

基于分布式模型预测控制的多移动机器人安全移动

王玉斌

自动化1803 02

20188490

导师: 黄伯敏

研究背景及现状

研究背景

- 在机器人移动时生成无碰撞的轨迹是一项多机器人系统的关键任务
- 在多机器人协作任务中，尤其是仓库场景中，通常必须将机器人从当前位置安全地移动到一组最终位置
- 多机器人点对点移动任务是任何复杂的多机器人系统的重要组成部分

研究现状

- 离散化路径规划

将空间划分为网格并使用已知的离散搜索算法，限制初始和最终位置是底层网格的顶点，结合优化技术和预定义行为来管理二维空间中的碰撞。

- 最优互惠避碰（ORCA）

利用视其他机器人为移动障碍物，保证完整或非完整系统的机器人生成无碰撞轨迹，虽然证明是安全的，但该方法生成的动作过于保守。

- 势场函数

用于在稠密环境下分散机器人，从而实现碰撞避免，但容易出现死锁现象。

问题描述

移动机器人动力学

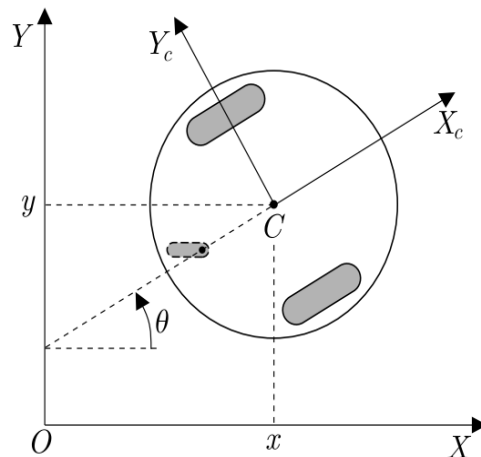
$$\dot{X} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v \cos \theta \\ v \sin \theta \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} u$$

