现代控制理论

——多智能体系统协调控制

郑建英

北京航空航天大学　自动化科学与电气工程学院

多智能体系统的编队控制

编队控制

多智能体系统形成一个特定队形来实现最大范围的覆盖和检测

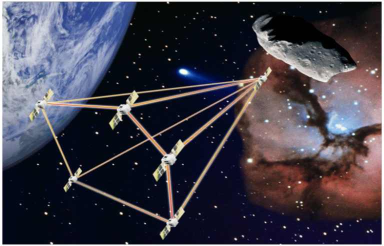
多智能体系统自主形成一个队形并保持这个队形来完成特定任务

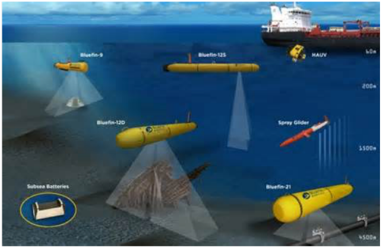
$\Downarrow$

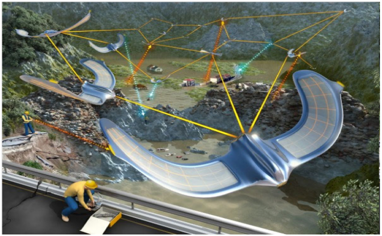
编队控制

一组多智能体通过局部的相互作用（通信、合作、竞争），使它们在运动过程中保持预先指定的几何图形，向指定的目标运动。

编队控制







[无人机编队表演]

编队控制

主要问题：

- 各智能体之间如何相互作用，才能生成指定的队形
- 在队形移动的过程中，智能体之间是如何相互作用，才能保持指定队形的
- 在运动的过程中，队形中的个体如何才能躲避障碍物
- 当外界环境突然改变时，如何自适应地改变队形或者保持队形，以适应环境

编队控制

主要研究内容

- 形成期望编队
  - 定义队形约束
  - 研究连通拓扑结构
  - 设计编队控制策略
  - 实现系统稳定性
- 提高编队性能
  - 提高鲁棒性
  - 控制队形伸缩
  - 避免碰撞和躲避障碍
  - 具有动态拓扑的编队控制

队形定义: 决定如何定义一个期望的几何队形，即利用一些约束来描述一个几何形状

根据传感器设备测量和通讯能力的强弱，将传感器划分为用于测量绝对位置、相对位置、相对距离以及相对角度四种类型。

基于传感器这四种不同的检测类型，几何队形的定义也可以被分为四类：基于绝对位置定义的队形，基于相对位置定义的队形，基于相对距离定义的队形以及基于相对角度定义的队形

编队控制

基于绝对位置定义的队形：

- 用一组期望的绝对位置来定义期望队形
- 实现期望队形：所有智能体运动到其期望位置上
- 对传感器测量能力要求很高

基于相对位置定义的队形：

- 为每个智能体和其邻居智能体设定一个期望相对位置来定义期望队形
- 实现期望队形：所有智能体与其邻居智能体之间的相对位置达到期望的相对位置
- 相对位置满足一定的约束，拓扑结构需要满足一定的连通条件

编队控制

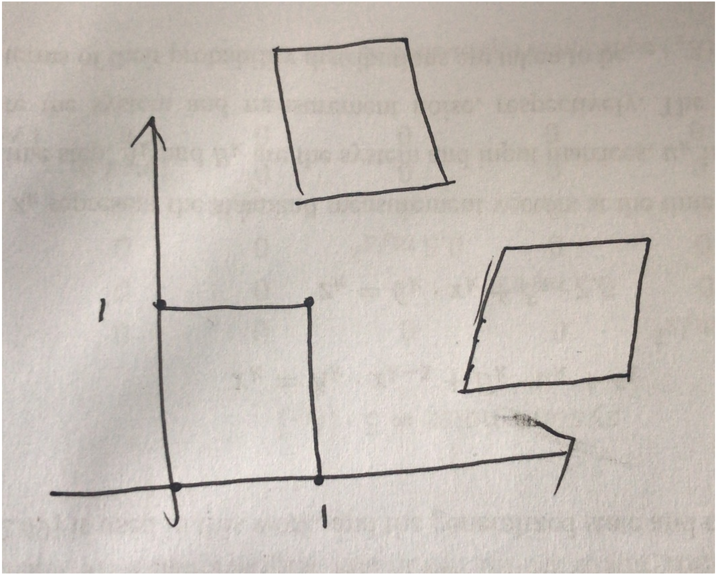
基于相对距离定义的队形:

- 为每个智能体和其邻居智能体设定一个期望相对距离来定义期望队形
- 实现期望队形：所有智能体与其邻居自主体之间的相对距离达到指定的距离
- 连通拓扑满足刚性条件才能实现一个形状固定的队形

基于角度定义的队形:

- 为每个智能体和其邻居之间设定一个期望角度来定义期望队形
- 实现期望队形：所有智能体与其邻居智能体之间的角度达到期望的角度
- 要求智能体之间的连通拓扑具有一些角度刚性的条件

编队控制



编队控制

基于给定方式的期望队形:

1) **形成期望编队**

- 静止编队控制
- 运动编队控制

根据期望队形的约束，研究可实现一个期望的编队的通讯拓扑结构 → 设计编队控制策略 → 验证稳定性

2) **提高编队控制的性能**

智能体的动态模型

- 质点模型: 将机器人或者移动传感器等智能体进行高度简化的一种模型。它将智能体简化为一个有质量但是没有体积，且可以移动的质点，通过研究这个质点的动态变化来研究系统的性能。

  一阶运动学模型、二阶动力学模型、一般的高阶动力学模型

- 复杂机器人模型:对于一些具有不能用简单质点代替的机械结构或者相对复杂的自主体，可以用一些相对复杂的机器人模型作为近似

  独轮车模型、拉格朗日模型

编队控制方法:

- 基于绝对位置的编队控制方法
  - 直接对智能体位置进行控制
  - 对传感器的检测能力要求很高，要求所有智能体都能检测到自己在全局坐标系下的位置
  - 对智能体之间的交互拓扑要求不高，甚至是可以不需要智能体之间的交互
- 基于相对位置的编队控制方法
  - 将智能体之间的相对位置信息作为智能体的控制输入
  - 对传感器检测性能要求相对没那么高，智能体通过局部坐标系可以检测到自己与邻居的相对位置
  - 需要智能体之间有一定的交互，即通讯拓扑需要满足一定的连通结构
  - 基于拉普拉斯矩阵的分布式编队控制算法

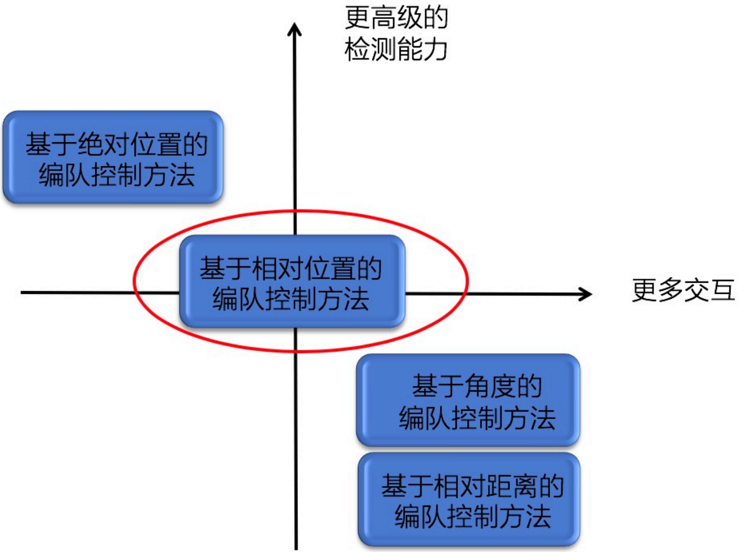
编队控制

编队控制方法:

- 基于相对距离的编队控制方法
  - 传感器检测性能方面要求相对较低，每个智能体通过独立的局部坐标系可以检测到自己与邻居的相对距离
  - 需要智能体之间存在更多的交互
  - 刚性图理论
- 基于角度的编队控制方法
  - 在传感器检测性能方面要求也相对较低，一般要求所有智能体都在全局坐标系或者具有同方向的局部坐标系下
  - 对智能体之间交互程度要求比较高
  - 角度刚性

编队控制

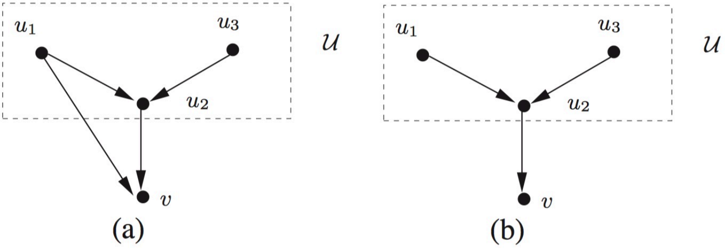
编队控制方法:


更高级的
检测能力
基于绝对位置的
编队控制方法
基于相对位置的
编队控制方法
更多交互
基于角度的
编队控制方法
基于相对距离的
编队控制方法

图论

$\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E})$ 或者 $\mathcal{G} = (\mathcal{V}, \mathcal{E}, \mathcal{A})$

- **顶点 v 对非单顶点集合 U 是 2-可达:** 移去 v 之外任意一个的顶点，从 U 到顶点 v 总存在一条路径



顶点 v 对集合 U 是 2-可达的　　顶点 v 对集合 U 不是 2-可达的

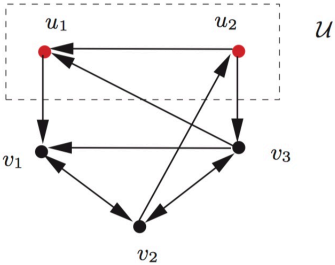
图论

- **双根有向图**：存在一个两个顶点（称作根）组成的子集，从这个子集出发到任意其他点都是 2-可达的
- 生成子图 $\mathcal{G}' = \{\mathcal{V}, \mathcal{E}'\}$ 是一个 **以点集** $R = \{r_1, r_2\} \subset \mathcal{V}$ **为根的一个生成双树**:
  1. 点集 R 中的任意一个顶点都没有入邻居；
  2. 点集 $\mathcal{V} - R$ 中的任意一个顶点都有两个入邻居；
  3. 点集 $\mathcal{V} - R$ 中的任意一个顶点从点集 R 都是 2-可达的

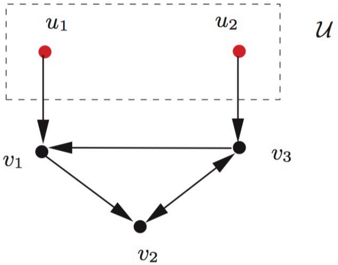
图论

- **双根有向图**：存在一个两个顶点（称作根）组成的子集，从这个子集出发到任意其他点都是 2-可达的
- 生成子图 $\mathcal{G}' = \{\mathcal{V}, \mathcal{E}'\}$ 是一个 **以点集** $R = \{r_1, r_2\} \subset \mathcal{V}$ **为根的一个生成双树**:
  1. 点集 R 中的任意一个顶点都没有入邻居；
  2. 点集 $\mathcal{V}-R$ 中的任意一个顶点都有两个入邻居；
  3. 点集 $\mathcal{V}-R$ 中的任意一个顶点从点集 R 都是 2-可达的

图论



(c)



(d)

双根有向图，非生成双树

生成双树

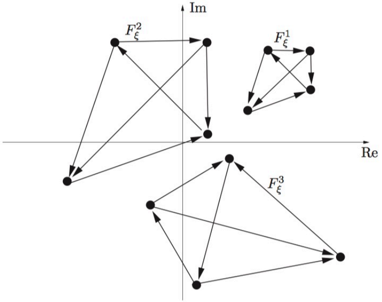
图论

$$\mathcal{A} = [a_{ij}], \mathcal{D} = \mathrm{diag}\left\{\sum_{j=1}^{n} a_{1j}, \ldots, \sum_{j=1}^{n} a_{nj}\right\}$$

$$\mathcal{L} = \mathcal{D} - \mathcal{A}$$

- a_{ij} 正实数—正实拉普拉斯矩阵:
  - ⋆ 一致性控制、平移编队控制问题、一致性滤波问题...
- a_{ij} 实数—符号拉普拉斯矩阵:
  - ⋆ 双一致性问题、簇一致性问题、仿射编队控制问题
- a_{ij} **复数—复拉普拉斯矩阵:**
  - ⋆ **相似队形控制问题**、基于相对位置的定位问题

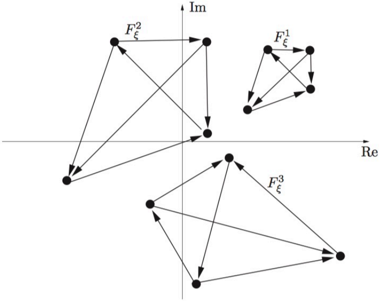
相似队形控制问题



相似队形控制问题

- 控制一个多智能体系统形成一个与期望队形相似的几何队形
- 四个自由度—平移、旋转和放缩
- 基于相对位置的控制方法

相似队形控制问题



相似队形控制问题

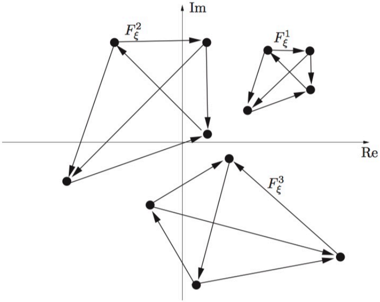
- 控制一个多智能体系统形成一个与期望队形相似的几何队形
- 四个自由度—平移、旋转和放缩
- 基于相对位置的控制方法

