

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

2024.12.25



1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调
- 2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



目录

1. 系统概述

1.1. 研究背景与动机

1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

2.1. 异构智能体设计

2.2. 双策略决策机制

2.3. 路径规划算法

2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

3.1. 测试场景设计

3.2. 关键性能指标

3.3. 协作效果分析

3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



目录

1. 系统概述

1.1. 研究背景与动机

1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

2.1. 异构智能体设计

2.2. 双策略决策机制

2.3. 路径规划算法

2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

3.1. 测试场景设计

3.2. 关键性能指标

3.3. 协作效果分析

3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



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

1. 系统概述

1.1. 研究背景与动机

1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

2.1. 异构智能体设计

2.2. 双策略决策机制

2.3. 路径规划算法

2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

3.1. 测试场景设计

3.2. 关键性能指标

3.3. 协作效果分析

3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



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

1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



目录

1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



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

1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



智能决策策略

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

紧急度权重机制

- $\text{urgency_weight} = 1 + \text{task.urgency}$
- $\text{total_cost} = \text{path_cost} / \text{urgency_weight}$
- 高紧急度任务获得优先执行权
- 动态权重调整优化资源分配



目录

1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



A* 路径规划算法

路径规划特性

- 基于共享知识地图的启发式搜索
- 支持不同智能体的地形适应性约束
- 处理未知区域的探索惩罚机制
- 8 方向搜索优化路径长度

地形通行规则

- **无人机**: 所有地形通行, 未知区域 +10 惩罚
- **无人车**: 仅道路通行, 自动寻找最近道路
- **机器狗**: 陆地通行, 山地 +2 惩罚, 陡峭 +5 惩罚
- **水域约束**: 只有无人机可以跨越

算法优化

- 启发式函数结合地形成本
- 动态权重调整
- 路径平滑处理
- 最终距离阈值检查



目录

1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



协调系统架构

MultiAgentCoordinationSystem 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

协调循环 (50FPS)

- 智能体状态更新
- 中转任务分配
- 主队列任务处理
- 系统性能监控

日志记录

- 任务分配记录
- 路径执行轨迹
- 完成时间统计
- JSON 格式输出



目录

1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



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
- 实时更新机制
- 未知区域标记
- 批量信息更新

探索机制

- 探索半径: 5 单位
- 即时信息共享
- 未知区域惩罚
- 渐进式地图构建



目录

1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



实时可视化系统

DeliveryVisualizer 功能

- **高性能动画**: Matplotlib 动画, blit=True 优化
- **多层渲染**: 地形、智能体、路径、任务分层显示
- **状态监控**: 实时显示任务进度和智能体状态
- **交互控制**: 支持暂停、继续、速度调整

视觉元素

- 智能体颜色标识
- 任务路径实时高亮
- 地形类型色彩编码
- 动态信息面板

日志系统

- LogEntry 结构化记录
- 任务生命周期追踪
- JSON 格式导出
- 性能分析支持



目录

1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



目录

- 1. 系统概述
 - 1.1. 研究背景与动机
 - 1.2. 相关技术综述
- 2. 建模思路
 - 2.1. 异构智能体设计
 - 2.2. 双策略决策机制
 - 2.3. 路径规划算法
 - 2.4. 多智能体协调
 - 2.5. 环境建模
 - 2.6. 可视化与日志
- 3. 模型测试
 - 3.1. 测试场景设计
 - 3.2. 关键性能指标
 - 3.3. 协作效果分析
 - 3.4. 系统可视化展示
- 4. 总结与展望
- 5. 附录