(x, y) 表示笛卡尔坐标系下移动机器人位置

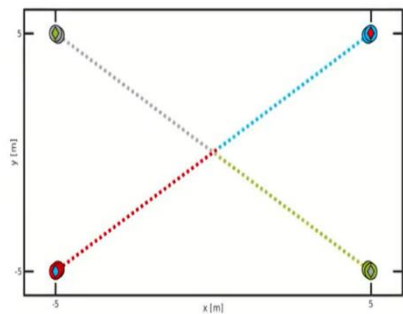
θ 表示机器人在笛卡尔坐标系下方向

$u = (v, \omega)^T$ 表示机器人控制输入

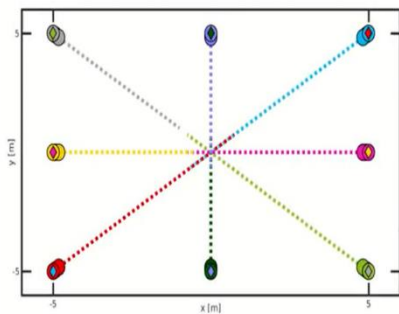
X 移动机器人状态向量



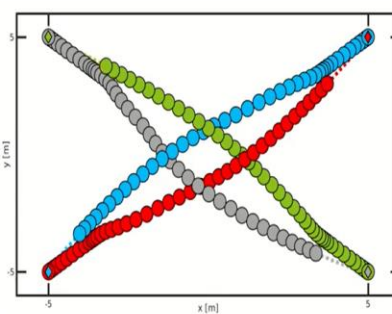
控制目标：控制多机器人点对点移动并避免碰撞



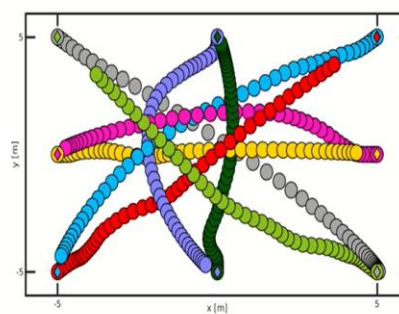
4 robots



8 robots



4 robots



8 robots

传统机器人运动规划：势函数法

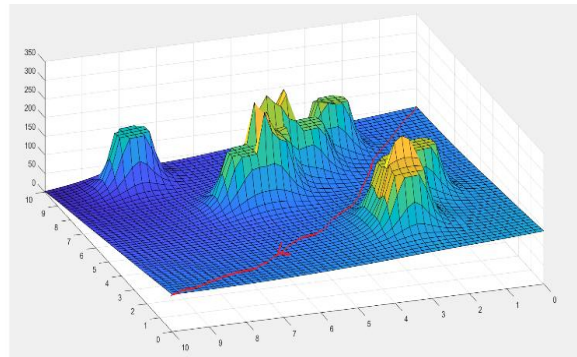
人工势能场

$$V_i = \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq i}}^n V_{i,j} (x_i - x_j, y_i - y_j)$$

$$V_{i,j} (x_i - x_j, y_i - y_j) =$$

$$K_{a,i} \left[(x_i - x_{\text{ref},i})^2 + (y_i - y_{\text{ref},i})^2 \right] + K_{o,i} e^{-\frac{1}{p} \left[\left(\frac{x_i - x_j}{\alpha} \right)^p + \left(\frac{y_i - y_j}{\beta} \right)^p \right]}, \text{ if } \left(\frac{x_i - x_j}{\alpha} \right)^p + \left(\frac{y_i - y_j}{\beta} \right)^p \leq 1,$$

$$V_{i,j} (x_i - x_j, y_i - y_j) = K_{a,i} \left[(x_i - x_{\text{ref},i})^2 + (y_i - y_{\text{ref},i})^2 \right], \text{ if } \left(\frac{x_i - x_j}{\alpha} \right)^p + \left(\frac{y_i - y_j}{\beta} \right)^p > 1$$



控制率 计算势场函数的负梯度：

$$\begin{bmatrix} \delta v'_{x,i} \\ \delta v'_{y,i} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \frac{\partial V_i}{\partial x_i} \\ \frac{\partial V_i}{\partial y_i} \end{bmatrix}, \quad \delta v_i = \sqrt{(\delta v'_{x,i})^2 + (\delta v'_{y,i})^2}$$

在移动机器人最大线速度、最大角速度约束下，通过势场函数负梯度解算出控制输入，使用底层控制器追踪解算出的参考控制量：

$$x_{\text{ref},i}(t_k) = x_i(t_{k-1}) + (t_k - t_{k-1}) \delta v_{x,i}$$

$$y_{\text{ref},i}(t_k) = y_i(t_{k-1}) + (t_k - t_{k-1}) \delta v_{y,i}$$

$$\theta_{\text{ref},i}(t_k) = \begin{cases} \text{atan}(\delta v_{y,i} / \delta v_{x,i}), & \delta v_i > 0 \\ \theta_{\text{ref},i}(t_{k-1}), & \delta v_i = 0 \end{cases}$$

$$v_{\text{ref},i}(t_k) = \sqrt{(\delta v_{x,i})^2 + (\delta v_{y,i})^2}$$

$$\omega_{\text{ref},i}(t_k) = (\theta_{\text{ref},i}(t_k) - \theta_{\text{ref},i}(t_{k-1})) / (t_k - t_{k-1})$$

矢量性的导航方法：导航矢量场

控制方案： 移动机器人被建模为圆. 机器人间需要保持的安全距离定义为 ρ_ϵ

引力矢量场

$$\mathbf{F}_g^i = [F_{gx}^i, F_{gy}^i]^T$$

$$F_{gx}^i = -\frac{x_i - z_{ix}}{\sqrt{(x_i - z_{ix})^2 + (y_i - z_{iy})^2}}$$

$$F_{gy}^i = -\frac{y_i - z_{iy}}{\sqrt{(x_i - z_{ix})^2 + (y_i - z_{iy})^2}}$$

斥力矢量场: $\mathbf{F}_{oj}^i = [F_{xoj}^i, F_{yoy}^i]^T$

$$F_{xoj}^i = \frac{x_i - x_j}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}$$

$$F_{yoy}^i = \frac{y_i - y_j}{\sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}}$$

