

# 视线角约束下多旋翼无人机拦截控制

Line-of-Sight Constraint Multicopter Interception Control

---

/ 答辩人：杨坤 / / 指导老师：白成刚教授、全权教授 / / 专业：导航、制导与控制 /





01

背景

02

研究内容

03

应用转化

04

总结



# 1. 背景



关键词解释



# 视线角约束下多旋翼无人机拦截控制

Multicoper Interception Control subject to Line-of-Sight Constraint



- 被控对象：多旋翼无人机（Multicopter）
- 控制目标：拦截控制（Interception Control）
- 控制难点：视线角约束（Line-of-Sight Constraint）

# 背景一无人机拦截很重要

## 军事领域改变战争形态

俄乌战场无人机战果



单兵无人机装备设想



- 近期俄乌、巴以冲突在实战中启示：无人机深刻影响作战方式，用于**侦察和炮火校正，投掷杀伤性武器，反坦克反步兵**，已普及到班排一级。目前**难以反制，成本低廉**
- 《新时代的中国国防》白皮书提出，按照空天一体、**攻防兼备**的战略要求，加快实现国土防空型向**攻防兼备型**转变。提出**反制需求**的同时兼备**作战需求**

# 背景一无人机拦截很重要

## 民用领域亟需无人机探测与反制

无人机危害公共安全



无人机袭击克里姆林宫



- “**黑飞**”危害航空、石油、电力等领域，影响公共安全甚至是国家安全，**反制无人机已刻不容缓**
- 国家反恐办出台行业标准，《北京市促进低空经济产业高质量发展行动方案》强调大力开展低空安防
- **反无人机市场**也迎来了巨大的发展机遇，2024年全球反无人机市场规模达到**约合144亿元**

# 背景一无人机怎么拦截?

## ■ 无人机自主拦截是一个必要补充

无人机防御手段



无人机日益灵活自主



- 现有地面无人机防御系统不够灵活，难以应对具有高机动能力的入侵无人机的威胁。**应用无人机进行自主拦截**是一个解决方案
- 应用无人机自主拦截，是现有无人机反制技术的一个**空中视角补充**

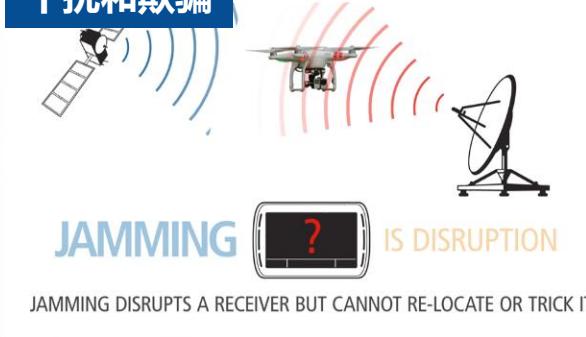
# 背景一无人机怎么拦截?

## ■ 无人机反制技术研究现状

类别	方法	优点	缺点
软杀伤	劫持	夺取控制权，可以安全降落	仅适用于已知协议的无人机
	电子欺骗	广泛可用	难以控制
	射频干扰	简单及时，对未知协议有效	高功率，会影响附近设施
	捕获	包括地面和空中的解决方案	难以瞄准和命中目标
硬杀伤	激光	远距离，实验中成功	维护和运行成本高，一般不适合非军事目标
	防空武器	远距离，销毁	维护和运行成本高，一般不适合非军事目标
	无人机拦截	维护和运行成本低，可能同时响应多目标	难以瞄准和命中目标



### 干扰和欺骗



### 捕获



### 防空武器打气球



1. 可结合软杀伤方法抵近实施； 2. 价格低； 3. 最后一道防线

# 背景—捷联单目无人机方案很可行

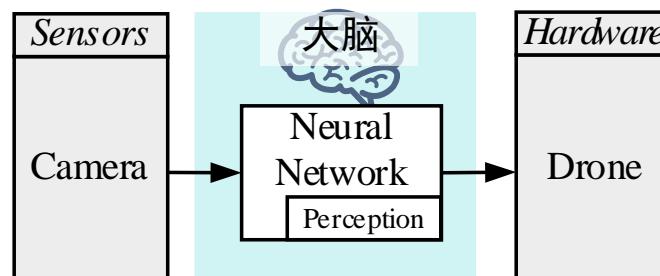
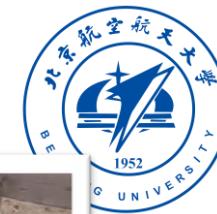
## 多旋翼无人机自主拦截/无人机竞速研究现状

类别	方法	目标速度	拦截器速度	Pipeline
基于位置估计的方法	经典的感知-规划-控制流程	0m/s; 7m/s	2-3m/s; 几乎没有运动	<pre> graph LR     Sensors[<b>Sensors</b> Depth Camera/ Lidar, GPS, IMU] --&gt; Software[<b>Software</b> Perception Filter --&gt; Planning or Interception Point --&gt; Control]     Control --&gt; Hardware[<b>Hardware</b> Drone with Net]   </pre>
	最优终端速度控制指导	10m/s	10m/s	<pre> graph LR     Sensors[<b>Sensors</b> Camera with Pod, GPS, IMU] --&gt; Software[<b>Software</b> Perception Filter --&gt; Guidance &amp; Control]     Guidance &amp; Control --&gt; Hardware[<b>Hardware</b> Drone]   </pre>
基于学习的方法	模仿学习和底层控制	仿真慢速运动；实飞目标静止	4-12m/s 1-3m/s	<pre> graph LR     Sensors[<b>Sensors</b> Camera] --&gt; Software[<b>Software</b> Neural Network --&gt; Trajectory --&gt; Control]     Control --&gt; Hardware[<b>Hardware</b> Drone]   </pre>
基于图像视觉伺服的方法	伪线性卡尔曼滤波和3-D螺旋制导	5m/s	螺旋跟踪	<pre> graph LR     Sensors[<b>Sensors</b> Camera, IMU] --&gt; Software[<b>Software</b> Perception Filter --&gt; Guidance &amp; Control]     Guidance &amp; Control --&gt; Hardware[<b>Hardware</b> Drone]   </pre>



