arXiv:2603.01495v1 [cs.HC] 2 Mar 2026

用于遥操作的相对与绝对装配层级的双手XR规范

Ben Yang* Xichen He* Charlie Zou* Jen-Shuo Liu* Barbara Tversky* Steven Feiner*

哥伦比亚大学

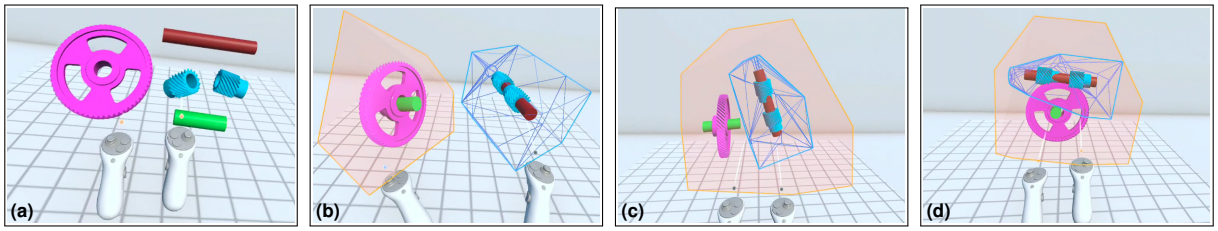


图1：装配层级结构的双手创作。(a) XR工作空间中齿轮系部件的虚拟副本：两根轴和三个齿轮。(b) 用户每只手抓取一个物体以创建约束组（图中显示了其中两个）。在输入轴和一个齿轮周围创建相对组（橙色半透明包围壳）；在输出轴和两个齿轮周围创建绝对组（蓝色线框包围壳）。相对组可由机器人放置；绝对组保持固定位姿。(c) 用户握住两个包围壳，将绝对组嵌套在相对组内，从而创建父子层级。线框子外壳出现在半透明父外壳内部。(d) 用户在相对父组内指定绝对子组的六自由度位姿，而相对父组的六自由度位姿可由机器人确定。即使相对父组被移动，绝对子组仍保持其相对于父组的六自由度位姿。

摘要

我们提出一种双手扩展现实交互方法，用于将远程装配任务指定为相对和绝对物体约束的层级结构，从而为机器人指定高层遥操作目标。每只手各抓取一个物体，即可创建一个约束组（以包围壳显示），并可将多个组嵌套成层级结构。相对于父级，每个组可以是相对组（其六自由度位姿可由机器人指定），也可以是绝对组（其固定六自由度位姿由用户指定）。相对组指定一个子装配体，机器人软件可以为提高效率而选择其构建位置，而不必受用户指定位置的限制。

索引词： 扩展现实、双手分组、约束指定、机器人远程操控。

1 引言

扩展现实（XR）通过物理物体的虚拟副本 [1]，使用户能够直观地指定机器人装配任务。在这一范式中，用户在扩展现实中指定装配约束（物体之间或物体与世界之间的空间关系），供机器人在物理现场执行。先前的研究提出了相对约束指定方法，其中物体位姿仅相对于彼此指定，而非采用绝对世界坐标 [10]。当只需关注物体间关系时，机器人可以在工作空间中的任意位置构建子装配体，并仅在需要时指定其相对于其他组件的位置。当精确的六自由度位姿至关重要时，则可以通过绝对约束将物体固定在特定位姿。

许多关于基于扩展现实的机器人任务指定的早期研究 [1, 2, 3, 4, 10]存在两个局限。首先，顺序选择物体要求用户一次选择一个物体来对其分组，而不是同时抓取多个物体以表示分组。其次，单层分组限制了对以下装配体的指定：必须先构建子装配体，再将它们组合起来（例如，安装齿轮、将轴组件装入壳体）。

我们通过采用双手交互并支持分层约束组来解决这些局限。我们的关键观察是，双手各抓取一个物体可以表达将它们连接起来的意图，这类似于在连接零件前用手实际握住它们。这一动作表明这些物体应当装配在一起；抓住一个已分组的物体时，还可以通过抓取其他物体（例如用于固定两块板的螺钉）将其加入组中。组以包围填充后的物体几何形状的凸包来呈现。通过抓取这些包围壳，可以将组嵌套成层级结构；父级包围壳在视觉上包围子级，以表示嵌套的子装配体。这种分层结构使机器人规划器能够规定装配顺序：子装配体可以先独立构建，再进行整合。由此产生的约束通过仿真和运动规划导出，以供机器人执行。因此，我们作出以下贡献：

