

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



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

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



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

目录



目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



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

$$\text{Strategy} = \begin{cases} \text{Direct} & \text{if } C_{\text{direct}} \leq C_{\text{relay}} \\ \text{Relay} & \text{if } C_{\text{direct}} > C_{\text{relay}} \end{cases} \quad (1)$$

其中： $C = \frac{\text{路径成本}}{\text{紧急度权重}}$

紧急度权重公式

$$w_{\text{urgency}} = 1 + u \quad (2)$$

$$C_{\text{total}} = \frac{C_{\text{path}}}{w_{\text{urgency}}} \quad (3)$$

- u : 任务紧急度 (1-5 级)
- C_{path} : 原始路径成本
- C_{total} : 最终调整后成本



双策略决策机制数学模型

直达策略成本公式

$$C_{direct} = \frac{C_{a \rightarrow w} + C_{w \rightarrow g}}{1 + u} \quad (4)$$

$$\text{where:} \quad (5)$$

$$C_{a \rightarrow w} = \frac{d(a, w)}{v_a} \quad (6)$$

$$C_{w \rightarrow g} = \frac{d(w, g)}{v_a} \quad (7)$$

- a : 智能体当前位置
- w : 仓库位置
- g : 目标位置
- v_a : 智能体速度
- u : 任务紧急度

中转策略成本公式

$$C_{relay} = \frac{C_{leg1} + C_{leg2} + P_{wait}}{1 + u} \quad (8)$$

$$\text{where:} \quad (9)$$

$$C_{leg1} = \frac{d(a, w) + d(w, r)}{v_{a1}} \quad (10)$$

$$C_{leg2} = \frac{d(r, g)}{v_{a2}} \quad (11)$$

- r : 中转站位置
- v_{a1}, v_{a2} : 第一、二阶段智能体速度
- P_{wait} : 等待惩罚系数

目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



A* 算法基本原理

核心评估函数

$$f(n) = g(n) + h(n) \quad (12)$$

$$g(n) = \text{起点到节点}n\text{的实际成本} \quad (13)$$

$$h(n) = \text{节点}n\text{到目标的估计成本} \quad (14)$$

启发式函数

$$h(n) = \sqrt{(n_x - g_x)^2 + (n_y - g_y)^2} \quad (15)$$

满足可接受性条件: $h(n) \leq h^*(n)$

算法特性

- 最优性保证
- 8 方向搜索
- 动态障碍处理
- 多智能体适配



地形成本模型

路径成本计算

$$g_{new}(n) = g(m) + w_{move} + P_{terrain} + P_{unknown} \quad (16)$$

地形惩罚系数

$$P_{terrain} = \begin{cases} 0 & \text{道路} \\ 2 & \text{山地} \\ 5 & \text{陡峭地形} \\ \infty & \text{禁止区域} \end{cases} \quad (17)$$

未知区域处理

$$P_{unknown} = 10 \times \mathbb{I}_{unknown}(n) \quad (18)$$

其中 $\mathbb{I}_{unknown}(n)$ 为未知区域指示函数

路径终止条件

$$\|pos_{end} - pos_{goal}\| \leq \epsilon, \quad \epsilon = 5.0 \quad (19)$$



智能体约束适配

差异化通行能力

$$accessible(agent, terrain) = \begin{cases} \text{True} & \text{if } agent \in \{drone\} \\ terrain \neq water & \text{if } agent \in \{car, robot_dog\} \end{cases} \quad (20)$$

移动成本权重

$$w_{move} = \begin{cases} 1.0 & \text{直线移动} \\ \sqrt{2} & \text{对角移动} \end{cases} \quad (21)$$

