



## ■ Lecture 4

# Multi-agent 算法在无人机中应用

高飞

浙江大学 控制学院



1. 基于Virtual Structures的编队控制
2. 基于速度障碍物（VO）的集群导航算法
3. 基于生物群落模型的集群导航算法

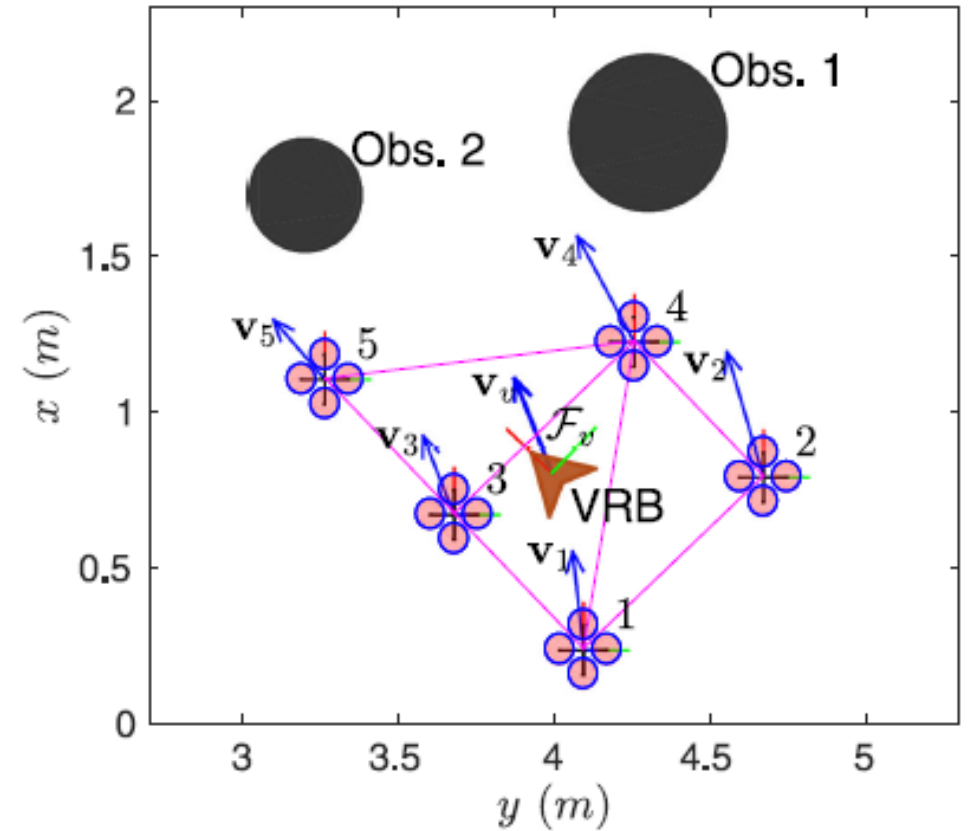


# 1. 基于Virtual Structures的编队控制

Zhou.D, Wang.Z , ‘Agile Coordination and Assistive Collision Avoidance for Quadrotor Swarms Using Virtual Structures’, **IEEE TRO**, 2018

## ➤ 核心思想

- 集群编队结构表示：将整个集群用virtual structure表示为一个世界坐标系下的整体（virtual rigid body, VRB）；
- 多目标需求：基于势场法表示集群中每架无人机编队保持、相互躲避、障碍物避障的需求；
- 控制：在VRB坐标系下统一上述各个势场得到相应的控制指令。



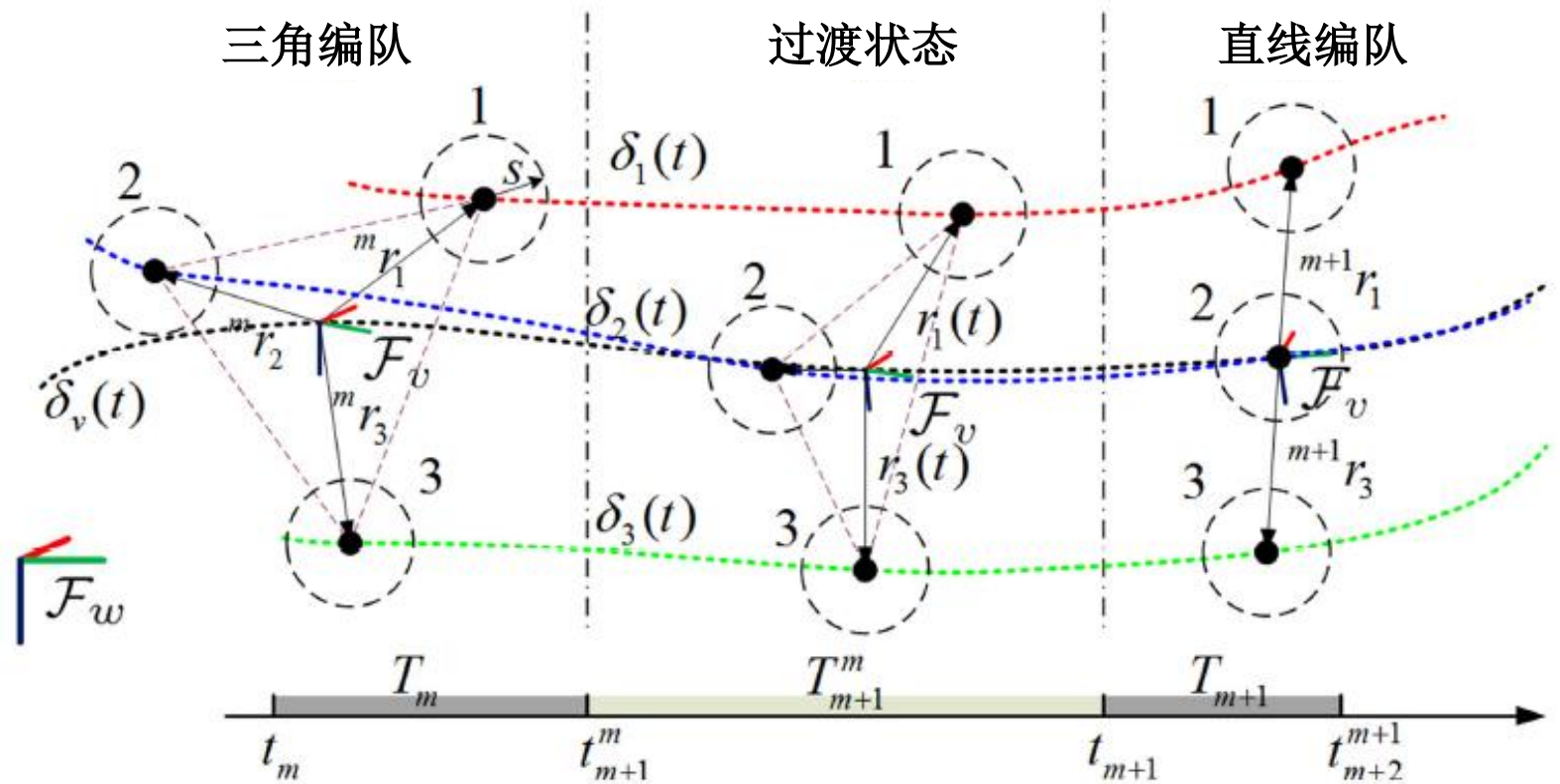
世界坐标系下VRB表示的集群编队



# 1. 基于Virtual Structures的编队控制

## ➤ 解耦为两个子问题

- 在世界坐标系 $\mathcal{F}_w$ 下，考虑VRB的轨迹，此时集群被视为一个整体。
- 在局部参考坐标系 $\mathcal{F}_v$ 下，考虑控制每个独立个体的轨迹。
- $\delta_v(t)$ : VRB的轨迹
- $\delta_1(t)/\delta_2(t)/\delta_3(t)$ : 实际运动轨迹



世界坐标系下VRB表示的集群编队



# 1. 基于Virtual Structures的编队控制

➤ 基于VRB的集群编队表示

• VRB坐标：平移+旋转  $\delta_v(t) = (\mathbf{p}_v(t), \mathbf{R}_v(t))$

• 编队表示：与VRB的相对坐标

✓ 时变编队  $\{\mathbf{r}_1(t), \mathbf{r}_2(t), \dots, \mathbf{r}_N(t)\}$

✓ 固定编队  $\{\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2, \dots, \mathbf{r}_N\}$

• 单机的期望状态：  $\mathbf{p}_i(t) = \mathbf{p}_v(t) + \mathbf{R}_v(t)\mathbf{r}_i(t)$

✓ 时变编队  $\begin{cases} \mathbf{p}_i = \mathbf{p}_v + \mathbf{R}_v \mathbf{r}_i \\ \dot{\mathbf{p}}_i = \dot{\mathbf{p}}_v + \dot{\mathbf{R}}_v \mathbf{r}_i + \mathbf{R}_v \dot{\mathbf{r}}_i \end{cases}$

✓ 固定编队  $\begin{cases} \mathbf{p}_i = \mathbf{p}_v + \mathbf{R}_v \mathbf{r}_i \\ \dot{\mathbf{p}}_i = \dot{\mathbf{p}}_v + \dot{\mathbf{R}}_v \mathbf{r}_i \end{cases}$



# 1. 基于Virtual Structures的编队控制

## ➤ 在障碍物环境下基于势场法的编队控制

### • 编队势能场

将第*i*个无人机约束到期望编队位置 $\mathbf{r}_i^d$ ，编队势能场在位置 $\mathbf{r}$ 处产生的向量为：

$$\mathbf{V}_{0,i}(\mathbf{r}) = A(\mathbf{r}_i^d - \mathbf{r}), \quad i = 1, 2, \dots, N$$

