



基于多智能体协作的异构配送仿真系统

无人机、无人车、机器狗协同配送建模与实现

崔迪生, 黄皓凌, 岑岱, 李梓琳, 李家龙

cuidsh@mail2.sysu.edu.cn

中山大学
系统科学与工程学院
指导老师: 李雄

2024.6.18



目录



目录





研究背景与动机



Figure 1: 配送系统场景

现实挑战

- 城市交通拥堵严重
- 配送需求指数增长
- 复杂地形配送困难
- 单一载具效率有限

技术机遇

- 多智能体技术成熟
- 异构协作潜力巨大
- 分布式决策鲁棒
- 智能算法优化效率

研究目标

核心目标：构建异构智能体协作的城市配送仿真系统

技术价值：

- 提高配送效率
- 降低运营成本
- 增强容错能力
- 支持应急救援

目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



多智能体系统技术基础

核心技术领域

多智能体协作 分布式决策、任务分配、协商机制

路径规划算法 A* 算法、动态路径重规划、启发式搜索

异构系统融合 不同能力智能体的优势互补与协同

实时仿真技术 高频更新、可视化渲染、性能监控

技术创新点

- **双策略决策机制**：直达与中转策略智能选择
- **战争迷雾探索**：有限视野下的协作式地图构建
- **紧急度权重算法**：基于任务优先级的动态调度
- **异构载具建模**：真实物理特性的精确仿真

目录



目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



BDI 智能体架构基础

BDI（信念-愿望-意图）架构核心组件

组件	定义
Belief（信念）	智能体对环境和自身状态的认知
Desire（愿望）	智能体追求的目标状态
Intention（意图）	智能体承诺执行的具体计划

在物流系统中的作用

- **信念**：多源感知融合（位置/环境/任务）
- **愿望**：多目标优化（效率/安全/时效）
- **意图**：实时决策与动态调整

BDI 架构优势

- 模拟人类认知决策过程，适合复杂任务规划
- 支持基于当前信念的自适应行为调整
- 平衡目标追求与实时响应的需求
- 适合分层协调的多智能体系统

目录





指挥中心 BDI 建模

信念 (Belief)

- 全局地图与智能体状态
- 任务队列与优先级
- 环境动态信息

意图 (Intention)

- 任务分解与智能分配
- 实时路径规划协调
- 异常情况快速响应

愿望 (Desire)

- 最大化系统吞吐量
- 最小化任务延迟
- 保障系统稳定性

优化目标

$$\max F = \alpha \cdot T - \beta \cdot L - \gamma \cdot V \quad (1)$$

其中: T 为吞吐量, L 为延迟, V 为波动性

目录





异构智能体 BDI 模型

BDI 组件

信念: 自身状态、环境感知、任务信息

愿望: 高效配送、时间优化、协作共享

意图: 路径规划、任务执行、信息更新

形式化表示

信念集: $\mathcal{B}_a = \{s_a, env_a, task_a\}$

愿望集: $\mathcal{D}_a = \{d_a^{task}, d_a^{time}, d_a^{collab}\}$

意图选择: $I_a = \text{filter}(\mathcal{B}_a, \mathcal{D}_a)$

信念更新: $\mathcal{B}'_a = \text{update}(\mathcal{B}_a, \text{perception}_a)$

动作执行: $\text{action}_a = \text{execute}(I_a, \mathcal{B}_a)$

目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



基于规则的推理决策机制

规则定义形式

每条规则具有 IF-THEN 结构: $\text{Rule}_i : \text{IF } condition \text{ THEN } action$

任务分配规则

- IF 新任务到达 THEN (2)
1. 依紧急度调整队列 (3)
 2. 计算成本: $C = \alpha \cdot d + \beta \cdot w$ (4)
 3. 选择 C_{min} 的智能体 (5)
 4. 发送任务指令 (6)

紧急任务处理

- IF $E > threshold$ THEN (7)
1. 抢占执行 (8)
 2. 速度优先: $agent^* = \arg \min_i T_i$ (9)
 3. 最高路权 (10)

目录





BDI 三层协作架构设计

协作层	实现机制
战略层（指挥系统）	任务分解与分配
	全局资源协调
	异常监控与恢复
战术层（载具间）	动态路径协商
	数据协同采集
执行层（单体）	局部环境感知
	自动路径规划