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

1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



系统性能概览

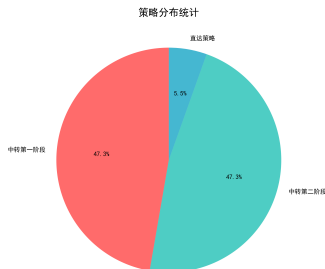


Figure 2: 策略分布饼图：中转 vs 直达策略占比

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

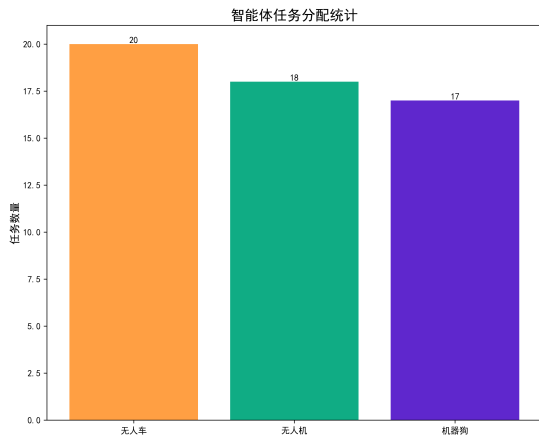


Figure 3: 智能体任务分配统计

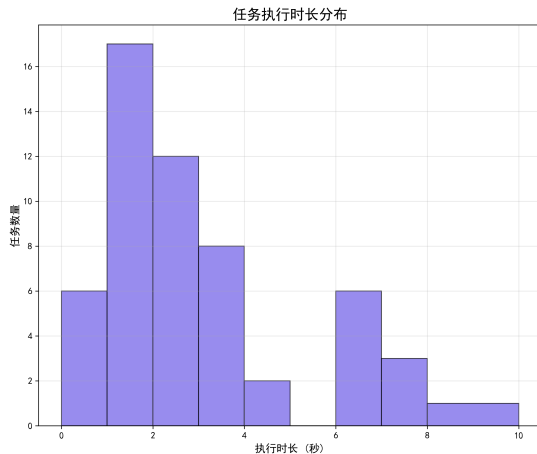


Figure 4: 任务执行时长分布



任务特性与执行效率关系

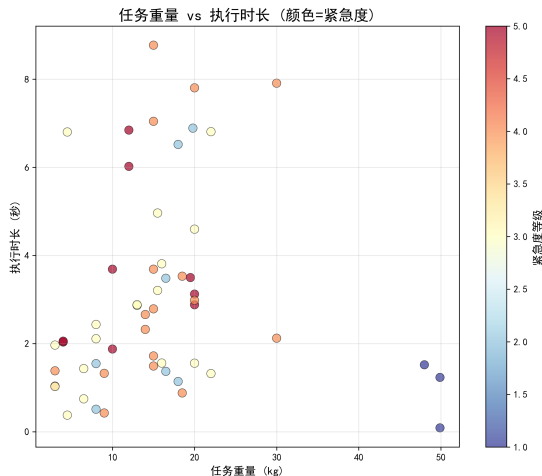


Figure 5: 任务重量与执行时长散点图 (颜色表示紧急度)