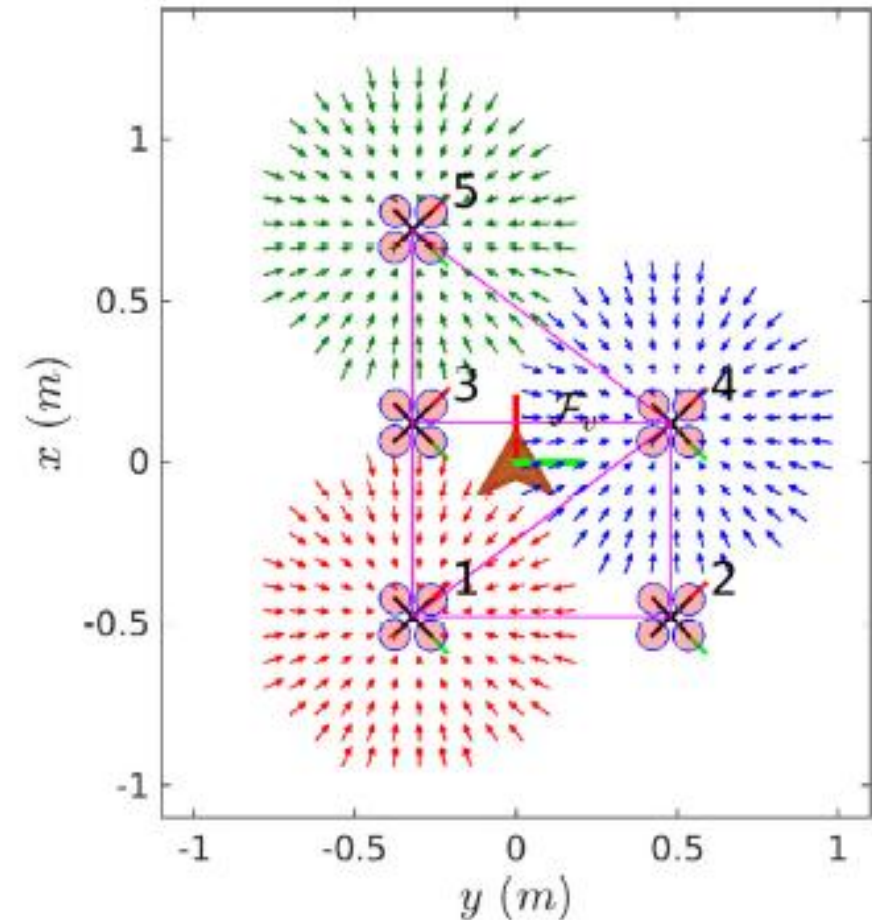
其中A为大于0的系数。

### • 相互躲避势能场

对于邻域内的 $\mathcal{N}_i$ 个位于位置 $\mathbf{r}_j$ 的无人机，其相互躲避势能场在位置 $\mathbf{r}$ 处产生的向量为：

$$\mathbf{V}_{2,i}(\mathbf{r}) = \sum_{j \in \mathcal{N}_i} \left( B \exp \left( -\frac{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j\|^2}{2\sigma_4^2} \right) \right) \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}_j}{\|\mathbf{r} - \mathbf{r}_j\|}$$

其中B为大于0的系数。



编队向量场

图中彩色箭头所指为编队势能场在该位置的向量

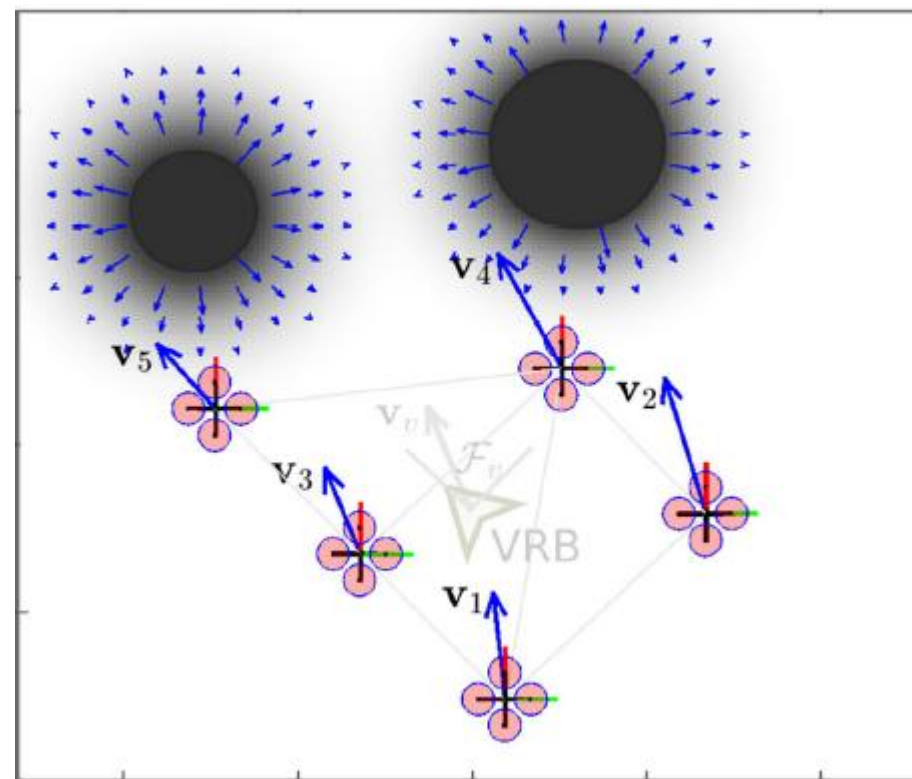


# 1. 基于Virtual Structures的编队控制

- 在障碍物环境下基于势场法的编队控制
- 障碍物势能场
- k个位于 $\bar{o}_{w,k}$ 的障碍物，其障碍物总势能场在位置 $\bar{p}$ 处产生的向量为：

$$\mathbf{V}_3(\bar{p}) = \sum_{k=1}^n \left( C_k \exp \left( -\frac{\|\bar{p} - \bar{o}_{w,k}\|^2}{2\sigma_3^2} \right) \right) \frac{\bar{p} - \bar{o}_{w,k}}{\|\bar{p} - \bar{o}_{w,k}\|}$$