融合引力、斥力矢量场:

$$\mathbf{F}_i = \prod_{j \in \mathcal{N}_i} (1 - \sigma_{ij}) \mathbf{F}_g^i + \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \sigma_{ij} \mathbf{F}_{oj}^i$$

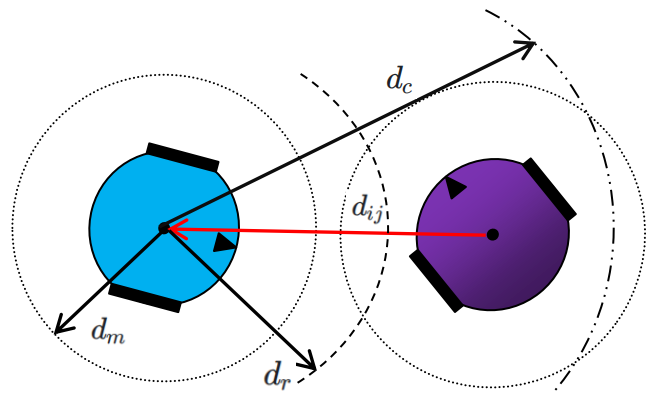
$$\sigma_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{for } d_m \leq d_{ij} < d_r \\ ad_{ij}^3 + bd_{ij}^2 + cd_{ij} + d, & \text{for } d_r \leq d_{ij} \leq d_c \\ 0, & \text{for } d_{ij} > d_c \end{cases}$$

控制率: $u_i = k_u \tanh \left((x_i - z_{ix})^2 + (y_i - z_{iy})^2 \right),$

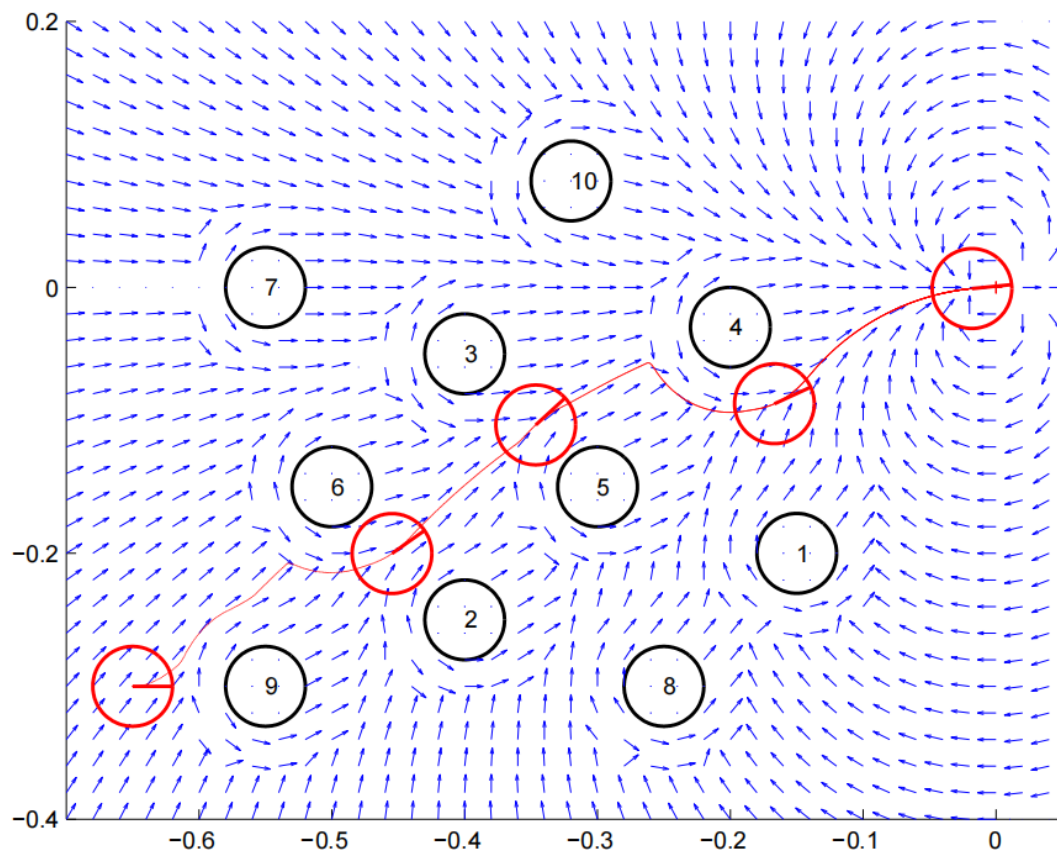
$$\omega_i = -k_\omega (\theta_i - \varphi_i) + \dot{\varphi}_i$$