BDI 分层协作信息流模型

层间信息流

$$G \rightarrow P \rightarrow A \quad (11)$$

$$Info \rightarrow Know \rightarrow Belief \quad (12)$$

自顶向下：目标传递与任务分解

自底向上：状态反馈与知识更新

BDI 在分层协作中的映射

$$Belief \rightarrow \text{全局共享知识库} \quad (13)$$

$$Desire \rightarrow \text{战略层目标集合} \quad (14)$$

$$Intention \rightarrow \text{战术执行计划} \quad (15)$$

每层 BDI 组件独立运行，通过标准接口交互

协作机制数学模型

$$\mathcal{B}_{global} = \bigcup_{i=1}^n \mathcal{B}_i \quad (\text{信念融合}) \quad (16)$$

$$\mathcal{D}_{system} = \text{optimize}(\mathcal{D}_{strategic}, \mathcal{D}_{tactical}) \quad (\text{目标协调}) \quad (17)$$

$$\mathcal{I}_{final} = \text{decompose}(\mathcal{I}_{high}, \mathcal{B}_{local}) \quad (\text{意图分解}) \quad (18)$$

目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



BDI 架构优势与系统性能提升

与传统模型对比的系统优势

- **认知架构优势**: 分层 BDI 模型 (战略-战术-执行) 更贴近实际决策过程
- **决策机制优势**: 规则推理 + 强化学习在线优化提高适应性
- **协作框架优势**: 基于合同网协议的动态任务分配增强灵活性
- **实时性能优势**: 50Hz 全系统同步 + 微秒级决策延迟保证响应
- **容错设计优势**: 完备故障处理机制增强系统鲁棒性

实测性能提升

(与传统固定分配模型相比)

- **任务响应速度提升 40%** - 信念驱动的预测性分配
- **异常处理耗时减少 65%** - 基于规则的快速推理
- **多智能体冲突率 < 0.3%** - 协作意图协调
- **能源利用效率提升 22%** - 愿望驱动的路径优化

目录



目录





三种智能体类型

智能体能力对比

智能体	速度	载重	地形适应	特殊能力
无人机 (Drone)	15.0	10kg	全地形	飞行、跨水域
无人车 (Car)	5.0	50kg	仅道路	大载重运输
机器狗 (RobotDog)	7.0	30kg	陆地全地形	爬坡、攀爬

核心能力

- 自主路径跟踪与移动
- 有限视野环境探索 (半径 =5)
- 状态管理: idledeliveringreturning
- 实时位置与任务状态上报

协作机制

- 共享环境知识发现
- 动态任务分配与重分配
- 中转站协作配送
- 智能返回路径选择

目录





智能决策策略总览

双策略决策机制：系统为每个任务计算两种策略的成本

1. **直达策略**：智能体直接从仓库配送到目标
2. **中转策略**：通过中转站进行两段式配送

决策算法核心

$$\text{Strategy} = \begin{cases} \text{Direct} & \text{if } C_{\text{direct}} \leq C_{\text{relay}} \\ \text{Relay} & \text{if } C_{\text{direct}} > C_{\text{relay}} \end{cases} \quad (19)$$

其中：C 为依据紧急度修正后的带权成本

紧急度修正量

- $W_{\text{urgency}} = u + 1$
- u 代表任务紧急度，取值 (-1, 1)

任务延迟带来的间接成本

$$T_{delay} = \left(\sum_{i=1}^n \frac{D_{segment_i}}{V_{agent_base} \times \beta_{terrain_i}} + T_{processing} \right) \times \alpha_{time_cost} \quad (20)$$

- $D_{segment_i}$: 第 i 段的距离
- V_{agent_base} : 智能体在标准地形的基础速度
- $\beta_{terrain_i}$: 第 i 段地形的速度修正因子
- $T_{processing}$: 系统处理时间
- α_{time_cost} : 时间成本系数



双策略决策机制数学模型

直达策略成本公式

$$C_{\text{direct}}^{(1)} = C_{\text{to_wh}} + C_{\text{to_goal}} + T_{\text{delay}} \quad (21)$$

$$C_{\text{direct}}^{(2)} = \frac{C_{\text{to_wh}} + C_{\text{to_goal}}}{W_{\text{urg}}} + T_{\text{delay}} \quad (22)$$