- 其中 $C_k$ 为较大的系数以确保避障向量足够大



障碍物向量场

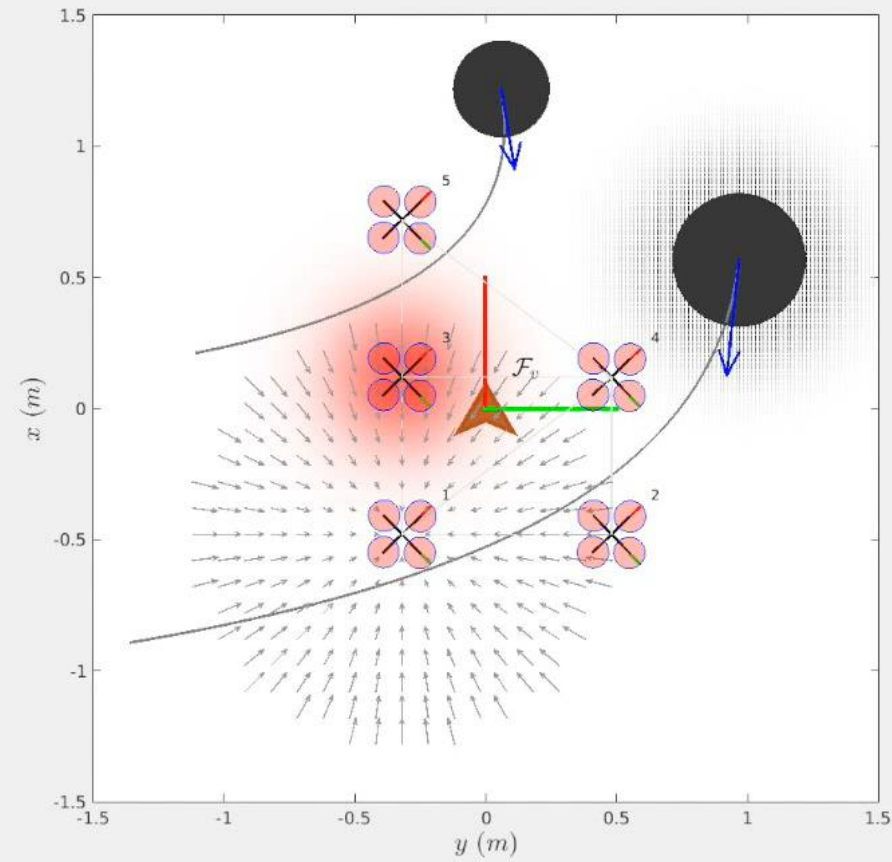
图中蓝色箭头所指为障碍物势能场在该位置的向量



# 1. 基于Virtual Structures的编队控制

浙江大学 · 控制学院

- 在障碍物环境下基于势场法的编队控制
- 将上述各个向量进行加权, 得到最终的单机控制量

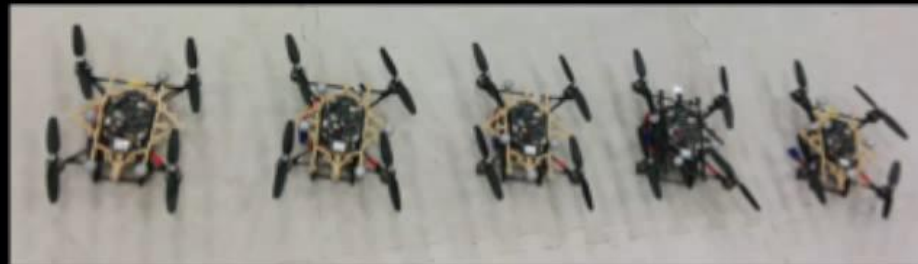




# 1. 基于Virtual Structures的编队控制

## Experiment I: "Trapezoid" Formation

- ✧ Five quadrotors in a "Trapezoid" formation
- ✧ Two static obstacles



实物实验

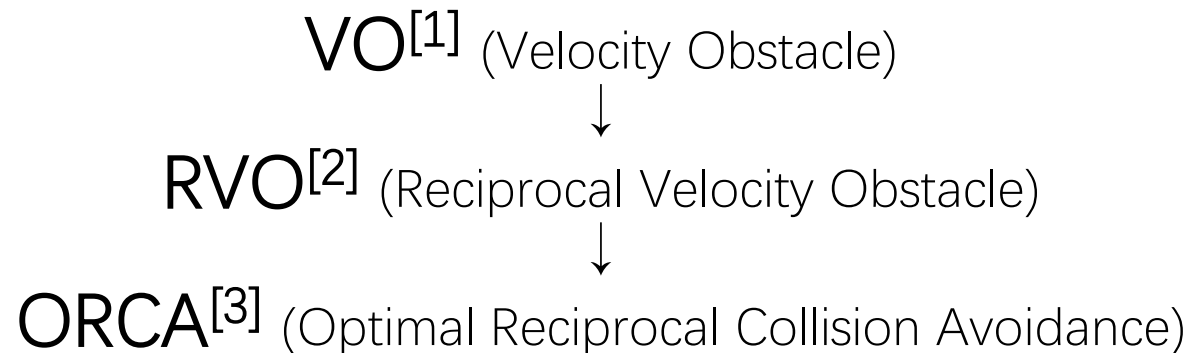
遥控器代表VRB的轨迹输入

实现了“像操作整体一样地控制集群编队”的实物实验效果



## 2. VO (Velocity Obstacle)

# 基于速度障碍物（VO）的多智能体避障算法



[1] Fiorini P, Shiller Z. Motion planning in dynamic environments using velocity obstacles[J]. The International Journal of Robotics Research, 1998, 17(7): 760-772.

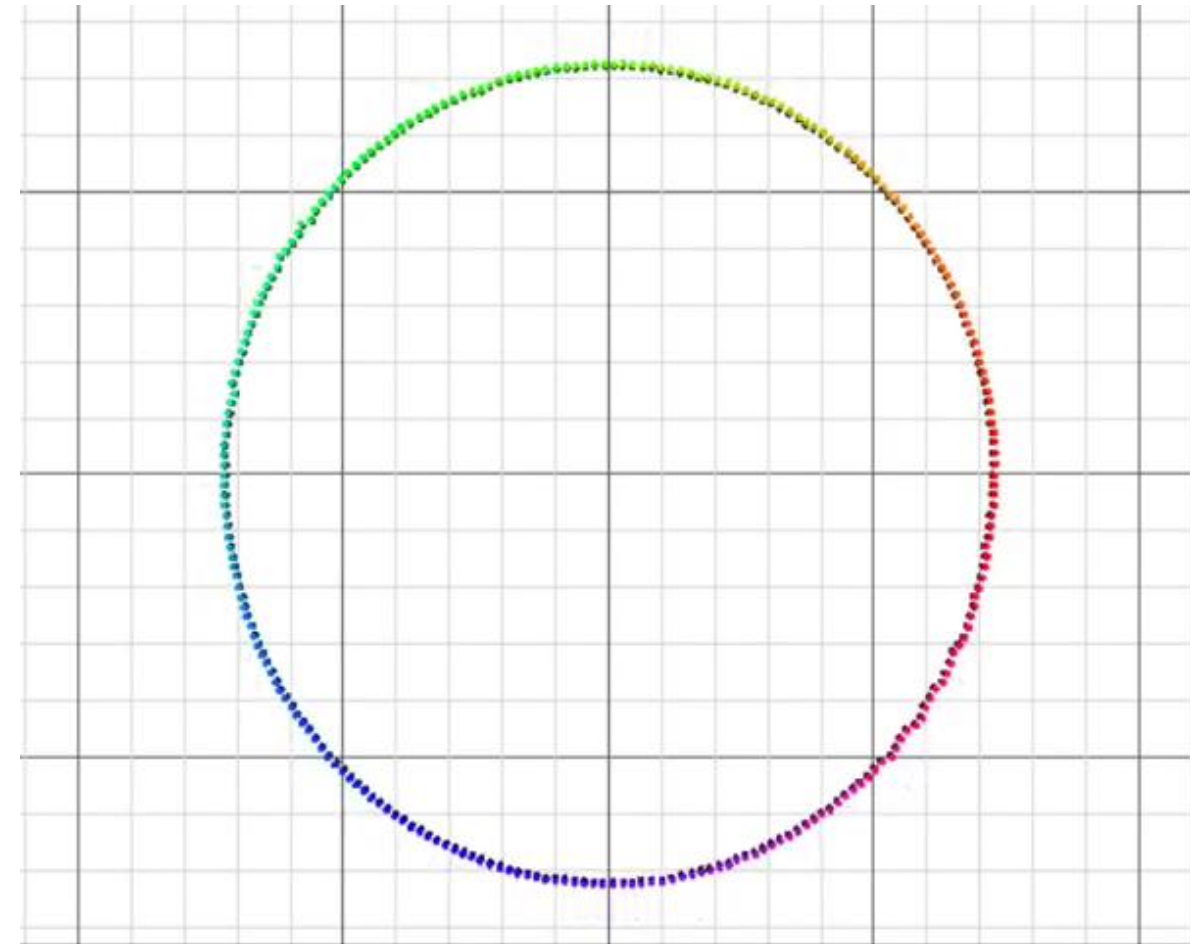
[2] Van den Berg J, Lin M, Manocha D. Reciprocal velocity obstacles for real-time multi-agent navigation[C]. 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation. IEEE, 2008: 1928-1935.

[3] Van Den Berg J, Guy S J, Lin M, et al. Reciprocal n-body collision avoidance[M]. Robotics research. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011: 3-19.



## 2. VO效果演示

浙江大学·控制学院



ClearPath

Fast Collision Avoidance for Multi-agent Simulations



## 2. VO效果演示

浙江大学·控制学院

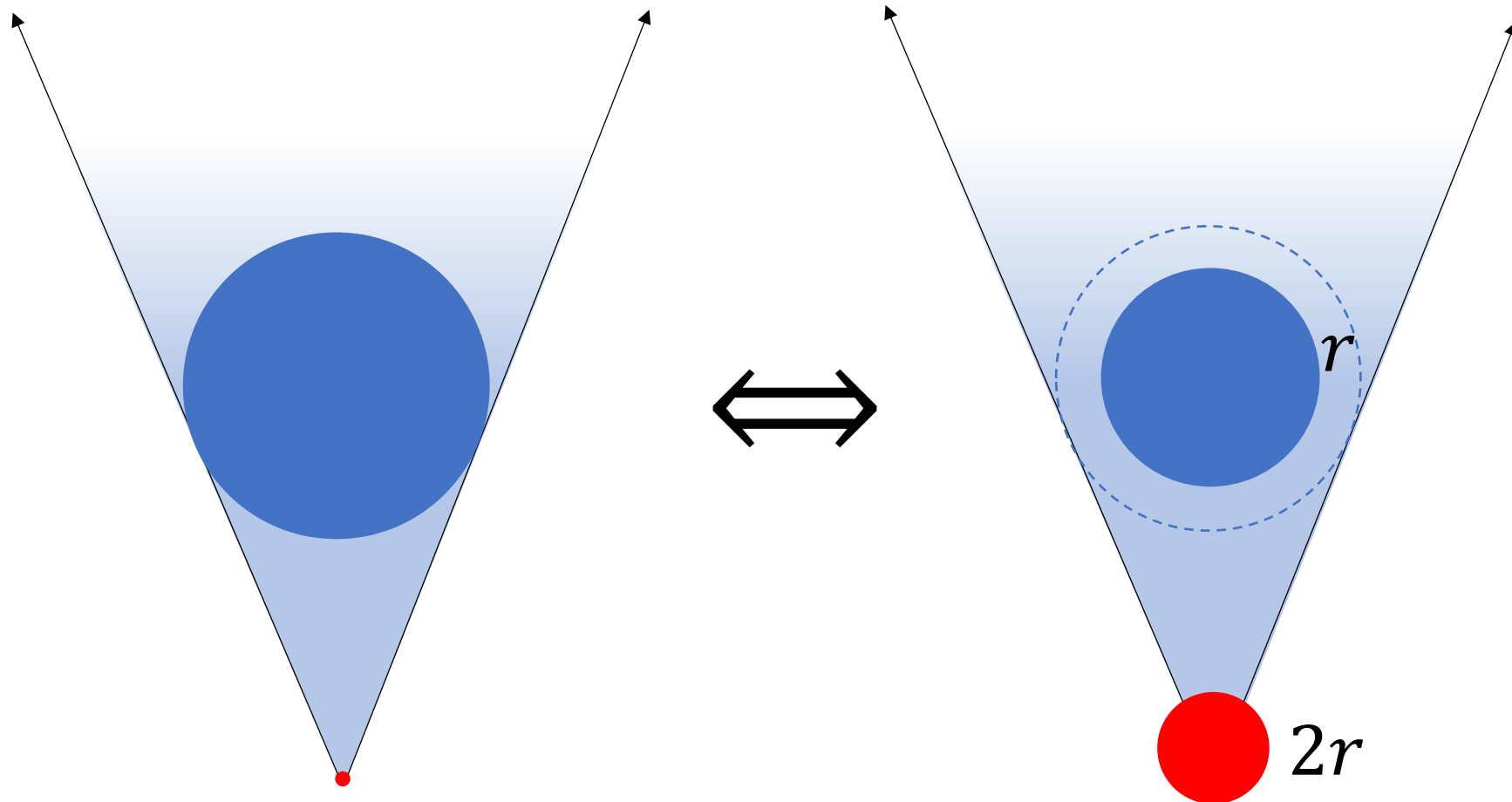
On Segregative Behaviors and Flocking  
Using Velocity Obstacles

