间的减少源于任务所有阶段所用时间的缩短，包括“操作”阶段。如图 11 所示，位置对准后，力会增大（最高达 ∼25N），表明操作员尝试在模块表面实现成功的吸附抓取。与之前的任务一样，两个平台的力反馈幅度基本一致；然而，在操作阶段，操作员使用触觉设备时表现出更缓慢、更谨慎的操作方式，其特点是法向（+Z）力缓慢上升。直观而言，操作员会结合视觉

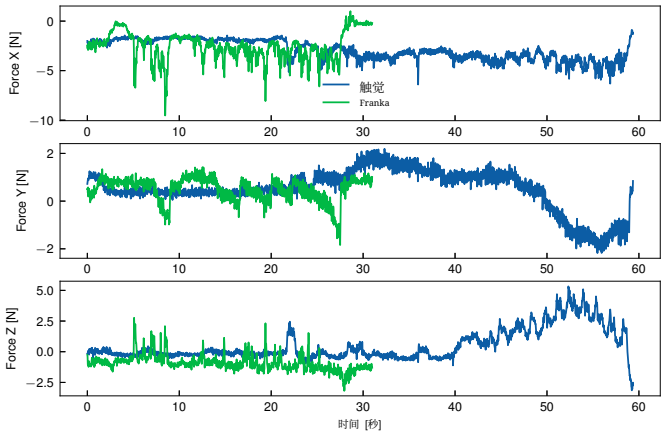


(a) 触觉主端 (b) Franka 主端

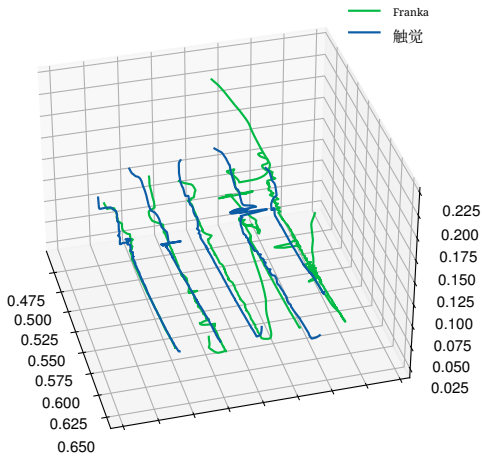
图 11. 使用真空吸盘夹爪执行**模块分类**任务（试验 5）时，末端执行器位置与估计的外力的叠加图。初始粗略对准阶段以 Z 位置快速下降为标志，随后通过触觉反馈引导精细对准。施加和释放 Z 轴负方向上的 ∼8N 力，表明模块被抓取和释放。

和触觉提示来判断吸盘是否已与表面接触。这种行为可能由多种因素共同导致：首先，与使用 Franka 时位置对准更快的原因相似，例如 1:1 位置映射；其次，操作员通过 1:1 力映射，能够像直接操控从动机械臂一样，更直观地识别正确的力阈值。随后，“操作”阶段进入“放置”阶段（红色区域），模块在此阶段被移出场景。与盖板拆卸任务相比，使用 Franka 进行抓取后操作所花费的时间，无论按比例还是按绝对时长计算，都短得多。对比图 10 和图 11 中这些阶段的试验分解结果，可以看出任务表现中存在与用力相关的因素，这是由于盖板承受的载荷更大（在 Z 方向尤为明显）。此外，与模块相比，盖板的质量分布更分散，而模块的大部分重量集中在抓取点附近。因此，盖板的定位要求更高，因为旋转关节需要更大的扭矩；而对于笛卡尔坐标控制的触觉-Franka 平台而言，这一要求在很大程度上被抽象化了。图 10 中更平缓且曲折的路径也印证了这一点。因此，逼真的力反馈可能有利于任务中的高接触阶段；但采用 1:1 外部力矩反馈的遥操作框架，应注意这可能会对自由空间中的操作产生不利影响。

