

Push-Based Collaborative Active Path Construction Among Movable Obstacles via Physics-Based Planning

基于物理规划的可移动障碍物环境中的推动式协同主动路径构建

1. 引言

- 研究问题：** 在复杂 cluttered 环境中，一个体积较大的移动单元需要穿越被密集可移动障碍物阻塞的空间。传统路径规划方法通常假设障碍物固定，因此无法处理这种需要**主动清障**的场景。
- 核心挑战：**
 - 大机器人自身无法独立清理出可行走廊；
 - 较小机器人只能通过**推动 (push)** 来协助移动障碍物，且自身有体积限制，使得部分障碍物边界不可达；
 - 推动动作具有高度的物理耦合与不可解析性，尤其在**连锁推动**（同时带动多个物体运动）时更难以建模。
- 本文贡献：**
 - 提出 **W-Clearance Connectivity Graph (WCCG)**，高效刻画大体积单元在 cluttered 场景中的可通行性。
 - 设计了基于 WCCG 的**路径存在性判定算法**，不可达时输出 **reachable frontier**（可达边界），为协同清障提供直接指导。
 - 提出**突破口排序算法 (Gap Ranking)**，基于估计的Gap突破代价，在WCCG上搜索从起点S开始，分别通过 reachable frontier 上每个Gap的最佳路径，根据每个Gap对应的最小路径代价对Gap进行排序，从而为仿真在环的路径构建搜索算法提供突破口选择的启发式（减小仿真在环规划的时间成本）
 - 提出**仿真在环的路径构建搜索算法**，引入**配置空间搜索树 (C-space search tree)**，在节点拓展时通过**物理仿真验证推动模式**，实现主动且物理可行的路径构建。

2. 相关工作

- NAMO (Navigation Among Movable Obstacles)：** 回顾传统 NAMO 研究，指出大多数方法依赖抽象的可移动假设，缺乏对推动物理可行性的建模。
- 多机器人协作清障：** 总结已有研究，强调本文的不同：
 - 不仅检测路径是否存在，还能**主动构建路径**；
 - 通过小机器人协作实现 **push-based 操作**，而非抽象搬运；
 - 在规划过程中直接嵌入 **physics-based 仿真验证**，确保每一步决策在物理上可执行。

3. 问题建模与总体框架

- 环境建模：
 - 包含：大运输单元（外接圆半径 W ）、多台小型机器人、可移动障碍物。
 - 小机器人只能通过推动（非抓取、非搬起）方式移动障碍物，并受到自身尺寸限制。
 - 任务目标：在最小化推动代价的前提下，找到或**主动构建**一条 W 宽度路径。
 - 总体框架：
 1. **WCCG 构建**：表示 W 宽度通行约束下的可达连通性。
 2. **路径判定**：利用 Bug-style 算法在 WCCG 上检测 W -路径。
 3. **突破口识别与排序**：若不可达，定位前沿间隙并通过简化预搜索（基于估计的突破代价，而非实际物理仿真）评估优先级。
 4. **树搜索与仿真**：在配置空间树上扩展节点，调用 **并行物理仿真** 验证推动可行性。
 5. **执行与调整**：根据仿真反馈驱动小机器人实际推动，并在需要时在线修正。
-

4. WCCG构建与路径判定

- 图构建：
 - **节点**：障碍物凸分解质心 (centroid nodes) 与间隙两侧的桥点 (bridge nodes)。
 - **边**：质心到桥点、桥点间，当距离大于 W 时删除。
 - 路径判定：
 - 改进 Bug planner，实现**绕环、消环、环侧判定**；
 - 若 W 路径存在 → 返回解；
 - 若不可达 → 输出 **reachable frontier**，为下一步 push-based 清障提供直接候选目标。
-

5. 突破口优先级与主动路径构建

- 突破口排序 (Gap Ranking)：
 - 对第一道环上的所有突破口，计算“通过该口构建路径的总代价”；
 - 返回优先级序列，供机器人任务分配与并行执行。
 - 仿真在环的路径构建搜索：
 - **节点**：机器人和障碍物的完整配置；
 - **扩展**：选择一个突破口，选择**推动方向**，生成 **推动模式** 并进行并行物理仿真，形成子节点。
 - 推动动作直接通过 **simulation-in-the-loop** 检验；
 - 支持 **连锁推动效应**，提升清障效率；
 - 确保每个扩展都是 **physics-feasible**，避免抽象模型带来的不可执行性。
-

6. 实验与结果

- **实验1：基础验证**
 - 2D workspace, 1个大机器人, 2~3个小机器人, 数个可移动障碍物。
 - **实验2：异构拓展**
 - 不同质量障碍物、异构小车, 验证在 **质量估计误差** 下的鲁棒性。
 - **实验3：大规模实验**
 - 大量密集障碍物（间距远小于 W ）或更多小机器人, 考察算法对问题规模的可拓展性和时间效率。
 - **实物实验**
 - 验证方法的实际物理可行性。
 - **结果分析**
 - 成功率、计算时间、搬运代价；
 - 对比 baseline
-

7. 总结与展望

- **总结：**
 - 提出首个结合 **Push-based 协作操作** 与 **Physics-based 仿真验证** 的主动路径构建框架；
 - 不仅能检测路径是否存在, 更能**主动构建可通行走廊**；
 - 有效解决了 NAMO 中物理可行性难以保证的问题。
- **展望：**
 - 提升规划-仿真闭环的实时性；
 - 扩展到三维环境或动态人群场景；