Vinicius Graciano Santos  
Luiz Chaimowicz

Federal University of Minas Gerais



## 2. VO (Velocity Obstacle)



问题简化：直径 $2r$ 的机器人（红色）避开一个障碍物（蓝色）等价于把机器人看作质点，障碍物膨胀 $r$ 。  
VO的直观概念：对于红色机器人，任何落在浅蓝色区域内速度矢量被称作速度障碍物（VO），因为这些速度将最终导致与障碍物碰撞。

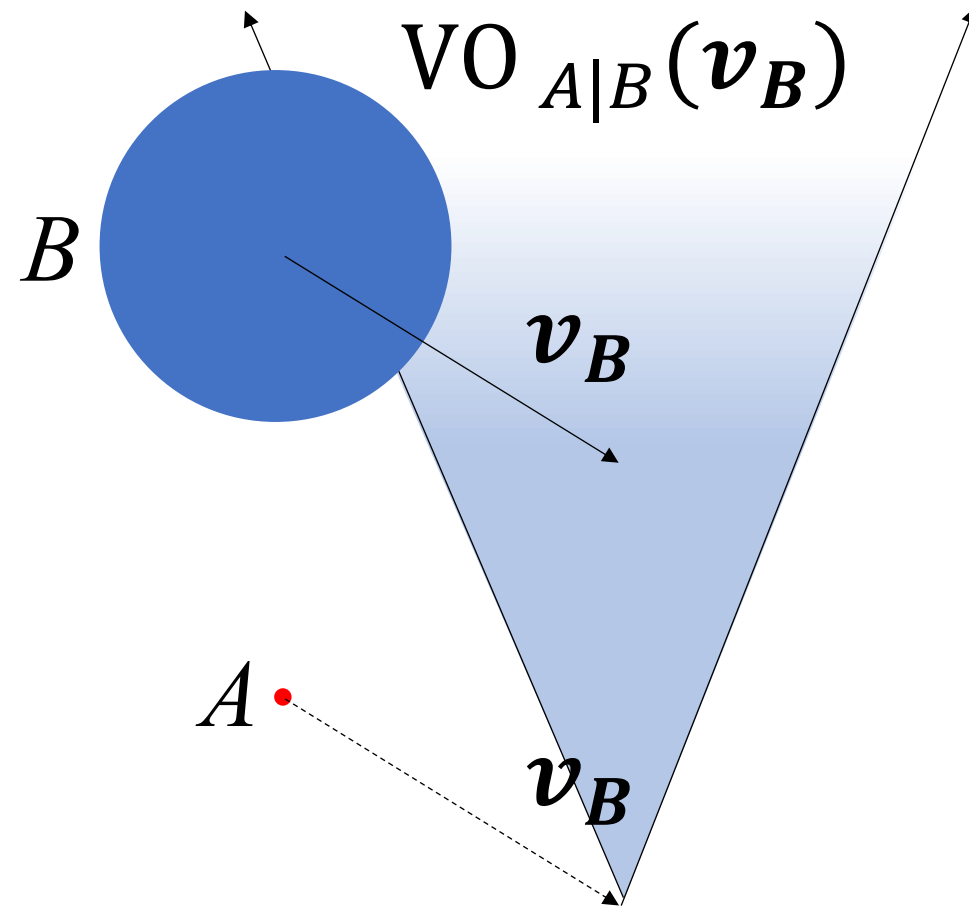


## 2. VO (Velocity Obstacle)

浙江大学 · 控制学院

针对**移动**障碍物的VO.