$\varphi_i \triangleq \arctan (F_{iy}^*, F_{ix}^*)$ 定义为在导航矢量场 (x_i, y_i) 点处机器人方向

$$\dot{\varphi}_i = \left(\left(\frac{\partial F_{yi}^*}{\partial x_i} \cos \theta_i + \frac{\partial F_{yi}^*}{\partial y_i} \sin \theta_i \right) F_{xi}^* - \left(\frac{\partial F_{xi}^*}{\partial x_i} \cos \theta_i + \frac{\partial F_{xi}^*}{\partial y_i} \sin \theta_i \right) F_{yi}^* \right) u_i$$

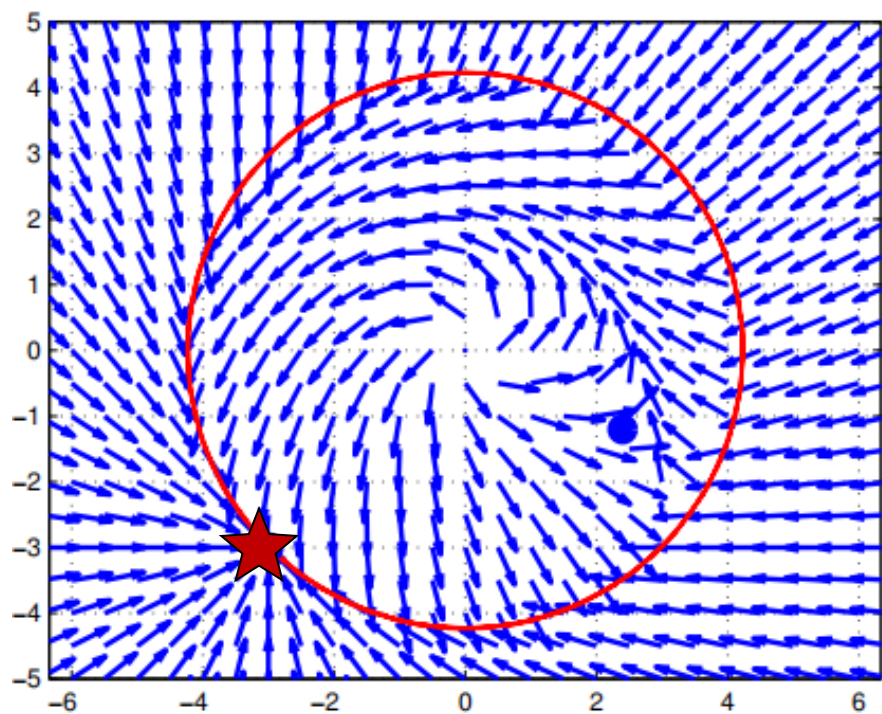
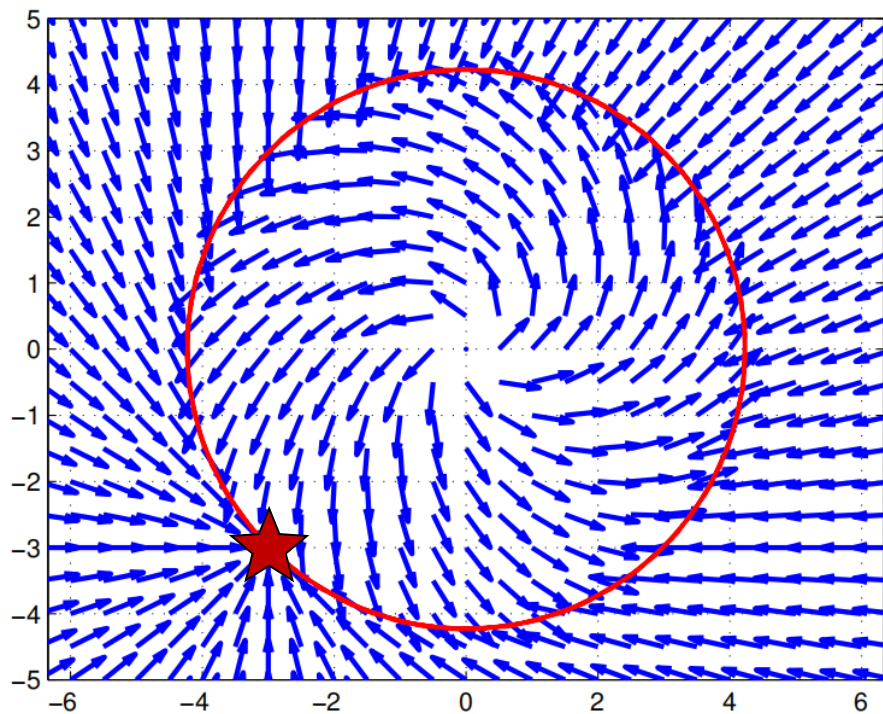