对于切割任务，0.41 的较小标准化均值差表明，相对于试验间变异，Franka 平台对任务完成时间的影响微乎其微。切割是一项取决于材料和工具特定参数等众多因素的复杂任务，不同任务试验之间的完成时间存在较大差异。对于 Franka，完成切割任务本身所占用的时间比例更高。使用触觉设备时，平均而言可以更快地完成该任务；然而，工具与目标路径的初始对准需要占用更多时间（55%）。尤其是精细对准阶段对切割任务而言具有独特性，因为操作员必须完全依靠视觉对准目标路径；这进一步表明，所呈现任务的完成时间之所以缩短，在很大程度上与 Franka 所提供的更大工作空间和 1:1位置映射有关，而非源于触觉反馈逼真度的提升。然而，在切割任务期间，反馈的逼真度相对更为重要。图 12a 展示了两个平台在接触式切割任务中的力曲线，可以据此进行分析。值得注意的是，触觉试验中的力在切割操作接近结束时持续增大，这可归因于操作员设定点逐渐偏离横向（Y）方向的路径，以及切削深度（-Z）的增加。



（a）试验 3 的切割力



（b）所有试验的切削路径

图 12. 单次试验中各远程机器人技术平台之间的切割力比较，以及所有试验中各操作员所采用的总体路径。

对于 Franka，在横向方向上也可以观察到类似的效应，但这些偏差会在切割任务进行过程中迅速得到纠正。这种力反馈向操作员提供了重要线索；在触觉设备情况下，这些线索要么被忽略，要么不足以促使操作员作出反应；在大多数触觉试验中都观察到了类似的力曲线。

采用相同协作机器人的系统具备更强的反馈能力，但也存在一些值得注意的缺点。从图 12b 可以清楚看出，在 Franka 案例研究中，用户采用的切割路径沿目标路径长度方向存在小幅变化。这可能是由于缺乏任务空间控制、Franka 可实现的运动幅度更大，以及人类手臂刚度较低所致。由于这些因素，主操作臂会对切削过程中执行的运动所产生的力反馈迅速作出响应，从而偏离操作员的目标路径，产生小幅偏转。这一点可以从图 12a 中与进给方向相反的（+X）力曲线看出，该曲线相对而言变化更大且不连续。对于强度更高的材料，由于与进给速度相关的切削力增加，预计这一影响的重要性也会随之提高。在缺乏补救策略的情况下，这会降低切削质量并增加用户的体力负荷。然而，采用诸如缩放提供给用户的力反馈，或对主操作臂施加笛卡尔阻抗行为以引导用户沿路径运动等补救策略，会导致反馈失真，从而降低交互的真实感。

在包含 4 个模块的模块堆叠拆卸案例研究中，触觉平台和 Franka 平台的拆解总时间平均分别为 25.8 分钟和 14.7 分钟；使用两个相同的协作机器人时，总完成时间减少了 43%。对于由 4 次直线切削操作组成的模块盖板分离过程，估计每个模块需要 8 分钟才能露出电池单体；使用相同协作机器人的情况下，所需时间可减少 25%。总体拆解时间表明，尽管远程操控拆解切实可行，但仍需通过多项效率改进和辅助策略来提高拆解速度。然而，文献中不同电池型号的拆解时间估算和技术经济分析结果差异很大。例如，有估算认为需要 12 秒

进行手动拧卸，手动移除未固定部件则需要 6 秒；这一估算适用于多种电池设计（Lander 等人，2023），意味着与手动拆解相比，效率会大幅降低。Alfaro-Algaba 和 Ramirez（2020）针对奥迪 e-Tron 混合动力车型进行的另一项技术经济分析估算，整包拆解至模块所需的总时间为 30 分钟。然而，Baazouzi 等人（2021）估算，从 SmartForFour 中取出电池模组每个需要 10 分钟，而由 2 名工作人员拆解独立模块则需要 135 分钟。在模块层级之下，拆解工作还受到成本高昂的切割操作显著阻碍，因为必须通过切割才能露出独立电池单体。总体而言，不同电池设计中普遍存在这一情况，主要原因是设计的隔舱化程度高，并且采用了难以无损拆除的焊接点、胶水和过盈配合紧固件（Lander 等人，2023；Baazouzi 等人，2021）。