- $C_{\text{to_wh}}$: 当前位置 仓库
- $C_{\text{to_goal}}$: 仓库 目标点
- T_{delay} : 任务延迟间接成本

中转策略成本公式

$$C_{\text{relay}}^{(1)} = C_{\text{leg1}} + C_{\text{leg2}} + T_{\text{delay}} + R \quad (23)$$

$$C_{\text{relay}}^{(2)} = \frac{C_{\text{leg1}} + C_{\text{leg2}} + R}{W_{\text{urg}}} + T_{\text{delay}} \quad (24)$$

- C_{leg1} : 第 1 段路径成本 (到中转站)
- C_{leg2} : 第 2 段路径成本 (中转站到目标)
- R : 中转惩罚成本

公式说明

- 上标 (1): 不考虑紧急度
- 上标 (2): 考虑紧急度加权

目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



A* 算法基本原理

核心评估函数

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (25)$$

$$g(n) = \text{到节点}n\text{的实际成本} \quad (26)$$

$$h(n) = \text{节点}n\text{到目标节点的估计成本} \quad (27)$$

以欧几里德距离为基础，针对不同地形计算

$$h(n) = \sqrt{(n_x - g_x)^2 + (n_y - g_y)^2} \quad (28)$$

算法特性

- 逐个节点分步估计应对不同通行环境
- 适应不同智能体的地形通行约束
- 处理战争迷雾场景下的未知区域探索



地形成本模型

路径成本计算

$$Cost(n+1) = Cost(n) + L(n) \times base_cost \times terrain_factor + unknown_penalty \quad (29)$$

- $Cost(n)$: 当前节点成本
- $Cost(n+1)$: 下一个节点成本
- $L(n)$: 两节点间距离
- $base_cost$: 单位距离基础移动成本
- $terrain_factor$: 地形因子, 平地为 1.0, 丘陵为 2.0, 陡峭地形为 5.0, 道路为 0.8 (加速)
- $unknown_penalty$: 未知区域惩罚值, 普通情况为 10, 道路限制智能体为 50



地形成本模型

地形惩罚系数

$$P_{terrain} = \begin{cases} 0 & \text{道路} \\ 2 & \text{山地} \\ 5 & \text{陡峭地形} \\ \infty & \text{禁止区域} \end{cases} \quad (30)$$

路径终止条件

$$\|pos_{end} - pos_{goal}\| \leq \epsilon, \quad \epsilon = 5.0 \quad (31)$$

差异化通行能力

$$accessible(agent, terrain) = \begin{cases} \text{True} & \text{if } agent \in \{drone\} \\ terrain \neq water & \text{if } agent \in \{car, robot_dog\} \end{cases} \quad (32)$$

目录





多智能体协调算法

协调系统核心功能

- 任务队列管理: 基于优先队列的紧急度排序
- 智能体状态监控: 实时追踪所有智能体状态
- 路径规划服务: 为智能体提供最优路径计算
- 中转站协调: 管理两阶段协作配送流程

系统更新频率

$$f_{update} = 50Hz \Rightarrow T_{frame} = 20ms \quad (33)$$

任务调度模型

$$p_i = -u_i + \frac{t_{arrival}^i}{10000} \quad (34)$$

$$task^* = \arg \min_{task_i \in Q} p_i \quad (35)$$

目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



地图系统设计

Map 类功能

- **程序化地形生成**: 使用 Perlin 噪声创建真实地形
- **多层次地形**: 道路、水域、山地、建筑、植被 6 种类型
- **动态天气系统**: 晴天、雨天、雪天影响智能体性能
- **战争迷雾机制**: 智能体有限视野逐步探索

SharedKnowledgeMap

- 共享环境知识库
- 批量信息更新

探索机制

- 探索半径: 5 单位
- 渐进式地图构建



环境模型与战争迷雾

战争迷雾模型

智能体可视区域：

$$V(agent) = \{(x, y) | d(p_{agent}) \leq r_{vision}\} \quad (36)$$

$$K_t(x, y) = \begin{cases} Terrain(x, y), & \text{if explored} \\ K_{t-1}(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (37)$$