$VO_{A|B}(\mathbf{v}_B)$  定义为: A将与速度为 $\mathbf{v}_B$ 的B相撞的速度空间

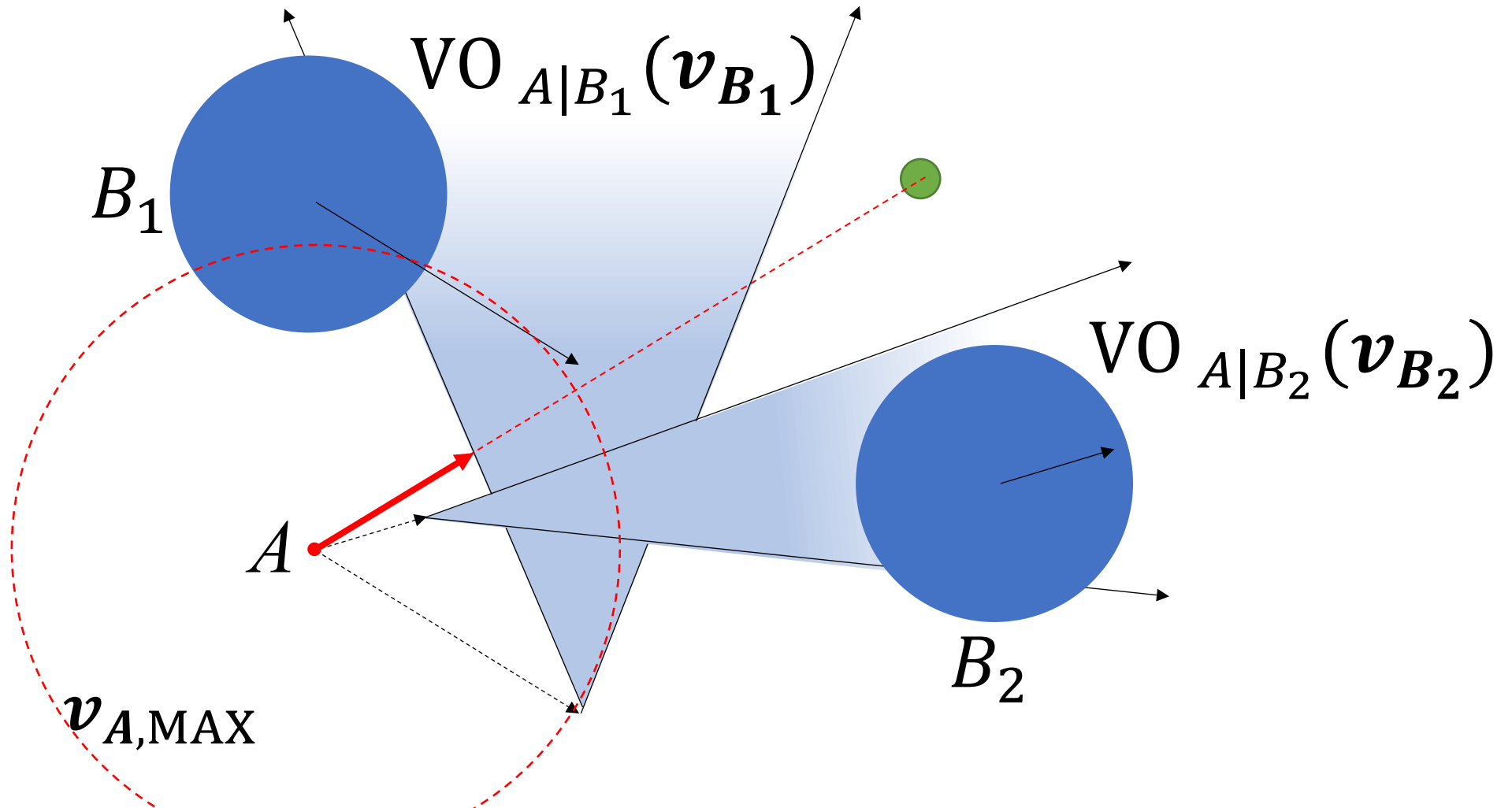




# 1.1 VO (Velocity Obstacle)

浙江大学 · 控制学院

针对多个移动障碍物的VO

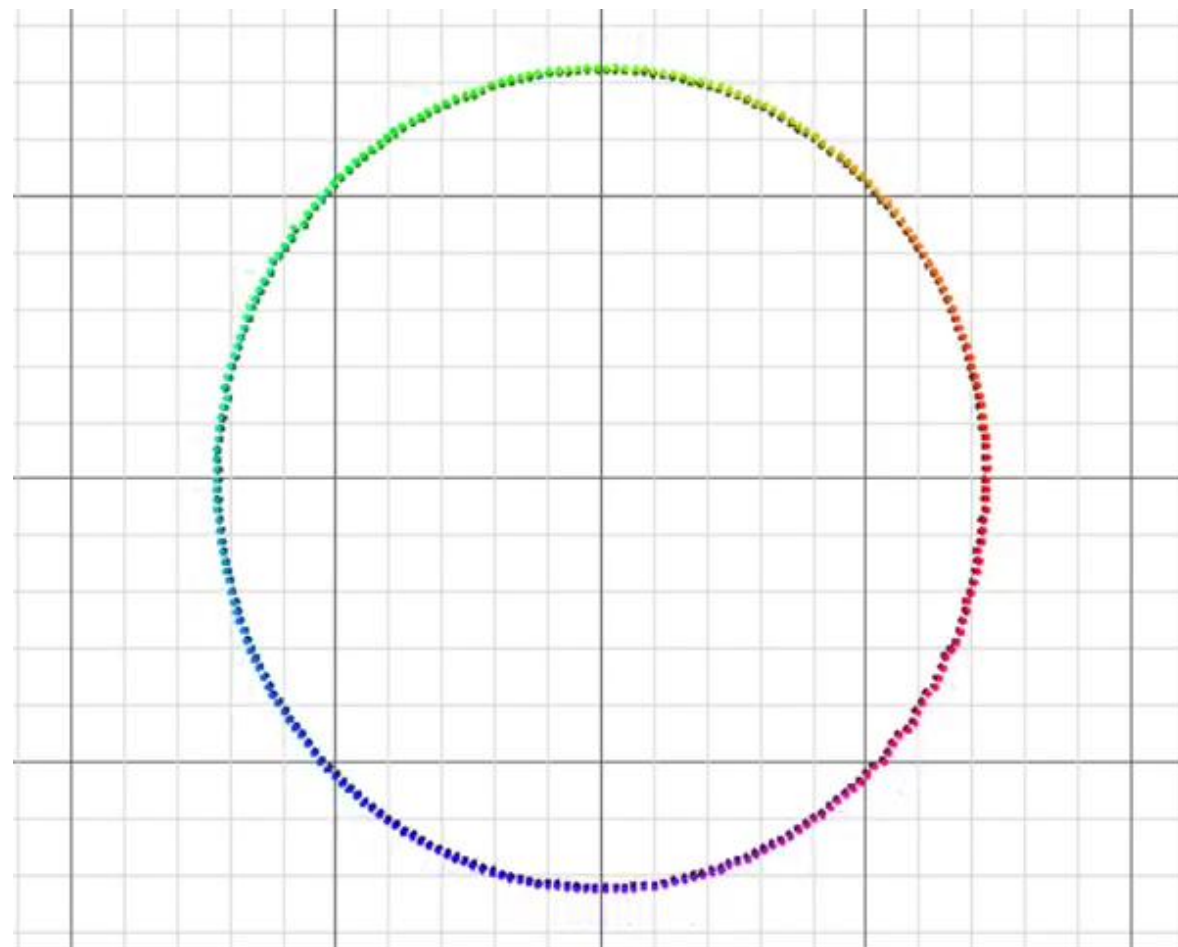
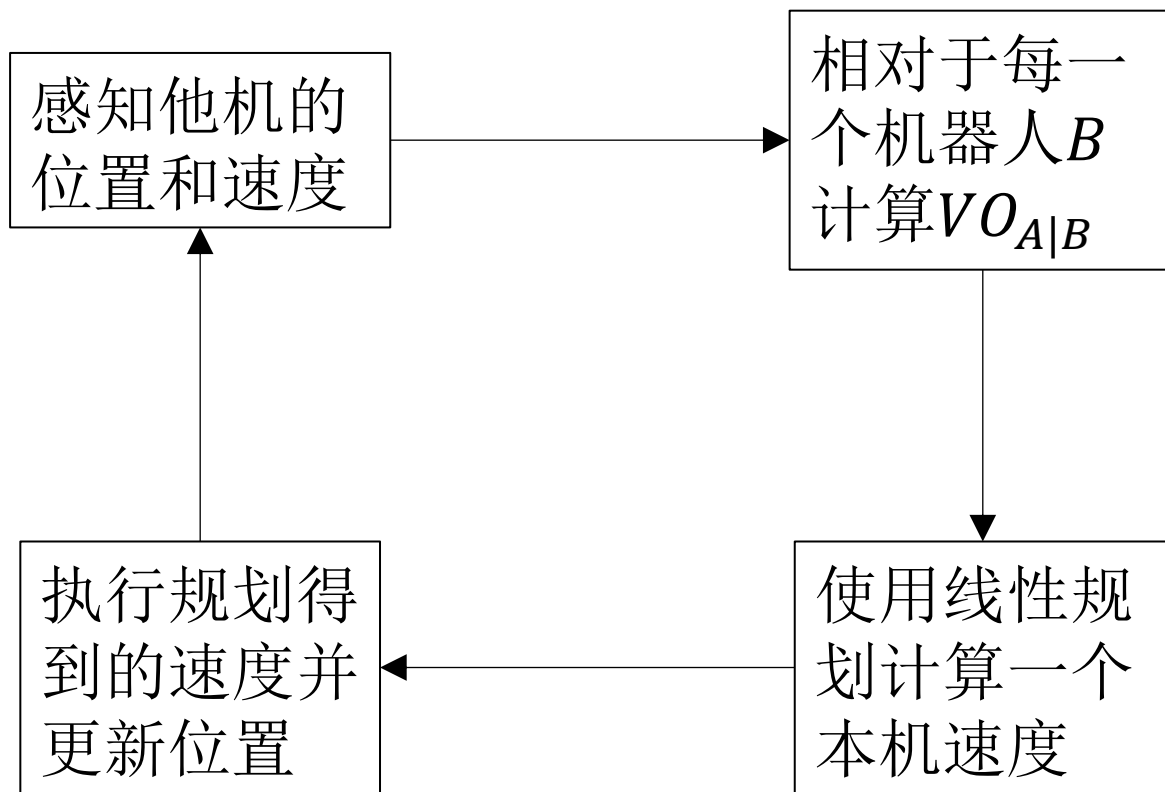