7 结论

本研究展示了对2011款日产聆风电池包中一堆模块进行遥操作机器人拆解。研究比较了两种配置：一种是由触觉设备与协作机器人配对组成的主从式配置，另一种是两台相同的协作机器人；并考察了这些配置在拆卸螺栓、取出螺栓、抓取并移除盖板、使用吸盘夹爪分拣模块以及接触式切割等任务中的成功率和完成时间。尽管使用触觉设备时总体成功率较高，但研究发现，采用配对的相同协作机器人显著缩短了整组拆解任务的完成时间，并提高了时间一致性。这表明，对于完成精细操作任务而言，力反馈的质量和真实感相对没有那么重要；相比之下，主端接口与从设备之间的 1:1 位置映射以及更大的工作空间，是提升效率的主要因素。虽然相同协作机器人之间的 1:1 力矩映射有利于使用真空夹爪进行抓取和切割，这主要归功于它增强了交互的真实感并为操作员提供了更明显的触觉提示，但同时也增加了操作者的体力消耗，并降低了切削质量。

本研究的局限性在于，仅在假设操作员熟悉必要的任务和遥操作平台（专家操作员）的前提下，考察了任务表现的客观测量指标。然而，要进行全面比较，还必须考虑不同经验水平的操作员，并考察主观表现指标，例如 NASA 任务负荷指数中所确立的指标，这些指标可用于衡量拆解任务序列中的认知负荷和努力程度。此外，尽管本研究以2011款日产聆风电池包的拆解案例为研究对象，但目前市场上流通着种类繁多的电动汽车电池，其设计在不同制造商和车型之间存在广泛差异。因此，未来可扩展本研究，纳入范围更广的电池设计，从而更全面地了解电动汽车电池拆解过程中预期的任务表现水平。

利益冲突声明

作者声明，本研究是在不存在任何可能被理解为潜在利益冲突的商业或财务关系的情况下开展的。

作者贡献

概念构思，A.R.；方法，J.H.、A.S.和 A.R.；软件，A.S.、J.H.和 A.A.；调查，A.S.、J.H.、A.A.和 A.R.；验证，J.H、A.S 和 A.R；数据整理，J.H.和 A.S.；正式分析，J.H.和 A.S.；可视化，J.H.和 A.S.；撰写—初稿，C.A.、J.H、A.S 和 A.R；撰写—审阅与

编辑，A.R.、C.A.和 J.H；资源，A.R.和 R.S.；监督，A.R.和 R.S.；经费获取，A.R.和 R.S.；项目管理，A.R.