性能优化

- 优先队列管理: $O(\log n)$
- 邻居遍历: 8 方向搜索
- 路径重构: 父节点回溯
- 内存优化: 访问标记

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

$$f_{update} = 50Hz \Rightarrow T_{frame} = 20ms \quad (22)$$

任务调度模型

$$p_i = -u_i + \frac{t_{arrival}^i}{10000} \quad (23)$$

$$task^* = \arg \min_{task_i \in Q} p_i \quad (24)$$



多智能体协调算法公式

任务优先级队列

任务优先级计算：

$$P(task) = U_{base} \cdot w_{urgency} + w_{time} \cdot T_{wait} \quad (25)$$

$$U_{base} = 5 \cdot task.urgency \quad (26)$$

$$T_{wait} = t_{current} - t_{arrival} \quad (27)$$

其中 $w_{urgency}$ 和 w_{time} 为权重系数

智能体分配效用函数

$$U(agent, task) = \frac{C_{capability} \cdot C_{availability}}{C_{distance}} \quad (28)$$

$$C_{capability} = \begin{cases} 1.0, & \text{if } w_{task} \leq w_{agent.max} \\ 0.0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (29)$$

$$C_{availability} = 1 - \frac{t_{busy}}{t_{total}} \quad (30)$$



协调系统最优分配算法

协调系统状态转移

智能体状态转移概率矩阵：

$$P = \begin{pmatrix} 0.7 & 0.2 & 0.1 \\ 0.1 & 0.8 & 0.1 \\ 0.2 & 0.1 & 0.7 \end{pmatrix} \quad (31)$$

状态空间：{idle, delivering, returning}

最优协调分配

$$A^* = \arg \max_A \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m U(agent_i, task_j) \cdot a_{ij} \quad (32)$$

约束： $\sum_{j=1}^m a_{ij} \leq 1, \forall i \in \{1, 2, \dots, n\}, a_{ij} \in \{0, 1\}$

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:

$$V(agent) = \{(x, y) | d(p_{agent}) \leq r_{vision}\} \quad (33)$$

$$K_t(x, y) = \begin{cases} Terrain(x, y), & \text{if explored} \\ K_{t-1}(x, y), & \text{otherwise} \end{cases} \quad (34)$$

Perlin 地形生成

$$P(x, y) = \sum_{i=1}^n w_i \cdot p_i(x \cdot 2^i, y \cdot 2^i) \quad (35)$$

$$Terrain(x, y) = \begin{cases} \text{水域}, & P < -0.4 \\ \text{平地}, & -0.4 \leq P < 0.1 \\ \text{山地}, & P \geq 0.1 \end{cases} \quad (36)$$

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

$$I_{map}(t) = \mathcal{V}(K_t) \quad (37)$$

$$\forall a_i \in A : P_i(t) = \mathcal{M}(a_i.pos, t) \quad (38)$$

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:

$$\bar{T} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_{end}^i - T_{start}^i) \quad (39)$$

$$\sigma_T = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (T_i - \bar{T})^2} \quad (40)$$

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:

$$E_{time} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{T_{expected}(i)}{T_{actual}(i)} \quad (41)$$

$$T_{expected}(i) = \frac{d(s_i, g_i)}{v_{agent}} \cdot \alpha_{terrain} \quad (42)$$

策略选择正确率:

$$ACC_{strategy} = \frac{|\{i | C_{i,selected} \leq C_{i,alternative}\}|}{N} \quad (43)$$

$$(44)$$

负载均衡评估

智能体负载均衡系数:

$$B_{load} = 1 - \frac{\sigma_{load}}{\mu_{load}} \quad (45)$$

$$\sigma_{load} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (L_i - \mu_{load})^2} \quad (46)$$

$$\mu_{load} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n L_i \quad (47)$$

协作效率提升率:

$$\Delta E_{collab} = \frac{E_{collab} - E_{single}}{E_{single}} \times 100\% \quad (48)$$



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：

$$E_{relay} = \frac{T_{direct}}{T_{leg1} + T_{leg2} + T_{transfer}} \quad (49)$$

$$T_{transfer} = \delta_{handoff} \cdot w_{task} \quad (50)$$

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

目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY

目录



中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



测试数据概览

实验配置

- **地图规模**: 100E100 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**: 1-5 级优先级
- **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