导航矢量场示意



黑色圆为其他移动机器人，在每一帧时间里，其他机器人可视为静态障碍物

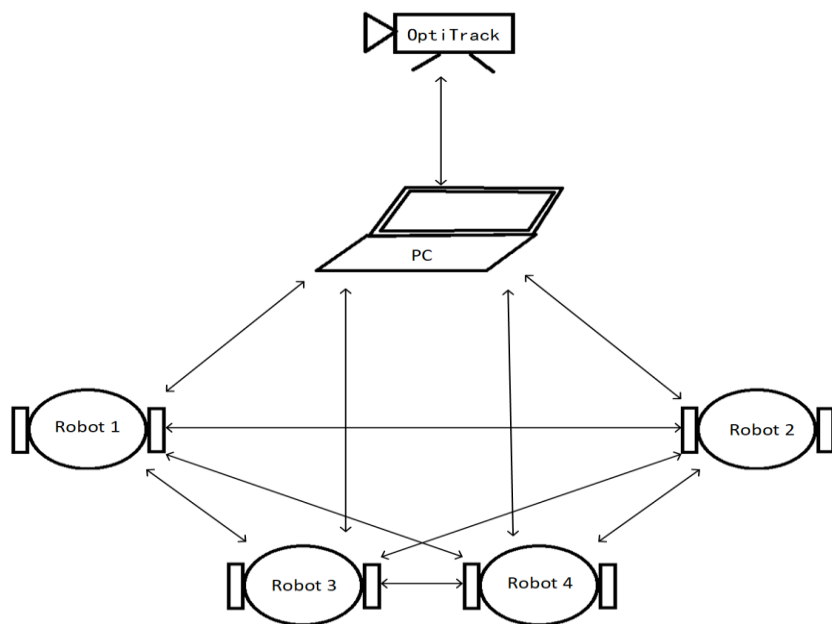
红色圆连成的轨迹为此导航矢量场生成潜在的机器人轨迹



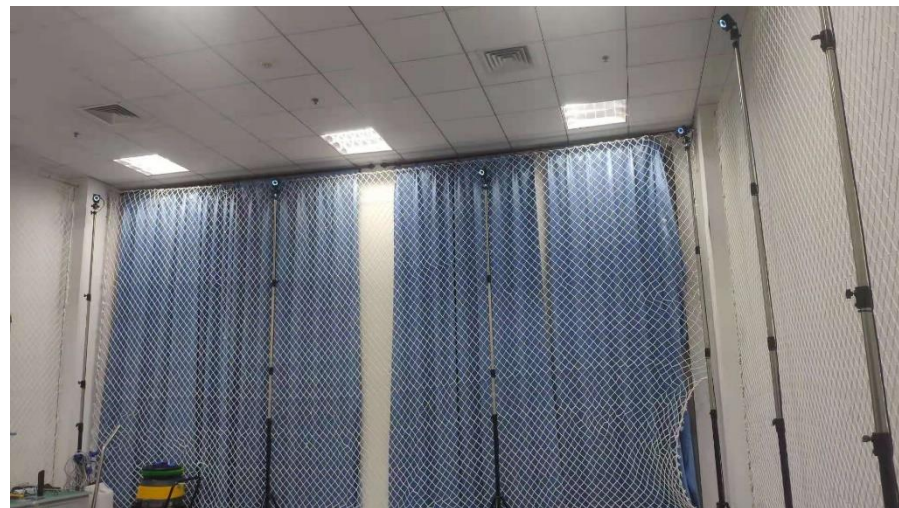
红色五角星示意场中机器人的终点，很容易发现，沿着场中矢量指向，在场中任何位置，都能找到一条轨迹控制机器人移动到目标位置

分布式实验平台

- 所有机器人，服务器，OptiTrack 运动捕捉系统连接到同一局域网下
- OptiTrack系统通过摄像机抓取机器人刚体信息，将机器人全局位置信息、姿态信息通过vrpn_client_ros服务发送给每一个移动机器人
- 实验平台基于ROS2通信框架、每台机器人搭载板载电脑提供计算服务