资金支持

本研究是“锂离子电池再利用与回收利用”（RELiB）项目的一部分。法拉第研究所为本研究提供了支持，[资助编号为 FIRG005]。

致谢

作者谨此感谢 Christopher Gell 提供技术支持。

参考文献

Abi-Farraj, F.、Pacchierotti, C.、Arenz, O.、Neumann, G. 和 Giordano, P. R.（2020年）。用于引导式多目标机器人抓取的触觉共享控制架构。《*IEEE*触觉学报》13，270–285。doi:10.1109/TOH.2019.2913643 Abi-Farraj, F.、Pacchierotti, C. 和 Giordano, P. R.（2018年）。面向机器人远程操控的触觉增强共享控制方法的用户评估。载于 *2018 IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。1–9。doi:10.1109/IROS.2018.8594030 Abi-Farraj, F.、Pedemonte, N. 和 Robuffo Giordano, P.（2016年）。用于远程操控的基于视觉的共享控制架构。载于 *2016 IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。4266–4273。doi:10.1109/IROS.2016.7759628 Ai, N.、Zheng, J. 和 Chen, W.-Q.（2019年）。美国报废电动汽车电池：面向区域解决方案的动态库存建模与空间分析。《资源、保护与回收》145，208–219。doi:https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.01.021 Alfaro-Algaba, M. 和 Ramirez, F. J.（2020年）。面向再制造的电动汽车锂离子电池包技术经济与环境拆解规划。《资源、保护与回收》154，104461。doi:https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104461 Baazouzi, S.、Rist, F. P.、Weeber, M. 和 Birke, K. P.（2021年）。电动汽车电池拆解策略优化。《电池》7。doi:10.3390/batteries7040074 Bernold, L. E.（2007年）。遥操作机器人管道安装的控制方案。《建筑自动化》16，518–524。doi:https://doi.org/10.1016/j.autcon.2006.09.002 Bolarinwa, J. O.（2022年）。增强远程操作：研究感官反馈对性能的影响。博士论文，西英格兰大学工程与技术学院。。。Borr`as, J.、Heudorfer, R.、Rader, S.、Kaiser, P. 和 Asfour, T.（2018年）。用于拆解任务的 Kit Swiss Knife 夹爪：采用单臂进行双手操作的多功能夹爪。载于 *2018 IEEE/RSJ*智能机器人与系统国际会议（*IROS*）。4590–4597。doi:10.1109/IROS.2018.8593567 Choux, M.、Marti Bigorra, E. 和 Tyapin, I.（2021年）。电动汽车电池包机器人拆解的任务规划器。《金属》11 Fan, J.、Zheng, P.、Li, S. 和 Wang, L.（2022年）。用于人机协作拆解的显式遮挡感知手—物稠密姿态估计一体化方法。《*IEEE*自动化科学与工程汇刊》doi:10.1109/TASE.2022.3215584 Farhan, A. S.、Bassiouny, A. M.、Afif, Y. T.、Gamil, A. A.、Alsheikh, M. A.、Kamal, A. M. 等（2021年）。使用机器人自主进行电子元件的无损装配与拆卸