- 一种双手交互技术：每只手各抓取一个物体即可创建约束组；抓住已分组的物体时，还可通过抓取添加其他物体。
- 一种层次化约束系统，具有嵌套的包围壳可视化和包围壳可见性控件，便于直观操作。
- 一种将层次化相对约束转换为模拟机器人执行的流水线，采用组间和组内优化。

2 相关工作

远程任务引导。 用于远程引导的扩展现实系统结合视频与三维重建，以形成共享的空间认知 [9]，；增强现实视觉提示则有助于机器人远程操控中的操作 [2]。对于机器人装配，虚拟副本支持目标指定 [1]，，而相对约束指定则使用包围壳可视化 [10]。我们在此基础上加入双手交互，以实现组创建和层次化约束嵌套。

双手扩展现实交互。 Voodoo Dolls [8] 通过双手操作临时代理对象来精确指定姿态，其中非惯用手为惯用手提供参考坐标系。近期研究使用双手手势进行 3D

*{by2297、xh2623、jz3331、jl5004、bt2158、feiner}@columbia.edu

基于手势的语法进行内容创作 [5, 6]。我们还使用双手输入来创建约束组，并将其排列成层级结构。

使用 XR 进行机器人任务规范。以往研究涵盖了从低层级的直接遥操作 [4] 到层次化方法；在这些方法中，高层级任务意图会指导低层级动作的生成 [3, 7]。我们让用户通过 XR 创作来指定必须满足的空间关系；机器人规划器则确定其余空间关系，并规划装配顺序和无碰撞路径。

3 系统描述

3.1 约束创建

用户可以通过双手交互指定装配关系，如图 1所示。控制器扳机按钮用于选择物体，握持按钮则用于选择包围壳，使控制器选择射线能够穿透包围壳碰撞体，实现嵌套选择。用户用双手的扳机按钮，同时从可选对象中各选择一个（图 1a），即可创建约束组；分组物体周围会出现包围壳作为视觉反馈。图 1(b) 展示了相对组和绝对组，详见下文。双手同时选择同一个物体，即可创建仅包含该物体的组。

组可以按层级嵌套（图 1c–d），方法是握持两个包围壳。先被握持的包围壳成为后被握持的包围壳的父级，从而实现对复杂装配体的组合式规范，且嵌套深度不受限制。父级包围壳在视觉上包围其子包围壳。握持一个包围壳并用扳机按钮抓取一个未分组物体，即可将该物体加入该包围壳的组。用一个控制器握持一个包围壳，并用另一个控制器的扳机按钮抓取属于不同组的物体，会创建一个新的父级包围壳，将这两个组作为其子级。为减少杂乱，用户可以应用包围壳可见性控制，使默认仅显示最外层包围壳，并在控制器移入某个包围壳时显示其子包围壳。组内子级的位姿在用户将该组导出到机器人流程以供执行之前始终可编辑。用户可在握持包围壳时按下指定按钮来删除该包围壳；该包围壳的子级随后成为被删除包围壳的父级的子级。

组可在抓取包围壳时按下按钮，在相对于其父级的两种模式之间切换：相对（具有可由机器人指定的六自由度位姿）和绝对（具有用户指定的固定六自由度位姿）。相对组由半透明包围壳包围；绝对组由线框包围壳包围。相对与绝对决定了该组与其父级的关系。每个物体都具有相对于其父级的绝对六自由度位姿。例如，位于绝对夹具组内的相对齿轮系组，其六自由度位姿可由机器人设置，但夹具组的六自由度位姿仍锁定于其父级。

3.2 机器人执行流程

我们的系统导出约束规范，其中包含六自由度位姿、组模式和层级关系。相对组允许机器人规划器使用非线性优化[1]，在碰撞规避、重力和可达性约束下优化六自由度位姿；绝对组则强制执行XR创作期间指定的精确六自由度位姿。我们使用基于旅行商问题的优化来确定组访问顺序，以最小化组质心之间的机器人行驶距离，并通过组内物体排序来最小化总关节空间行程。