## 2. VO (Velocity Obstacle)

浙江大学 · 控制学院

循环以下过程实现持续避障

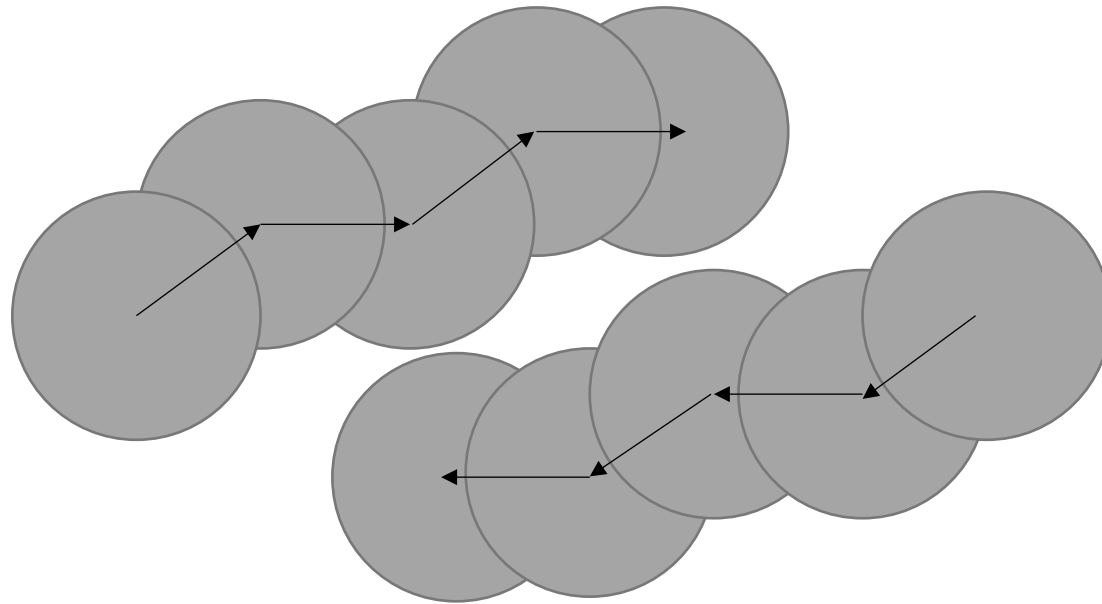




## 2. VO (Velocity Obstacle)

浙江大学 · 控制学院

### VO的振荡问题



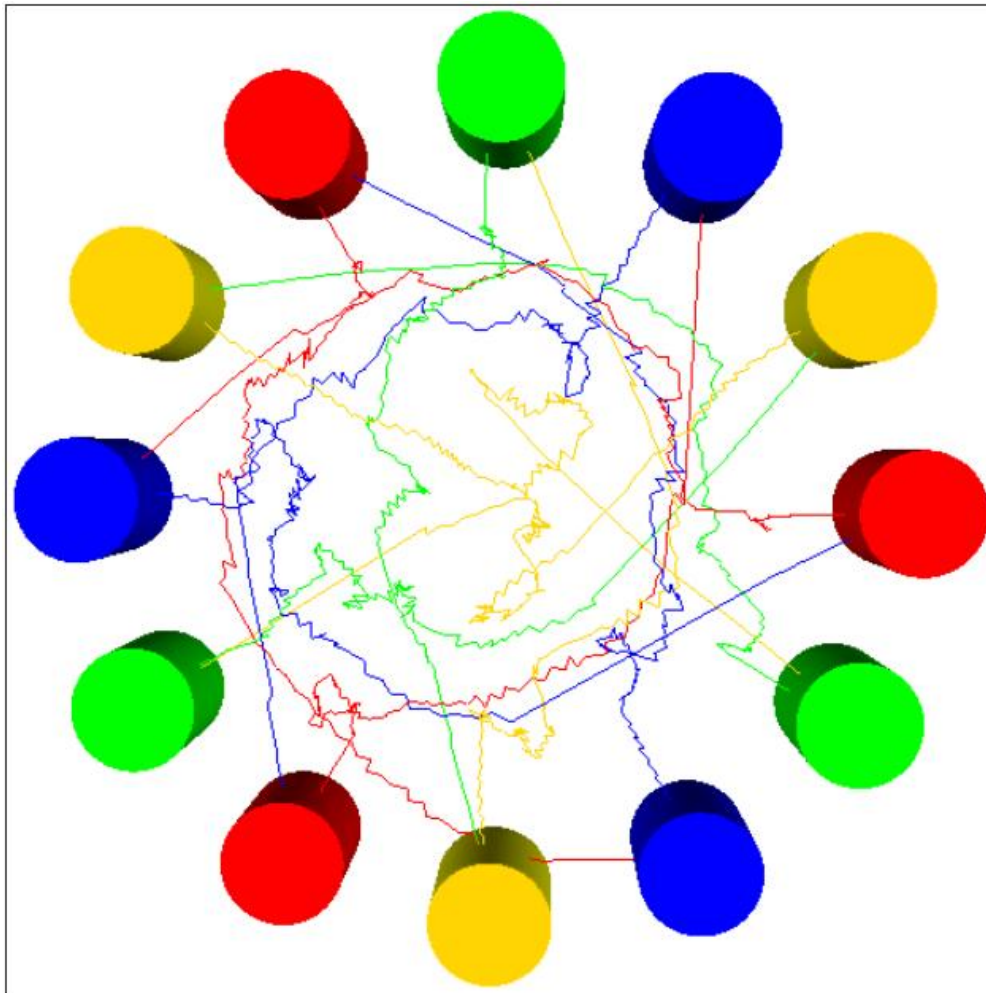
**根本原因：** 每个机器人只考虑其它机器人当前的速度，而不考虑其他机器人下一个控制周期的速度



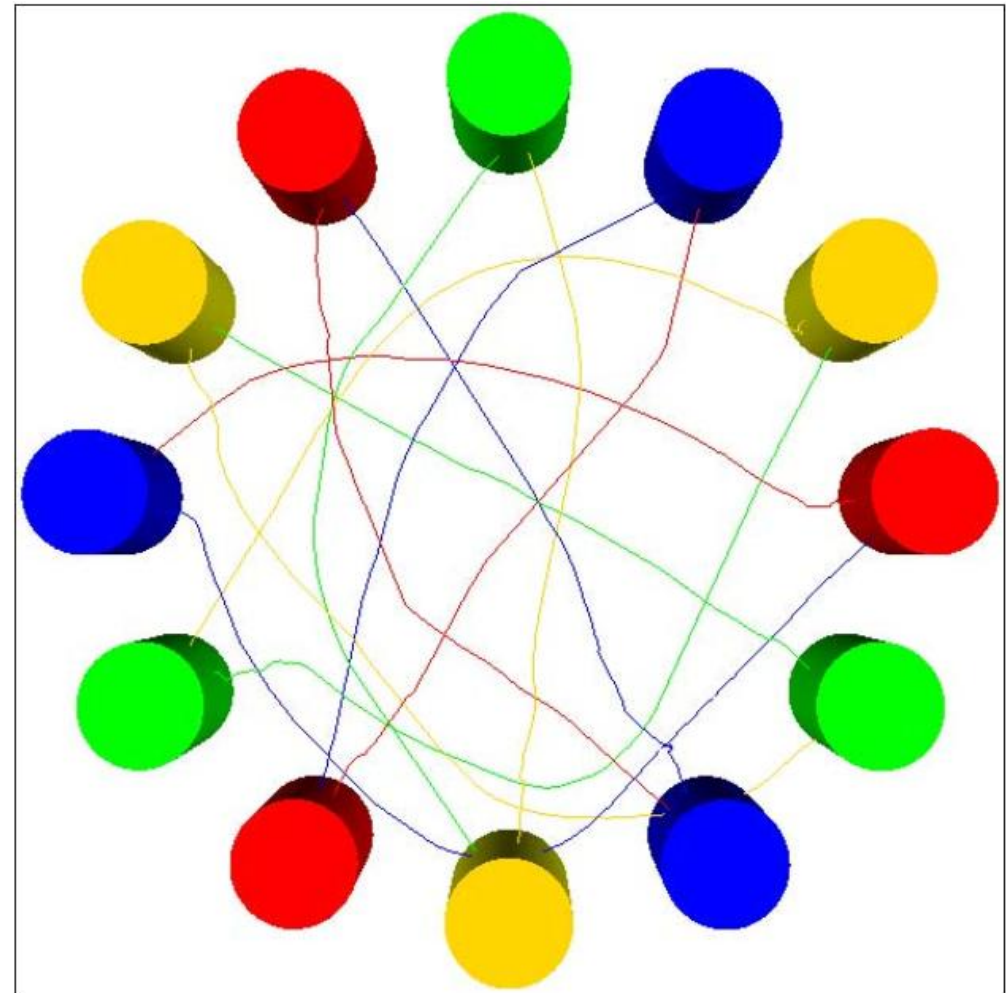
## 1.2 VO改进: RVO (Reciprocal Velocity Obstacle)

浙江大学·控制学院

VO振荡



RVO不振荡



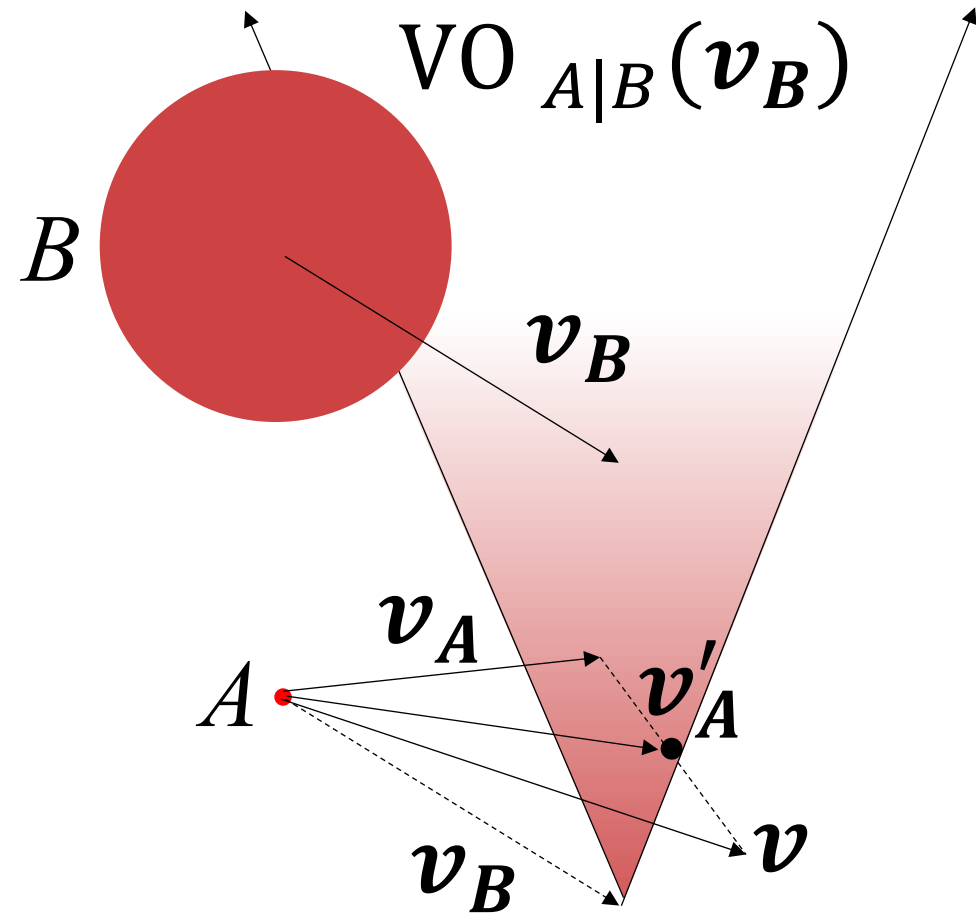


## 1.2 VO改进: RVO (Reciprocal Velocity Obstacle)

浙江大学·控制学院

### 基本思想:

假设所有个体都运行RVO, 选择速度  $\mathbf{v}'_A$ , 它是个体A的当前速度  $\mathbf{v}_A$  和VO区域外的一个安全速度  $\mathbf{v}$  的平均, 即所有个体都适当减小一些速度的改变量  $\|\mathbf{v}'_A - \mathbf{v}_A\|$ .