目录

1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

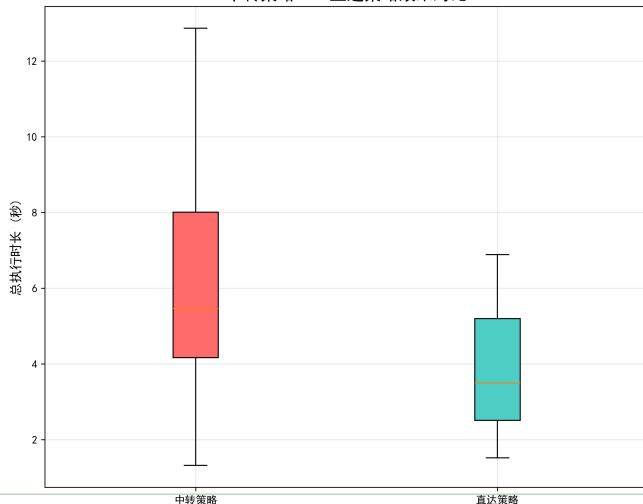
4. 总结与展望

5. 附录



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

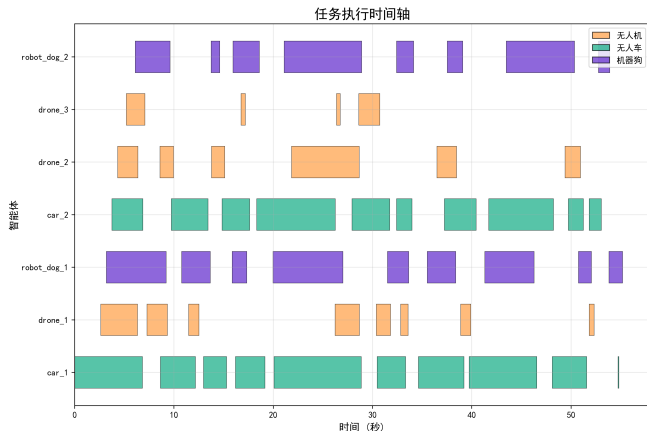


Figure 7: 任务执行时间轴 (横轴为时间, 纵轴为各智能体)

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

1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



系统运行可视化截图 (1)

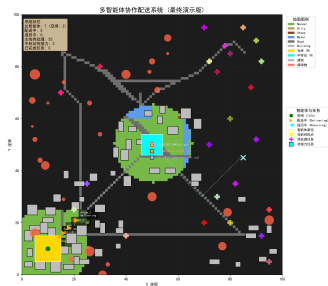


Figure 10: 初始状态

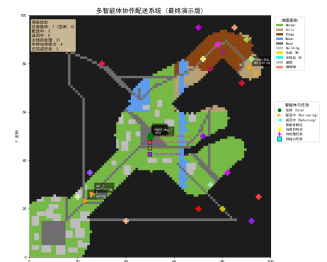


Figure 11: 任务分配

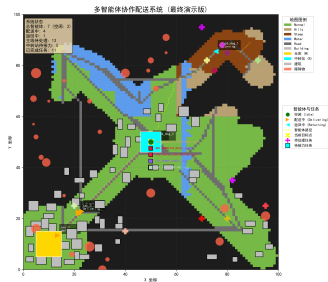


Figure 12: 协作配送

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

系统运行可视化截图 (2)

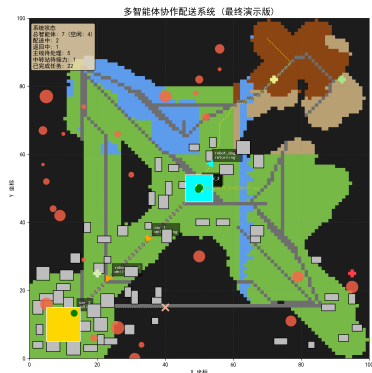


Figure 14: 中转执行

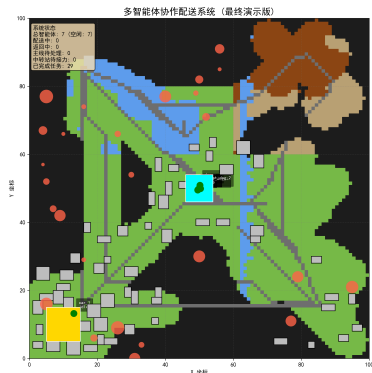


Figure 15: 任务完成

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



1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录



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



目录

1. 系统概述

- 1.1. 研究背景与动机
- 1.2. 相关技术综述

2. 建模思路

- 2.1. 异构智能体设计
- 2.2. 双策略决策机制
- 2.3. 路径规划算法
- 2.4. 多智能体协调

2.5. 环境建模

2.6. 可视化与日志

3. 模型测试

- 3.1. 测试场景设计
- 3.2. 关键性能指标
- 3.3. 协作效果分析
- 3.4. 系统可视化展示

4. 总结与展望

5. 附录