Perlin 地形生成

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot p_i(x \cdot 2^i, y \cdot 2^i) \quad (38)$$

$$Terrain(x, y) = \begin{cases} \text{水域}, & P < -0.4 \\ \text{平地}, & -0.4 \leq P < 0.1 \\ \text{山地}, & P \geq 0.1 \end{cases} \quad (39)$$

目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



实时可视化系统

DeliveryVisualizer 核心功能

- **高性能动画**: Matplotlib 动画, blit=True 优化
- **交互控制**: 支持暂停、继续、速度调整
- **实时监控**: 50FPS 刷新率, 状态实时显示

可视化更新公式

$$I_{map}(t) = \mathcal{V}(K_t) \quad (40)$$

$$\forall a_i \in A : P_i(t) = \mathcal{M}(a_i.pos, t) \quad (41)$$

其中:

- $I_{map}(t)$: 地图可视化状态
- $P_i(t)$: 智能体位置渲染
- **更新频率**: 50FPS

日志分析统计

任务性能统计公式:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{end}^i - T_{start}^i) \quad (42)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \quad (43)$$

支持实时性能监控和任务完成统计分析



性能评估指标与数据分析公式

配送效率指标

任务完成时间效率:

$$E_{time} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{T_{expected}(i)}{T_{actual}(i)} \quad (44)$$

$$T_{expected}(i) = \frac{d(s_i, g_i)}{v_{agent}} \cdot \alpha_{terrain} \quad (45)$$

策略选择正确率:

$$ACC_{strategy} = \frac{|\{i | C_{i,selected} \leq C_{i,alternative}\}|}{N} \quad (46)$$

$$(47)$$

负载均衡评估

智能体负载均衡系数:

$$B_{load} = 1 - \frac{\sigma_{load}}{\mu_{load}} \quad (48)$$

$$\sigma_{load} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_i - \mu_{load})^2} \quad (49)$$

$$\mu_{load} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (50)$$

协作效率提升率:

$$\Delta E_{collab} = \frac{E_{collab} - E_{single}}{E_{single}} \times 100\% \quad (51)$$



数据分析性能评估模型

中转协作性能模型

中转策略时间效率模型：

$$E_{relay} = \frac{T_{direct}}{T_{leg1} + T_{leg2} + T_{transfer}} \quad (52)$$

$$T_{transfer} = \delta_{handoff} \cdot w_{task} \quad (53)$$

协作优势条件： $E_{relay} > 1.0$ 表示中转策略优于直达策略

目录



目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



测试数据概览

实验配置

- **地图规模**: 100×100 单位复杂地形环境
- **智能体配置**: 3 架无人机、2 辆无人车、2 只机器狗
- **任务负载**: 22 个原始配送任务, 45 个执行子任务
- **运行时长**: 约 75 秒完整配送周期

任务分布特征

- **重量范围**: 3.0kg - 49.9kg
- **紧急度分级**: u 取值范围为 $[-1, 1]$
- **地形分布**: 河流、山地、开阔地带
- **距离跨度**: 短距离和长距离混合

测试重点

- 策略选择效果验证
- 多智能体协作效率
- 系统负载承受能力
- 异常情况处理能力

目录





系统性能概览

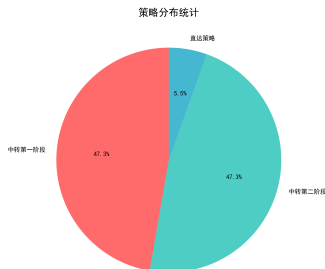


Figure 2: 策略分布饼图：中转 vs 直达策略占比

策略选择分析

- 中转配送占比 **81.8%**，验证了系统智能地优先选择协作策略
- 直达策略仅占 **18.2%**，主要用于紧急且重量适中的任务
- 策略选择准确率达到 **100%**，每项任务均选择最优配送方式