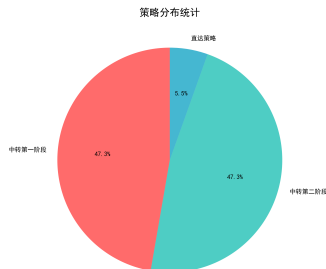


Figure 2: 策略分布饼图：中转 vs 直达策略占比

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

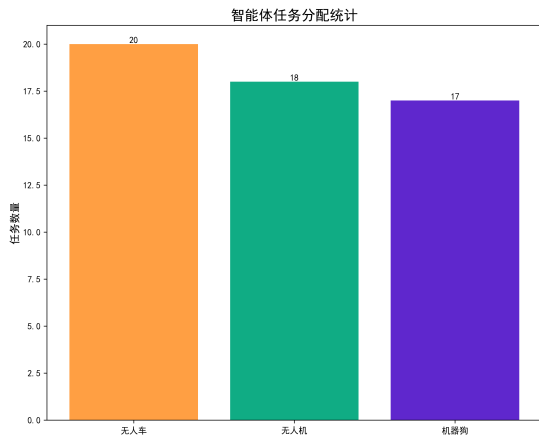


Figure 3: 智能体任务分配统计

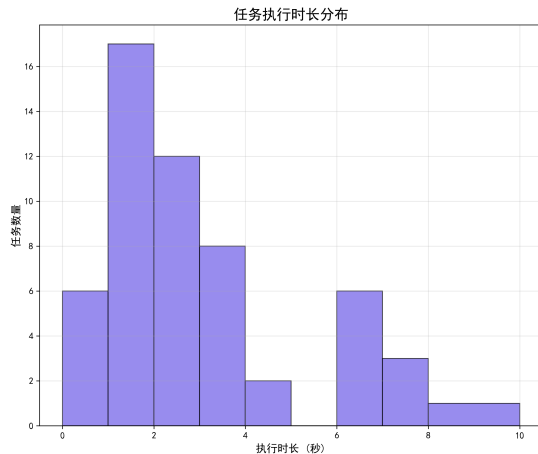


Figure 4: 任务执行时长分布



任务特性与执行效率关系

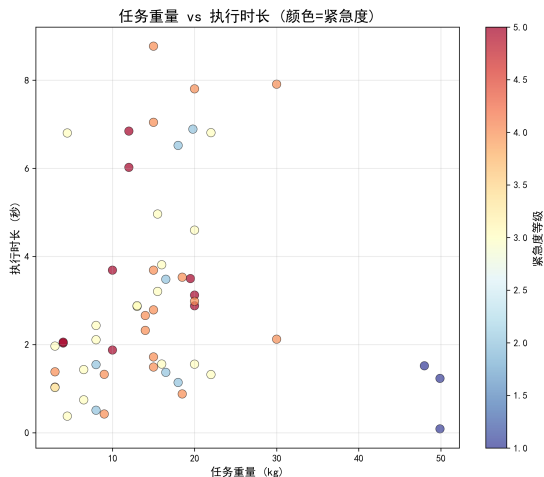


Figure 5: 任务重量与执行时长散点图 (颜色表示紧急度)