臂。载于 *2021*年第*16*届国际计算机工程与系统会议（*ICCES*）。1–7。doi:10.1109/ICCES54031.2021.9686083 Gil, P.、Pomares, J.、Puente, S.、D´ıaz Baca, C.、Candelas Herias, F. 和 Medina, F.（2007年）。使用协作机器人进行自动拆解的柔性多传感系统。《国际计算机集成制造杂志》20，757–772。doi:10.1080/09511920601143169 Giri, G. S.、Maddahi, Y. 和 Zareinia, K.（2021年）。触觉技术的应用综述。《机器人学》10。doi:10.3390/robotics10010029 Gliesche, P.、Krick, T.、Pfingsthorn, M.、Drolshagen, S.、Kowalski, C. 和 Hein, A.（2020年）。动觉设备与键盘/鼠标：居家护理远程操控的比较。《机器人学与人工智能前沿》7。doi:10.3389/frobt.2020.561015 He, X. 和 Chen, Y.（2008年）。虚拟远程操作中的六自由度触觉渲染。《*IEEE*仪器与测量汇刊》57，1866–1875。doi:10.1109/TIM.2008.919876 Ju, C. 和 Son, H. I.（2022年）。核电站维护与维修任务共享远程操作系统的以人为中心的评估。《国际控制、自动化与系统杂志》20，3418–3432。doi:10.1007/s12555-021-0770-0 Kay, I.、Farhad, S.、Mahajan, A.、Esmaeeli, R. 和 Hashemi, S. R.（2022年）。用于回收利用的电动汽车电池模组机器人拆解。《能源》15。doi:10.3390/en15134856 Lander, L.、Tagnon, C.、Nguyen-Tien, V.、Kendrick, E.、Elliott, R. J.、Abbott, A. P. 等（2023年）。拆解分析：电池包设计对拆解成本影响的技术经济评估。《应用能源》331，120437。doi:https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2022.120437 Li, G.、Caponetto, F.、Del Bianco, E.、Katsageorgiou, V.、Sarakoglou, I. 和 Tsagarakis, N. G.（2020年）。具有一个自由度主从不对称的远程操作不完整姿态映射。《*IEEE*机器人学与自动化快报》5，5167–5174。doi:10.1109/LRA.2020.3006796 Mizuno, N.、Tazaki, Y.、Hashimoto, T. 和 Yokokohji, Y.（2023年）。核电站退役碎片回收阶段机械臂远程操作方法的比较研究。《先进机器人学》0，1–19。doi:10.1080/01691864.2023.2169588 Pehlken, A.、Albach, S. 和 Vogt, T.（2017年）。汽车锂离子电池是否存在相关资源约束？《国际生命周期评估杂志》22，40–53。doi:10.1007/s11367-015-0925-4 Rastegarpanah, A.、Gonzalez, H. C. 和 Stolkin, R.（2021年）。用于电动汽车电池部件分拣的半自主行为树框架。《机器人学》10。doi:10.3390/robotics10020082 Rietmann, N.、H¨ugler, B. 和 Lieven, T.（2020年）。预测电动汽车销量轨迹及其对全球二氧化碳排放的影响。《清洁生产杂志》261，121038。doi:https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121038 Schmitt, J.、Haupt, H.、Kurrat, M. 和 Raatz, A.（2011年）。使用柔性夹爪实现锂离子电池系统的拆解自动化。载于 *2011*年第*15*届国际先进机器人学会议（*ICAR*）。291–297。doi:10.1109/ICAR.2011.6088599 Singh, J.、Srinivasan, A. R.、Neumann, G. 和 Kucukyilmaz, A.（2020年）。采用同构双主端的7自由度协作机器人臂触觉引导远程操作。《*IEEE*触觉学报》13，246–252。doi:10.1109/TOH.2020.2971485 Tan, W. J.、Chin, C. M. M.、Garg, A. 和 Gao, L.（2021年）。电动汽车电池拆解的混合拆解框架。《国际能源研究杂志》45，8073–8082。doi:https://doi.org/10.1002/er.6364 Tang, J.、Gao, Y. 和 Lam, T. L.（2022年）。平面覆盖任务中工人—工作站多机器人系统的协同学习。*arXiv*doi:10.48550/arXiv.2208.02993

Tang, Y. 和 Zhou, M.（2004）。考虑人为因素的模糊Petri网拆解规划。载于*2004*年*IEEE*国际系统、人类与控制论会议（*IEEE*目录号：*04CH37583*）。第5卷，4195–4200，第5卷。doi:10.1109/ICSMC.2004.1401189 Thies, C.、Kieckh¨afer, K.、Hoyer, C. 和 Spengler, T. S.（2018）。*LithoRec*工艺的经济评估（沙姆：施普林格国际出版）。253–266。doi:10.1007/978-3-319-70572-9 15 Tokatli, O.、Das, P.、Nath, R.、Pangione, L.、Altobelli, A.、Burroughes, G. 等人（2021年）。面向核工业的机器人辅助手套箱远程操作。《机器人学》10。doi:10.3390/robotics10030085 Zhang, H.、Yang, H.、Wang, H.、Wang, Z.、Zhang, S. 和 Chen, M.（2023年）。基于神经符号计算的自动驾驶电动汽车电池拆解。载于智能系统与应用，K. Arai 编（沙姆：施普林格国际出版），443–457 Zhou, Y.、Hu, H.、Liu, Y.、Lin, S.-W. 和 Ding, Z.（2019年）。一种面向多机器人系统运动规划的实时全分布式方法。*IEEE*《系统、人类与控制论汇刊：系统》49，2636–2650。doi:10.1109/TSMC.2017.2750911 Zorn, M.、Ionescu, C.、Klohs, D.、Z¨ahl, K.、Kisseler, N.、Daldrup, A. 等人（2022年）。一种利用计算机视觉、标注和材料表征对锂离子电池组进行自动化拆解和高质量回收的方法。《回收利用》7。doi:10.3390/recycling7040048