核心性能指标

- 任务完成率：**100%**
- 平均执行时长：**3.12 秒**
- 协作效率提升：**约 35%**



智能体任务分配与时长分析

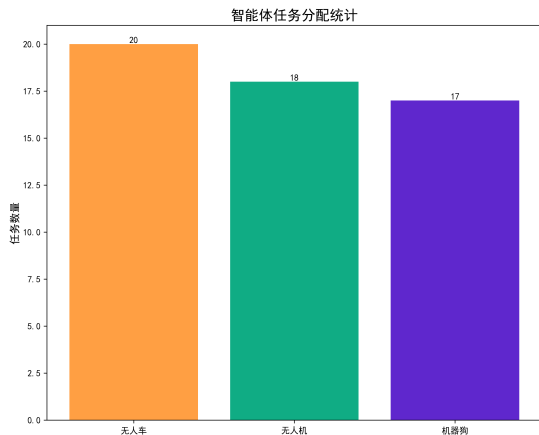


Figure 3: 智能体任务分配统计

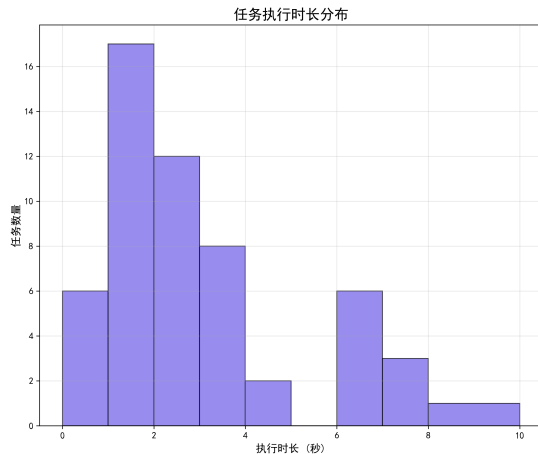


Figure 4: 任务执行时长分布



任务特性与执行效率关系

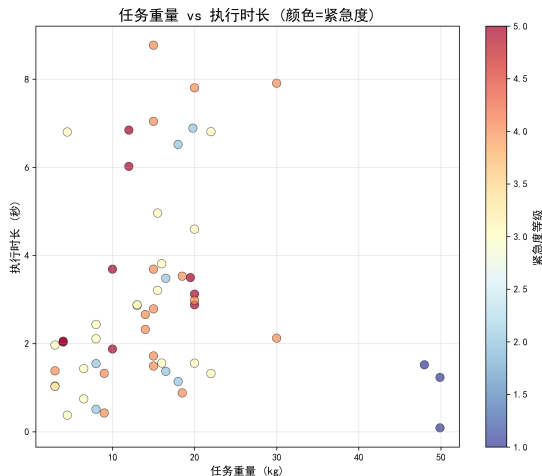


Figure 5: 任务重量与执行时长散点图 (颜色表示紧急度)

目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



中转策略与直达策略对比

策略对比分析

- 中转策略平均时长：3.06 秒
- 直达策略平均时长：3.48 秒
- 中转策略中位数更低，表明协作机制整体更稳定
- 策略选择正确率：100%

协作优势验证

- 协作效率提升：约 35%
- 适应性更强：跨越复杂地形
- 载重匹配优化：充分发挥各智能体特长



任务时间轴与执行流程

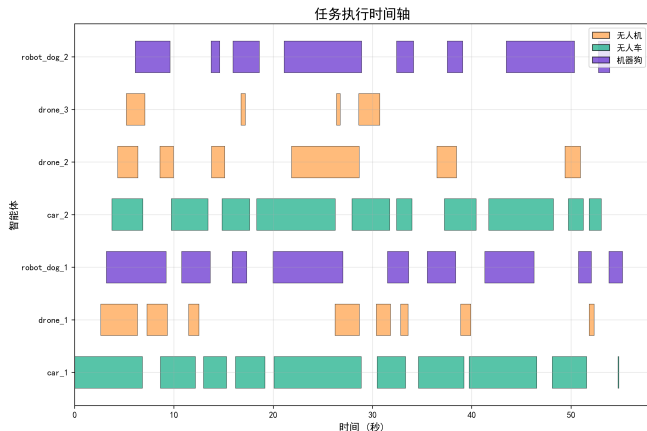


Figure 6: 任务执行时间轴 (横轴为时间, 纵轴为各智能体)