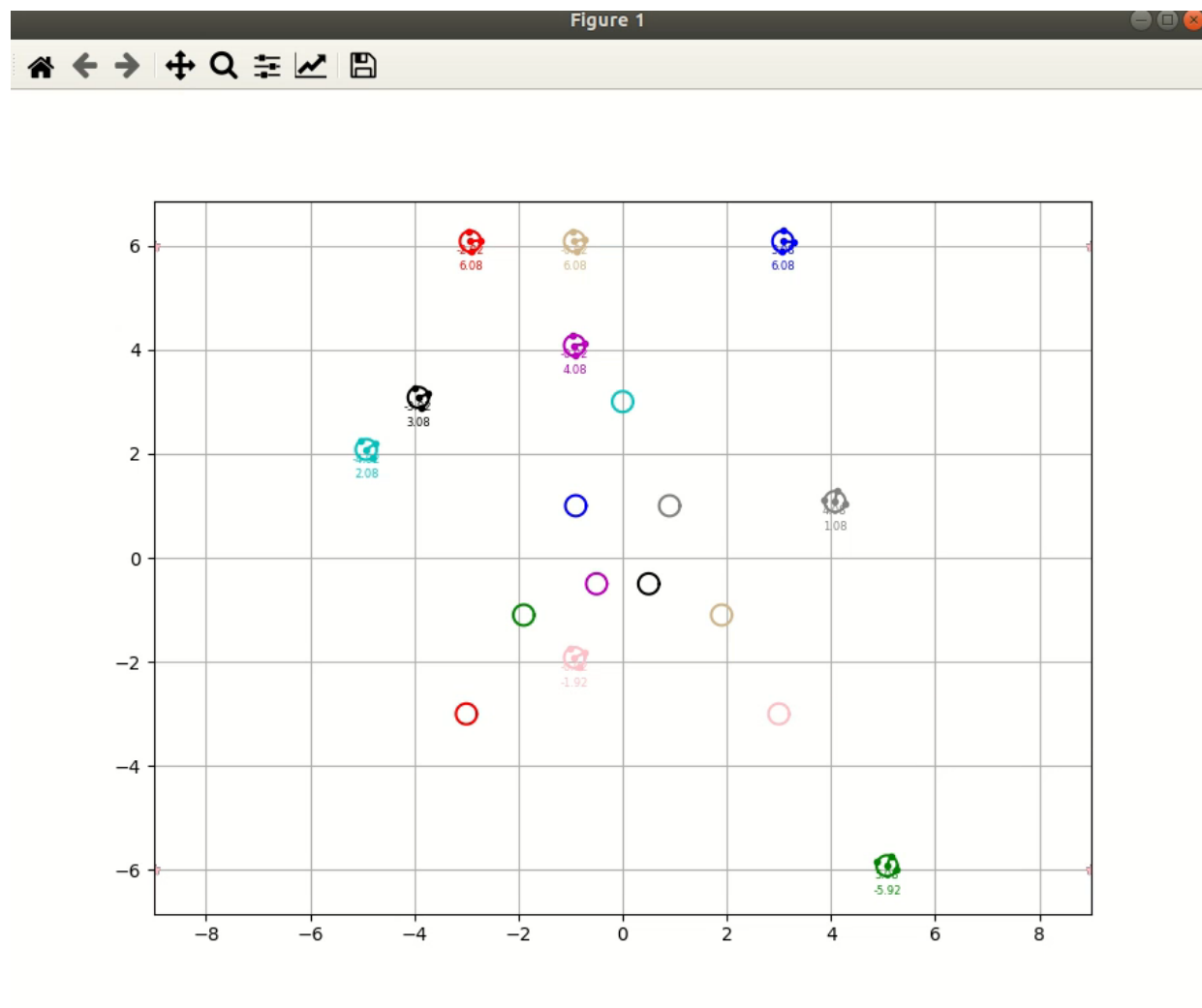


分布式机器人网络



OptiTrack全局定位系统

初步仿真结果

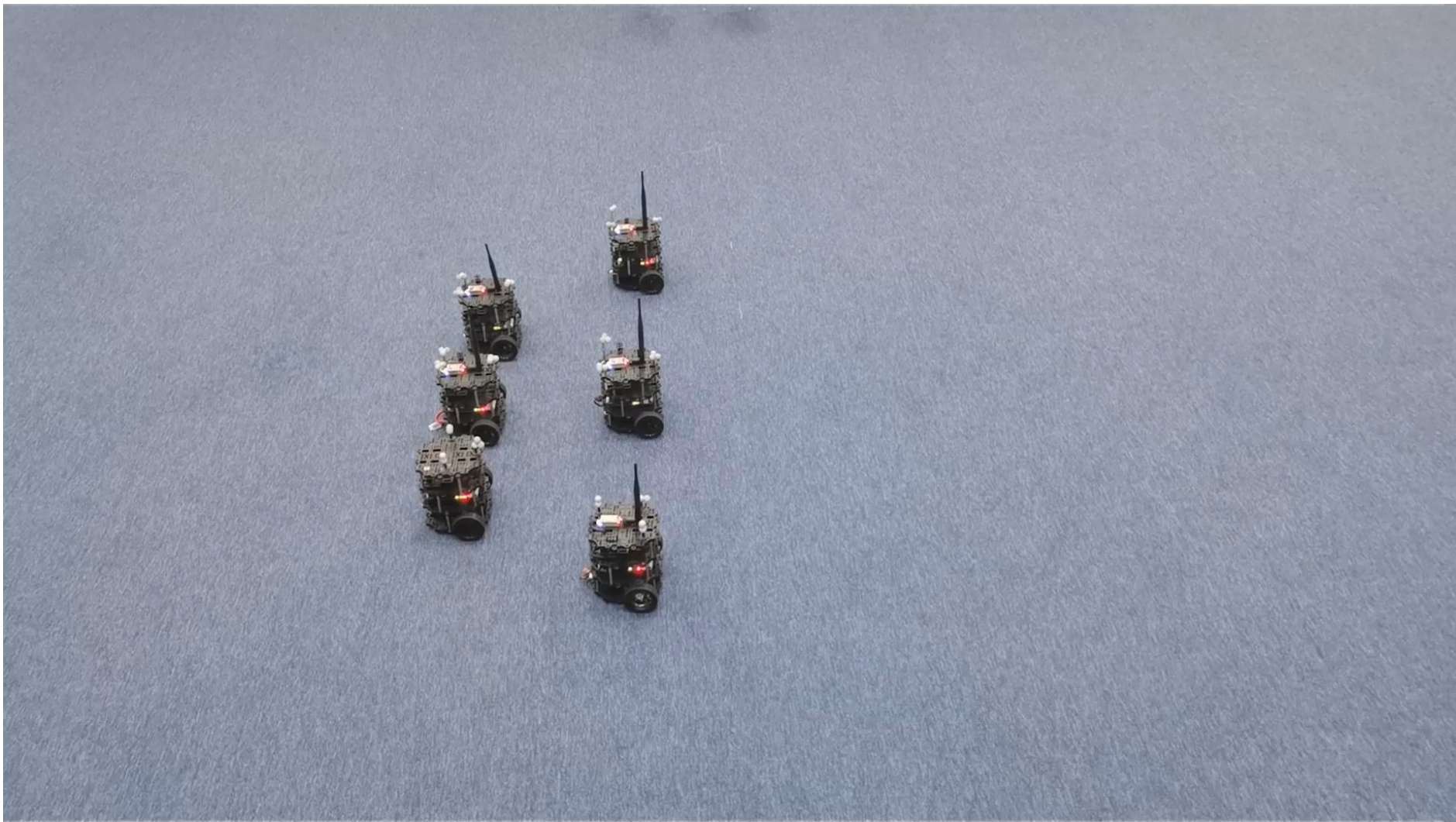


首先在仿真平台下验证方案可行性