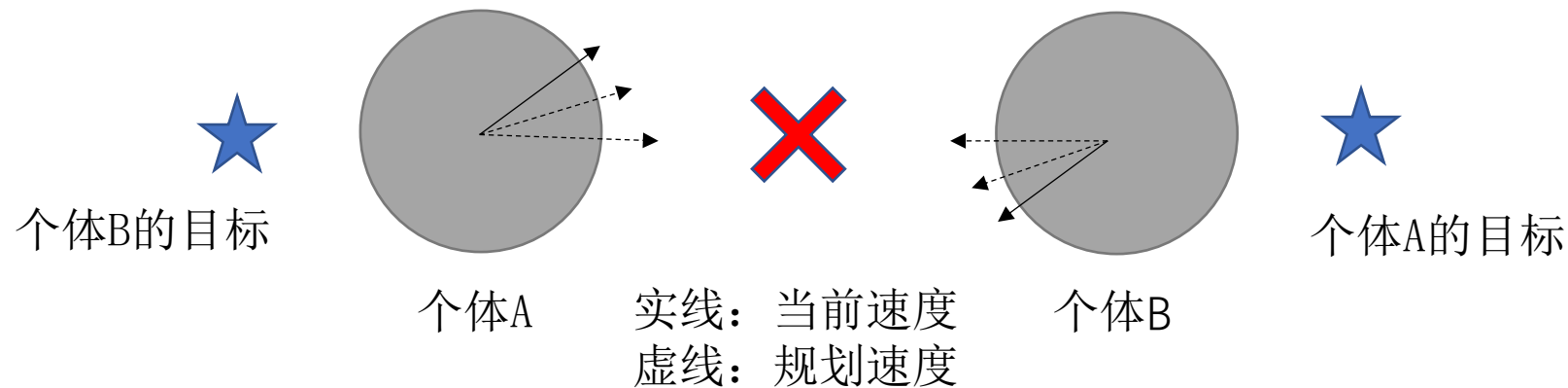


## 1.2 VO改进: RVO (Reciprocal Velocity Obstacle)

浙江大学·控制学院

### 基本思想:

假设所有个体都运行RVO, 选择速度  $\mathbf{v}'_A$ , 它是个体A的当前速度  $\mathbf{v}_A$  和VO区域外的一个安全速度  $\mathbf{v}$  的平均, 即所有个体都适当减小一些速度的改变量  $\|\mathbf{v}'_A - \mathbf{v}_A\|$ .

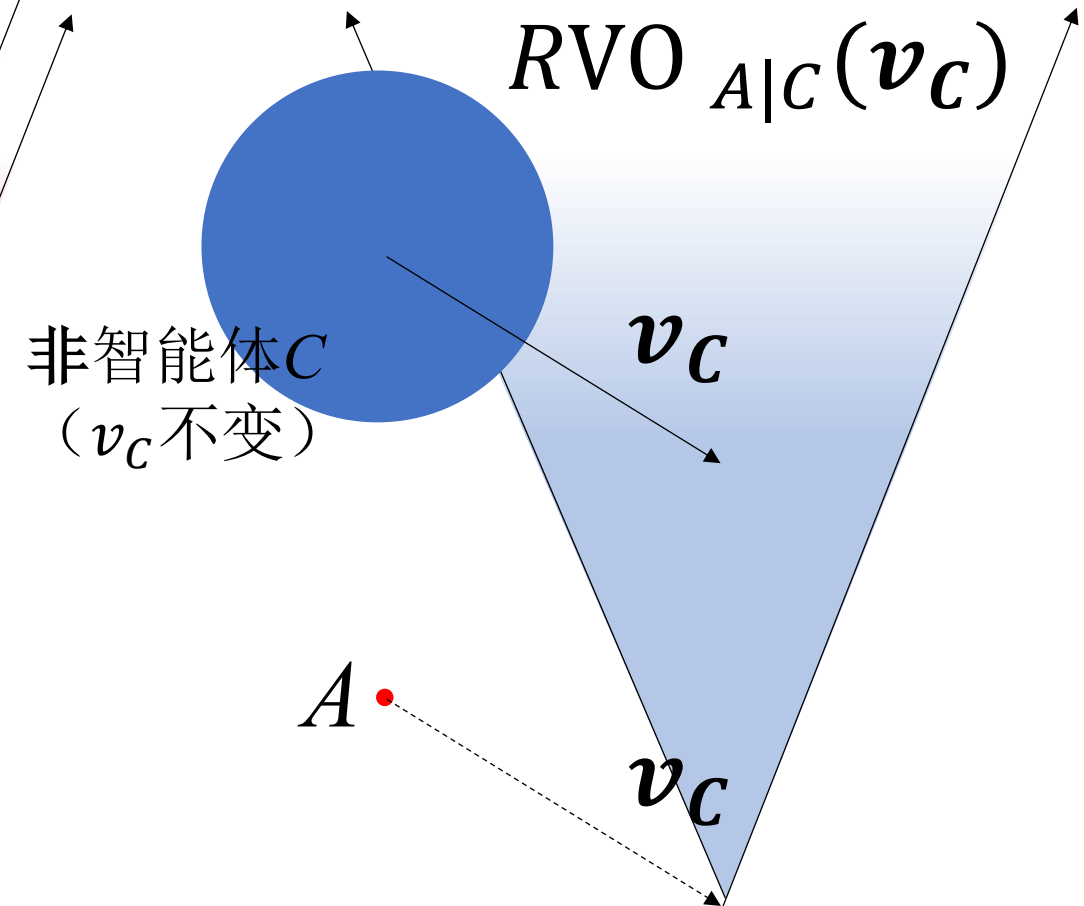
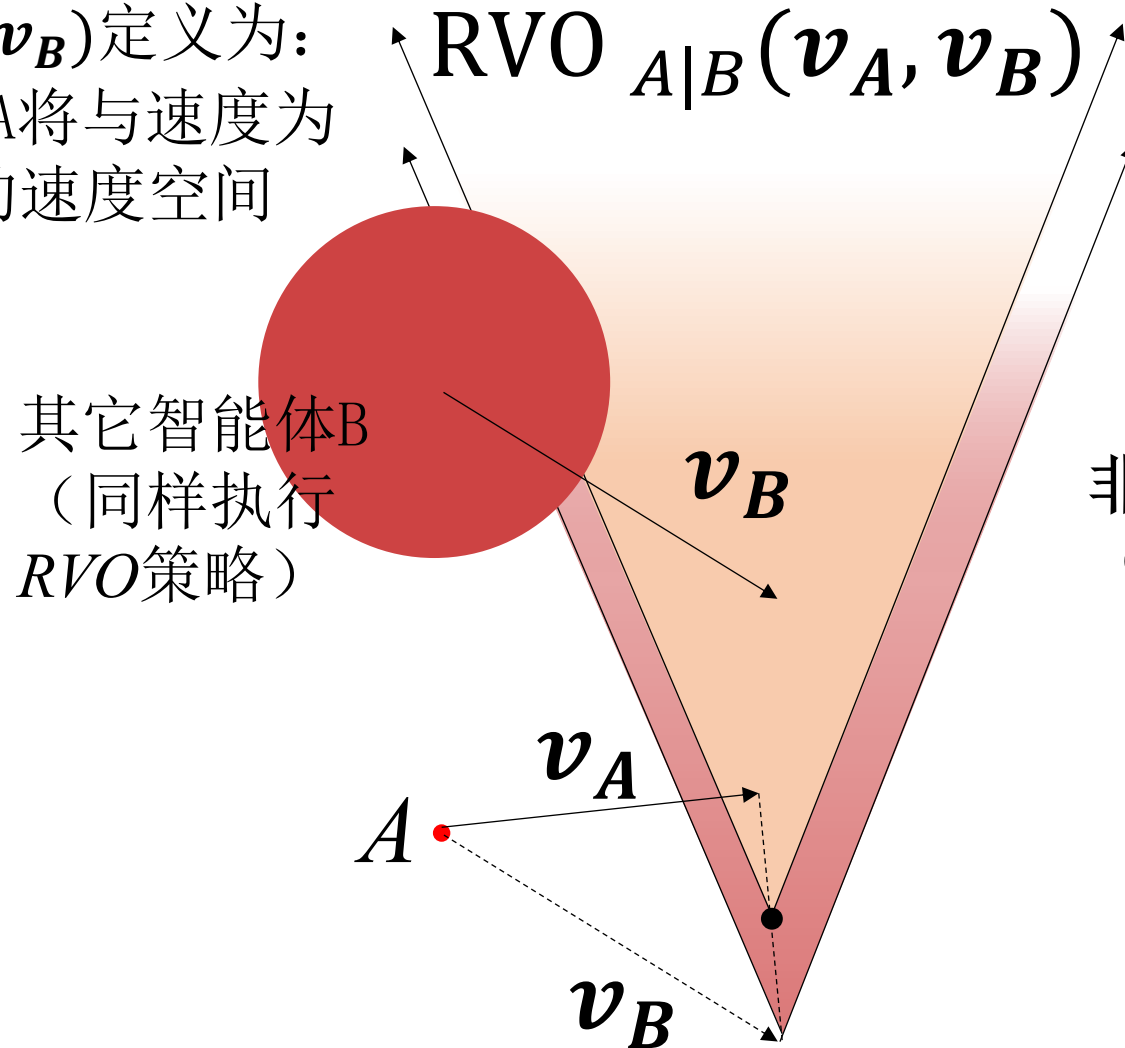