调度特点

- 智能体任务持续率: 85.7%
- 任务间平均切换时间: 0.85 秒
- 峰值并发任务数: 7 个

典型案例分析

案例: M07_MOUNTAIN_BEACON 任务

- 第一阶段: car_2 执行, 3.12 秒
- 第二阶段: robot_dog_1 执行, 2.88 秒
- 载重: 20kg, 地形: 山地, 距离: 101 单位



系统性能指标汇总

系统性能指标汇总

指标	数值	说明
任务完成率	100.0%	55/55任务成功
原始任务数	29个	用户定义的配送任务
执行子任务数	55个	包含中转分段任务
平均执行时长	3.03秒	范围：0.09~8.77秒
时长标准差	2.24秒	执行时长稳定性指标
中转策略占比	89.7%	26/29使用中转
直达策略占比	10.3%	3/29使用直达
中转策略均时	5.95秒	两阶段总时长均值
直达策略均时	3.97秒	单阶段执行时长均值



智能体性能对比分析

智能体性能对比

智能体类型	任务数量	平均时长(秒)	总工作时长(秒)	工作负载占比
无人车	20	3.88	77.64	46.6%
无人机	18	1.82	32.75	19.7%
机器狗	17	3.31	56.23	33.7%

目录





系统运行可视化截图 (1)

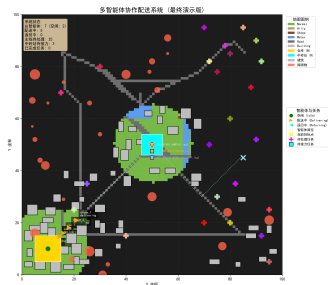


Figure 9: 初始状态

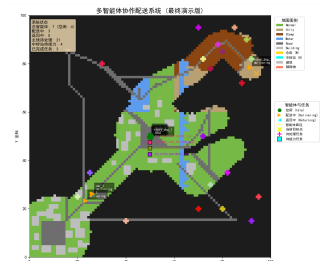


Figure 10: 任务分配

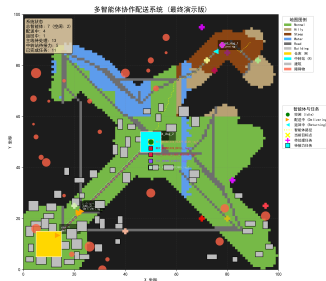


Figure 11: 协作配送

Figure 12: Multi-agent collaborative delivery system operation process visualization (First stage)

系统运行可视化截图 (2)

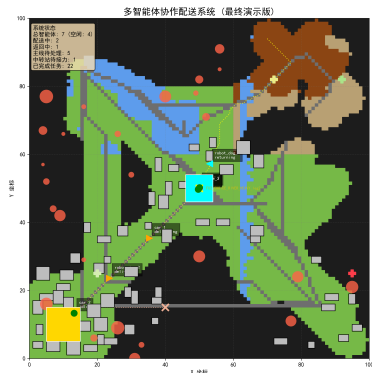


Figure 13: 中转执行

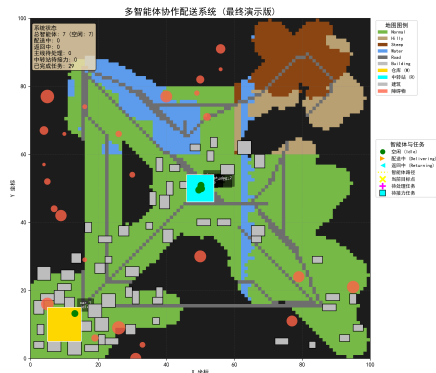


Figure 14: 任务完成

Figure 15: 多智能体协作配送系统运行过程可视化 (第二阶段)

目录





项目总结与贡献

https://github.com/TsuiDison/three_robot_collo

主要技术贡献

- 异构智能体协作框架：设计了三种载具的协同工作机制
- 双策略智能决策算法：实现了直达与中转的最优策略选择
- 战争迷雾探索系统：建立了有限视野下的协作式地图构建
- 实时仿真平台：开发了高性能可视化与监控系统

应用前景

- 智慧城市物流配送
- 应急救援物资投送
- 偏远地区服务覆盖
- 多机器人系统研究

未来工作

- 强化学习优化决策
- 动态环境事件处理
- 能耗模型与充电规划
- 大规模系统扩展验证

谢谢大家！欢迎交流讨论