MuJoCo[2] 仿真接触动力学与重力，并通过物理稳定阶段解决由扩展现实位姿指定所导致的相互穿透。MoveIt[3] 规划无碰撞路径。同一代码可转移至物理硬件，方法是用机器人驱动程序替换仿真，从而在部署前进行验证。

3.3 实现

我们的系统基于 Unity 6.2 为 Quest 3 实现，并通过 Quest Link 连接到一台运行 Windows 11 的计算机，其配备 Intel Core i 9-9900K 和 NVIDIA GeForce RTX 4090。包围壳采用 GPU并行的自定义 Quickhull[4] 变体计算，该变体使用空间哈希聚类将顶点缩减至 O(n)，并通过搜索相邻网格单元并行查找顶点，使速度较 CPU 实现提升 3–10 倍。机器人执行流水线运行于 Ubuntu 24.04，使用 MoveIt 和 MuJoCo 模拟 Universal Robots UR5 机械臂。

4 讨论与未来工作

在机器人执行过程中，机器人会自主确定执行顺序；MuJoCo 的物理稳定阶段会消除 XR 位姿指定导致的轻微互相穿透。当前可视化的一项局限是，包围壳可能包含组成员未占据的空区域（例如，四个物体呈正方形排列时的中心）；这些区域中的未分组物体在视觉上可能会显得属于同一组。

我们提出了一种用于编写机器人装配程序的双手XR技术：同时选择多个物体可创建采用相对或绝对模式的约束组，而嵌套这些约束组则可形成用于确定装配顺序的层级结构。未来的工作包括开展正式的用户研究，比较相对组与绝对组各自的优缺点。

致谢

本研究由美国国家科学基金会资助，项目编号为 CMMI-2037101。

参考文献

[1] S. Aoyama、J.-S. Liu、P. Wang、S. Jain、X. Wang、J. Xu、S. Song、B. Tversky 和 S. Feiner。在虚拟现实中异步分配、监控和管理装配目标，以实现高层级机器人遥操作。载于 IEEE VR 会议论文集，第 450 460, 2024 1 – 页。S. Arevalo Arboleda、[2] F. Rucker、T. Dierks 和 J. Gerken。借助增强现实视觉提示辅助机器人遥操作中的操作与抓取。载于 ACM CHI 会议论文集，第 1 14, 2021 1 – 页。M. Cai、K. Patel、S. [3] Iba 和 S. Li。用于装配任务中遥操作操作意图估计的分层深度学习。载于 IEEE ICR A 会议论文集， 2024 1, 2 。X. Cheng、J. Li、S. Yang、G. Yang 和 X. Wang[4]。Open-TeleVision：借助沉浸式主动视觉反馈进行遥操作。载于 CoRL 会议论文集，第 2729 2749, 2024 1, 2 – 页。S.-H. Lee、T. Jin、J. H. Lee 和 S.-H. Bae。Wire[5]Sketch：虚拟现实中用于三维曲线网络的双手交互。载于 ACM UIST Adjunct 会议论文集，2022年。2[6] S.-H. Lee、J. H. Lee 和 S.-H. Bae。虚拟现实中用于曲线网络曲面化的双手交互。载于 ACM CHI EA 会议论文集， 2024 2 。X. Ma、S. Patidar、I. [7] Haughton 和 S. James。用于运动学感知的多任务机器人操作的分层扩散策略。载于 IEEE/CVF CVPR 会议论文集，2024年。2[8] J. S. Pierce、B. C. Stearns 和 R. Pausch。Voodoo Dolls：虚拟环境中多尺度的无缝交互。载于 ACM I *3* 141 145, 1999 1 D 会议论文集，第 – 页。T. Teo、L. Lawrence、G. A. [9] Lee、M. Billinghurst 和 M. Adcock。结合360度视频与三维重建的混合现实远程协作。载于 ACM CHI 会议论文集，第 1 14, 2019 1 – 页。B. Yang、X. He、C. Zou、[10] J.-S. Liu、B. Tversky 和 S. Feiner。通过相对六自由度位姿指定实现虚拟现实任务引导。载于 IEEE ISMAR-Adjunct 会议论文集，第 901–902 页，2025年。1

[1] https://drake.mit.edu[2] https://mujoco.org[3] https://moveit.ros.org

[4] https://qhull.org/