初始化所有机器人位置后，给每个机器人分配一个目标点，抵达目标点后停留一段时间后分配新的目标点，所有的目标点分别构成A、N、C、L（ANCL实验室）图案

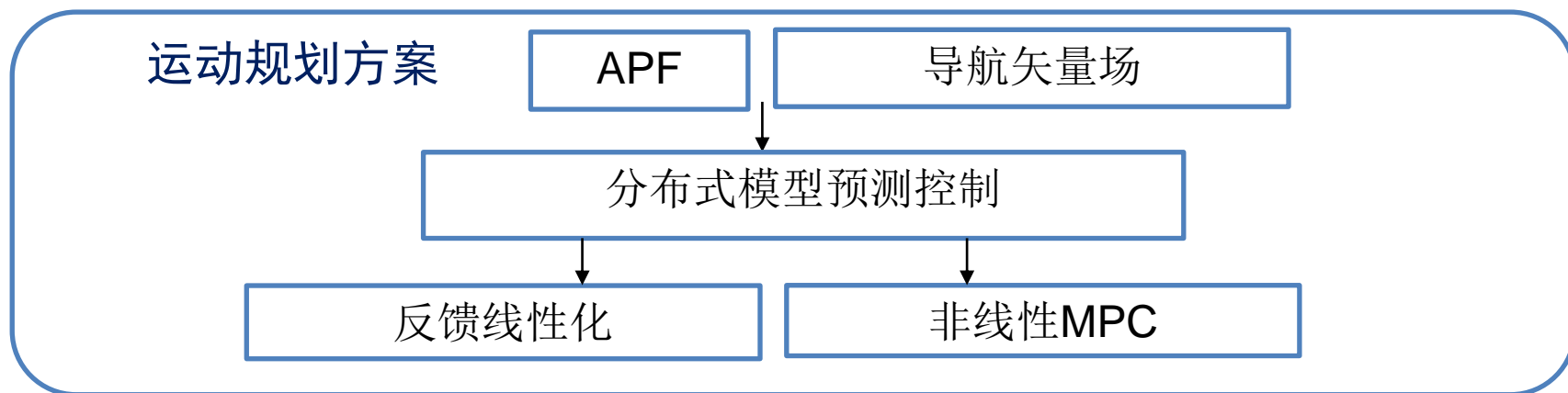
清楚发现避障效果良好

初步实验结果



Access: <https://yubinwang11.github.io//posts/2021/09/roboform>

下一阶段工作计划



时间安排:

2021.10.1-2021.12.31	进行方案的理论推导
2022.1.1-2022.4.1	在仿真平台和机器人平台进行验证
2022.4.2-2022.5.3	撰写毕业设计初稿
2022.5.4-2022.5.31	毕业设计论文修改与完善

谢谢！