- $\xi = [\xi_1, \xi_2, \ldots, \xi_n]^T$：复平面上的一组队形基向量
- 相似队形

$$F_\xi = c_1 \mathbf{1}_n + c_2 \xi$$

  - ⋆ $c_1 \in \mathbb{C}$ 对应水平和垂直平移两个自由度
  - ⋆ $c_2 = ke^{i\alpha}$ 对应放缩和旋转两个自由度：k 对应放缩，α 对应旋转

相似队形控制问题



相似队形控制问题

- 控制一个多智能体系统形成一个与期望队形相似的几何队形
- 四个自由度—平移、旋转和放缩
- 基于相对位置的控制方法

■ 考虑一个包含 n 个智能体的多智能体系统

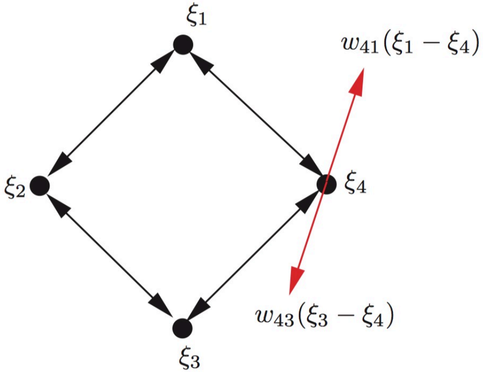
- 智能体 i 在复平面上的位置为 z_i; $z = \begin{bmatrix} z_1 & z_2 & \cdots & z_n \end{bmatrix}^T \in \mathbb{C}^n$
- 多智能体系统渐近形成一个期望的运动编队 F_ξ:
  存在两个平滑函数 $c_1(t)$ 和 $c_2(t)$ 使得

$$\lim_{t\to\infty} z(t) = c_1(t)\mathbf{1}_n + c_2(t)\xi$$

相似队形控制问题

■ 仅利用智能体之间的局部相对位置信息实现相似队形

$$\sum_{j\in\mathcal{N}_i}\omega_{ij}(\xi_j-\xi_i)=0 \quad\Longrightarrow \mathcal{L}\xi=0 \quad\Longrightarrow \ker\mathcal{L}=\{c_1\mathbf{1}_n+c_2\xi : c_1, c_1\in\mathbb{C}\}$$



相似队形控制问题

- **仅利用智能体之间的局部相对位置信息实现相似队形**

$$\sum_{j\in\mathcal{N}_i}\omega_{ij}(\xi_j-\xi_i)=0 \quad\Longrightarrow \mathcal{L}\xi=0 \quad\Longrightarrow \ker\mathcal{L}=\{c_1\mathbf{1}_n+c_2\xi : c_1, c_1\in\mathbb{C}\}$$

- 智能体系统一阶运动学模型 $\dot{z}_i=u_i$
- 分布式线性编队控制策略

$$u_i=d_i\sum_{j\in\mathcal{N}_i}\omega_{ij}(z_j-z_i)$$

$$\Longrightarrow \dot{z}=-D\mathcal{L}z,\ D=\mathrm{diag}\{d_1,\ldots,d_i\}\text{待设计}$$

定理 1

多智能体系统可实现相似于 ξ 的编队的充分必要条件是 $\mathcal{G}$ 是双根的

编队控制

	实拉普拉斯 $L \in \mathbb{R}^{n\times n}$	复拉普拉斯 $L \in \mathbb{C}^{n\times n}$
连续系统	$\dot{x} = -Lx,\ x \in \mathbb{R}^n$	$\dot{z} = -DLz,\ z \in \mathbb{C}^n$
集体运动	一致性	相似编队
集合表示	$\ker(L) = \{a\mathbf{1} : a \in \mathbb{R}\}$	$\ker(L) = \{c_1\mathbf{1} + c_2\xi : c_1, c_2 \in \mathbb{C}\}$
代数条件	一个零特征根	两个零特征值
几何条件	单根	双根
特征根分布	右半平面	复平面任意位置
连续系统稳定性	稳定的	通过稳定矩阵 D 稳定