## 1.2 VO改进: RVO (Reciprocal Velocity Obstacle)

浙江大学 · 控制学院

$RVO_{A|B}(v_A, v_B)$  定义为:  
速度为  $v_A$  的A将与速度为  
 $v_B$  的B相撞的速度空间

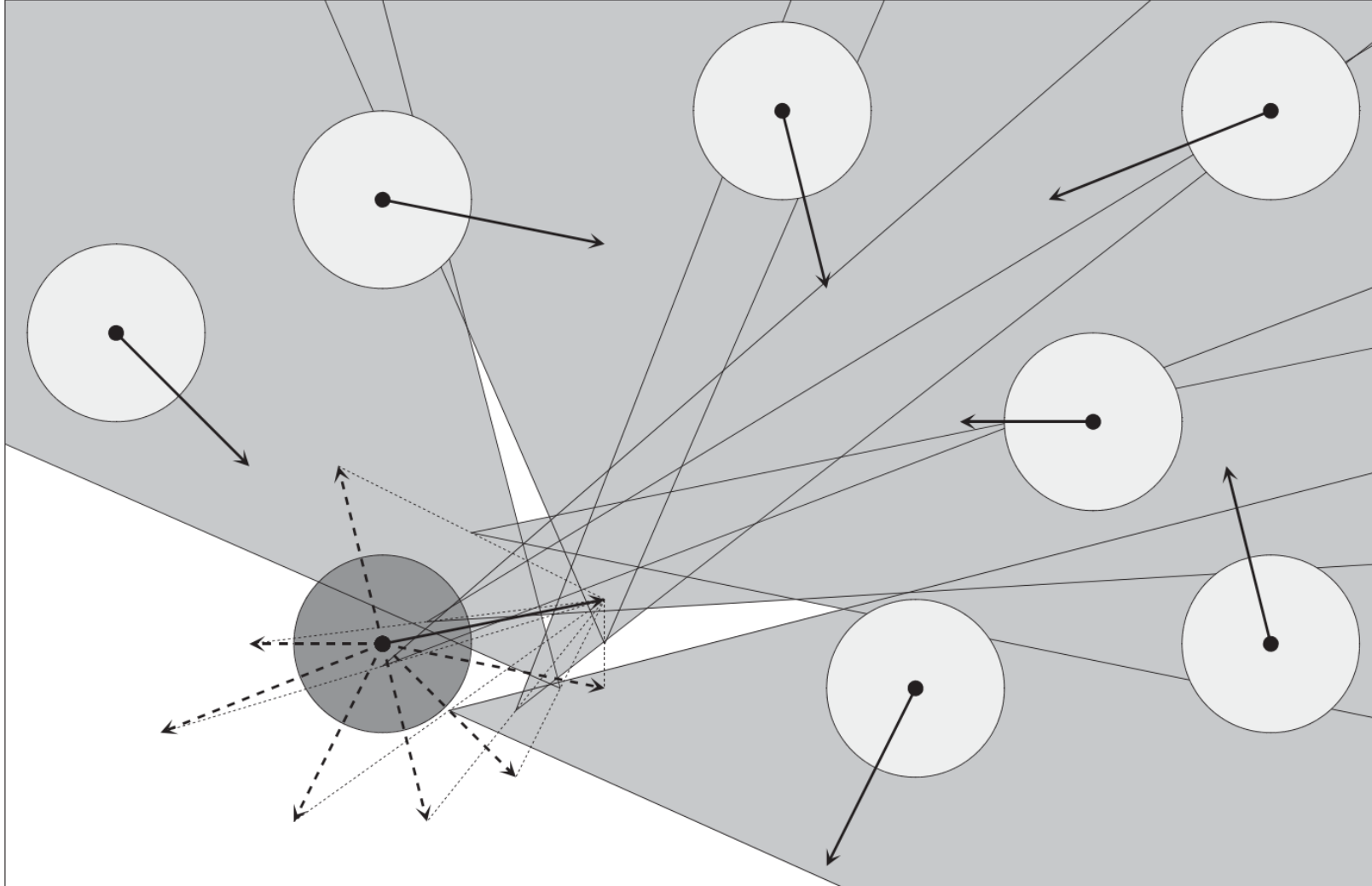




## 1.2 VO改进: RVO (Reciprocal Velocity Obstacle)

浙江大学 · 控制学院

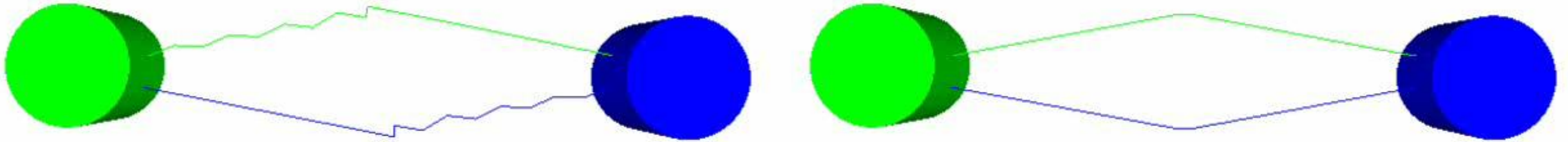
针对多个移动障碍物的RVO





## 1.2 VO改进: RVO (Reciprocal Velocity Obstacle)

浙江大学·控制学院





# 基于生物群落模型的集群算法 (Flocking models)

[1] Reynolds, Craig W. "Flocks, herds and schools: A distributed behavioral model." Proceedings of the 14th annual conference on Computer graphics and interactive techniques. 1987.

[2] Vásárhelyi, Gábor, et al. "Optimized flocking of autonomous drones in confined environments." *Science Robotics* 3.20 (2018): eaat3536.



### 3. 生物群落模型

**基本思想：**为实现像鸟群一样的一致飞行，每一个体的运动由三股力量（速度）决定：

- 短距离：与邻居、障碍物的排斥速度 $\mathbf{v}^{rep}$ ，越靠近斥力越大；
- 中距离：运动对齐速度 $\mathbf{v}^{frict}$ ，越偏离权重越大；
- 长距离：远方目标的引力 $\mathbf{v}^{flock}$ ，一定范围内维持未定；

执行速度为三类速度的矢量

$$\mathbf{v}^{exe} = \mathbf{v}^{rep} + \mathbf{v}^{frict} + \mathbf{v}^{flock}.$$

**应用难点：**参数繁多且对参数灵敏

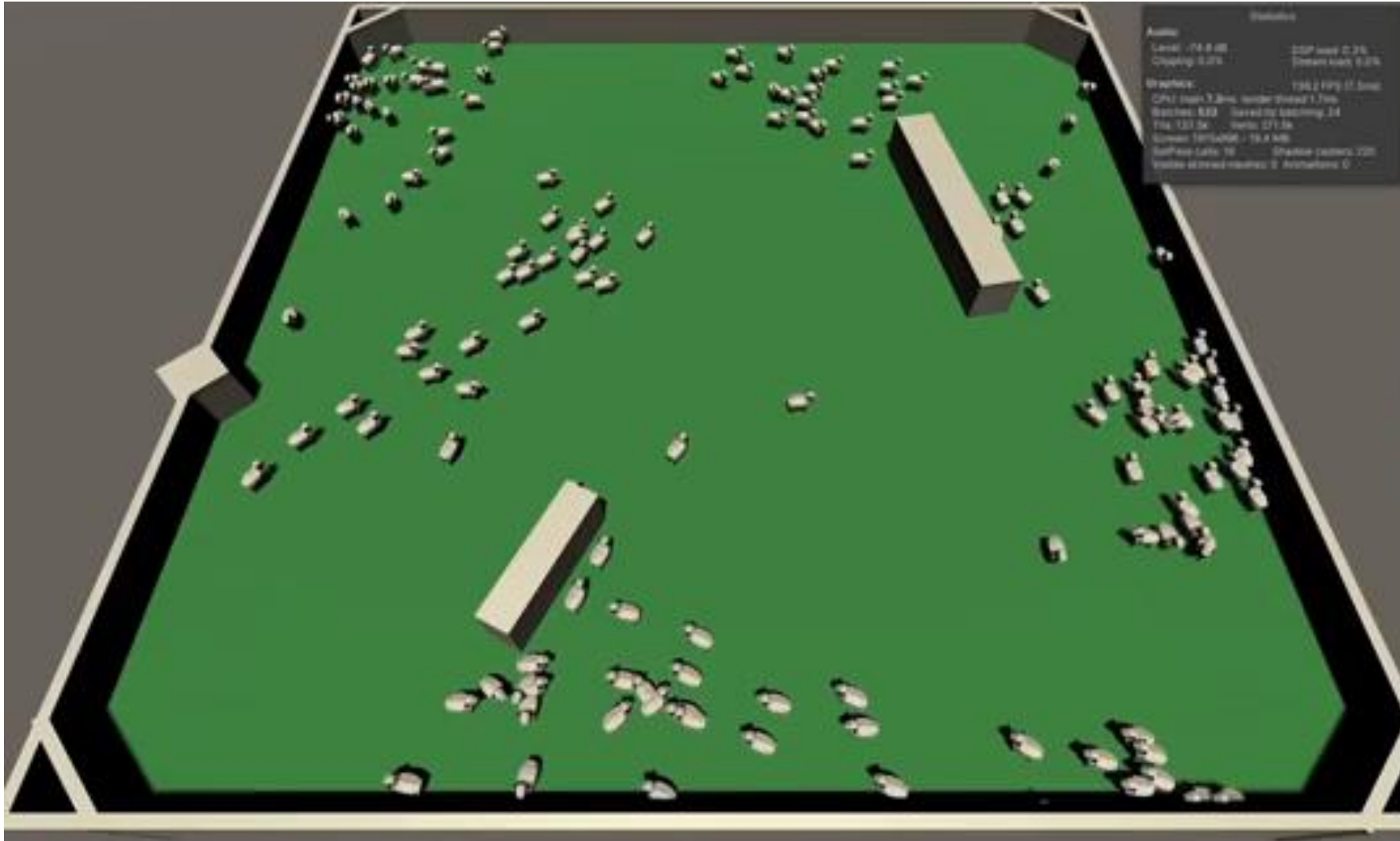
**解决办法：**进化算法调参<sup>[1]</sup>

[1] Vásárhelyi, Gábor, et al. "Optimized flocking of autonomous drones in confined environments." *Science Robotics* 3.20 (2018): eaat3536.



### 3. 生物群落模型

浙江大学·控制学院





### 3. 生物群落模型

浙江大学 · 控制学院