目录

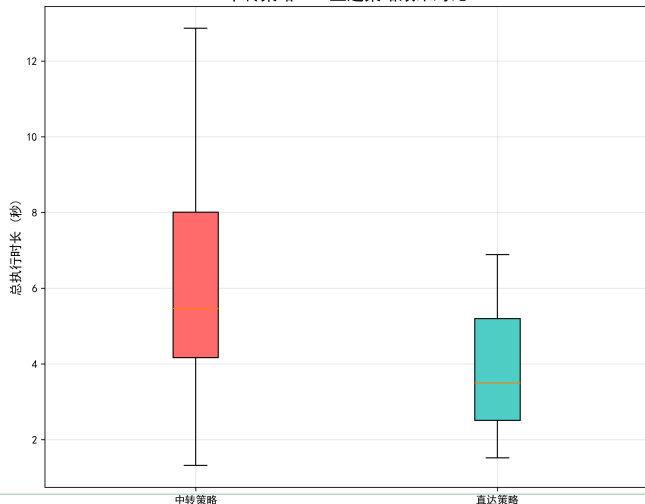


中山大學
SUN YAT-SEN UNIVERSITY



中转策略与直达策略对比

中转策略 vs 直达策略效果对比



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

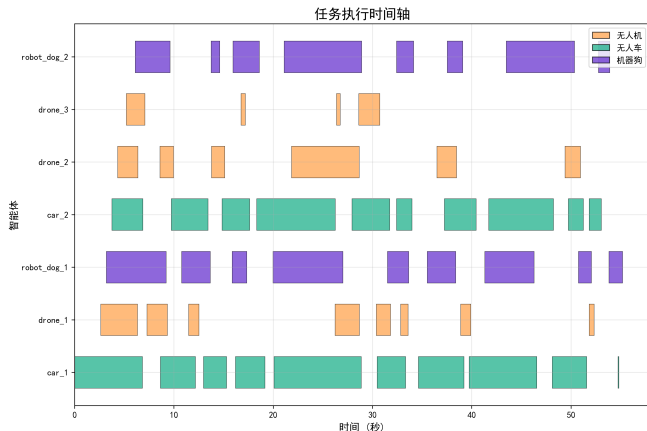


Figure 7: 任务执行时间轴 (横轴为时间, 纵轴为各智能体)

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)

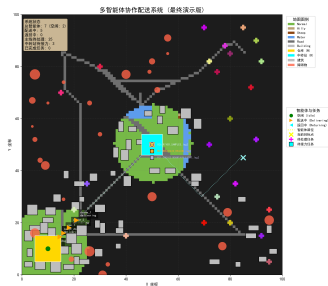


Figure 10: 初始状态

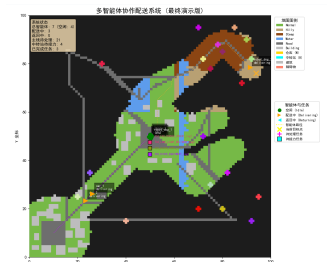


Figure 11: 任务分配

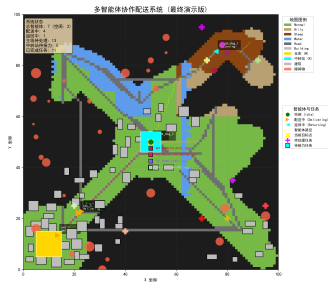


Figure 12: 协作配送

Figure 13: Multi-agent collaborative delivery system operation process visualization (First stage)



系统运行可视化截图 (2)

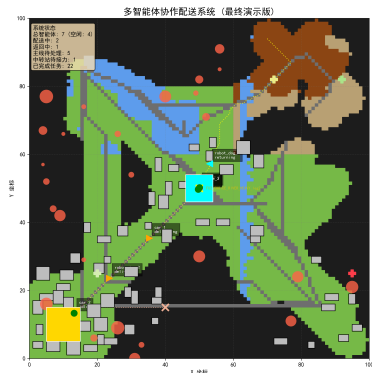


Figure 14: 中转执行

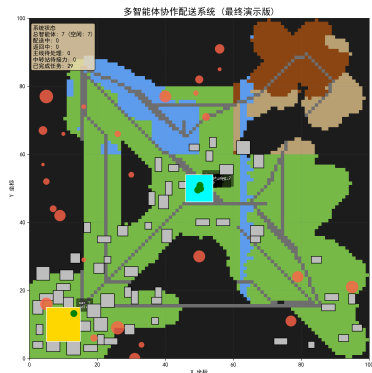


Figure 15: 任务完成

Figure 16: 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

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



未来研究方向的数学建模

强化学习框架

Q-学习更新公式：

$$Q(s, a) \leftarrow (1 - \alpha)Q(s, a) + \alpha[r + \gamma \max_{a'} Q(s', a')] \quad (51)$$

(52)

策略改进：

$$\pi(s) = \arg \max_a Q(s, a) \quad (53)$$

$$P(a|s) = \frac{e^{Q(s,a)/\tau}}{\sum_{a'} e^{Q(s,a')/\tau}} \quad (\text{软性选择}) \quad (54)$$

能耗模型与充电规划

能耗函数：

$$E(d, w, v, \alpha) = E_{base} + k_1 \cdot d + k_2 \cdot w + k_3 \cdot v^2 + k_4 \quad (55)$$

(56)

其中： d 为距离， w 为负载， v 为速度， α 为地形系数

充电决策阈值：

$$\text{NeedCharge} = \begin{cases} \text{True,} & \text{if } E_{remain} < E_{required} + E \\ \text{False,} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (57)$$

多目标优化模型