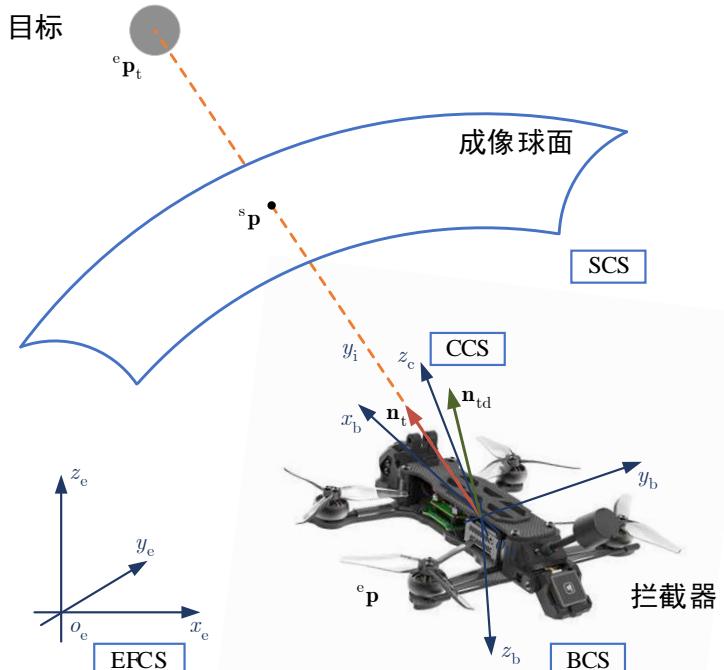
优势与挑战：1. 精度高；2. 价格低；3. 小型化

# 背景一捷联单目无人机方案很可行



人类飞手能够很好的克服三个挑战  
输入：图像  
输出：摇杆控制指令

# 背景一自主拦截无人机有挑战

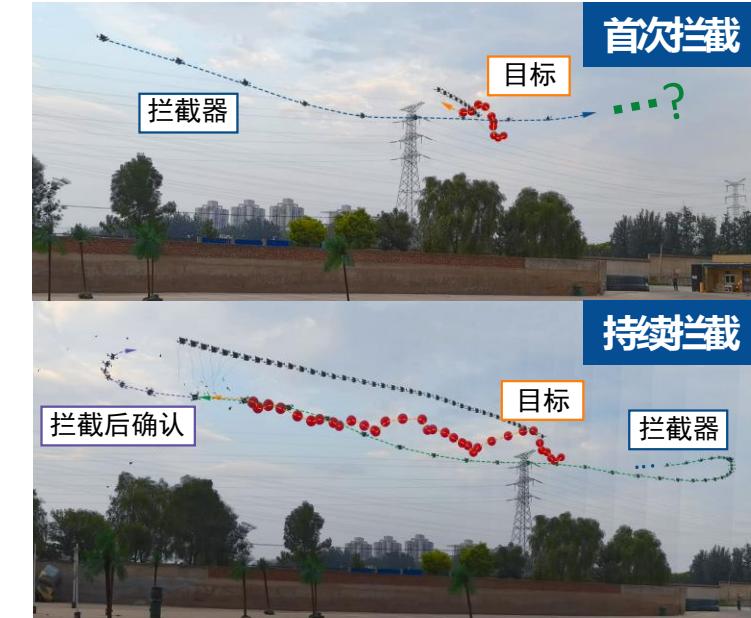


## 难点1：如何设计拦截器构型？

给定无人机是否适合拦截任务?  
如何设计**最佳的拦截器构型**，  
满足视线角约束时最快拦截目标？

## 难点2：相机运动与多旋翼运动耦合

多旋翼—相机作为一个**欠驱动系统**，多旋翼运动将导致相机运动，不可任意配置全部状态



## 难点3：如何持续拦截目标

单目摄像头无法直接获得机目标相对位置。如何在**观测目标和丢失目标时**都能持续拦截？

# 背景一单机向集群能力扩展



## 智能无人蜂群

国防军事

在成群飞行时

战场新势力——无人机  
3

## DARPA OFFSET 定期进展

DARPA's OFFensive Swarm-Enabled Tactics (OFFSET) program conducted its final Field Experiment (FX-6) in November 2021 at the Cassidy Combined Arms Collective Training Facility (CACTF), located at Fort Campbell, Tennessee.

- 集群将无人机的能力边界放大，**成本低廉、饱和攻击、自组织、抗损伤**
- **难点4：**如何有效的组织一群无人机，观察周围环境并且做出各自决策，无中心自组织，与规模无关

# 背景—基于单目视觉的多旋翼拦截控制科学问题



## 难点

1. 如何设计拦截器构型
2. 相机运动与多旋翼运动耦合
3. 如何持续拦截目标
4. 如何有效的组织一群无人机

## 科学问题

1. 可拦截的极限是什么？
2. 如何逼近理论拦截极限？
3. 目标丢失如何持续拦截？
4. 多目标如何拦截？

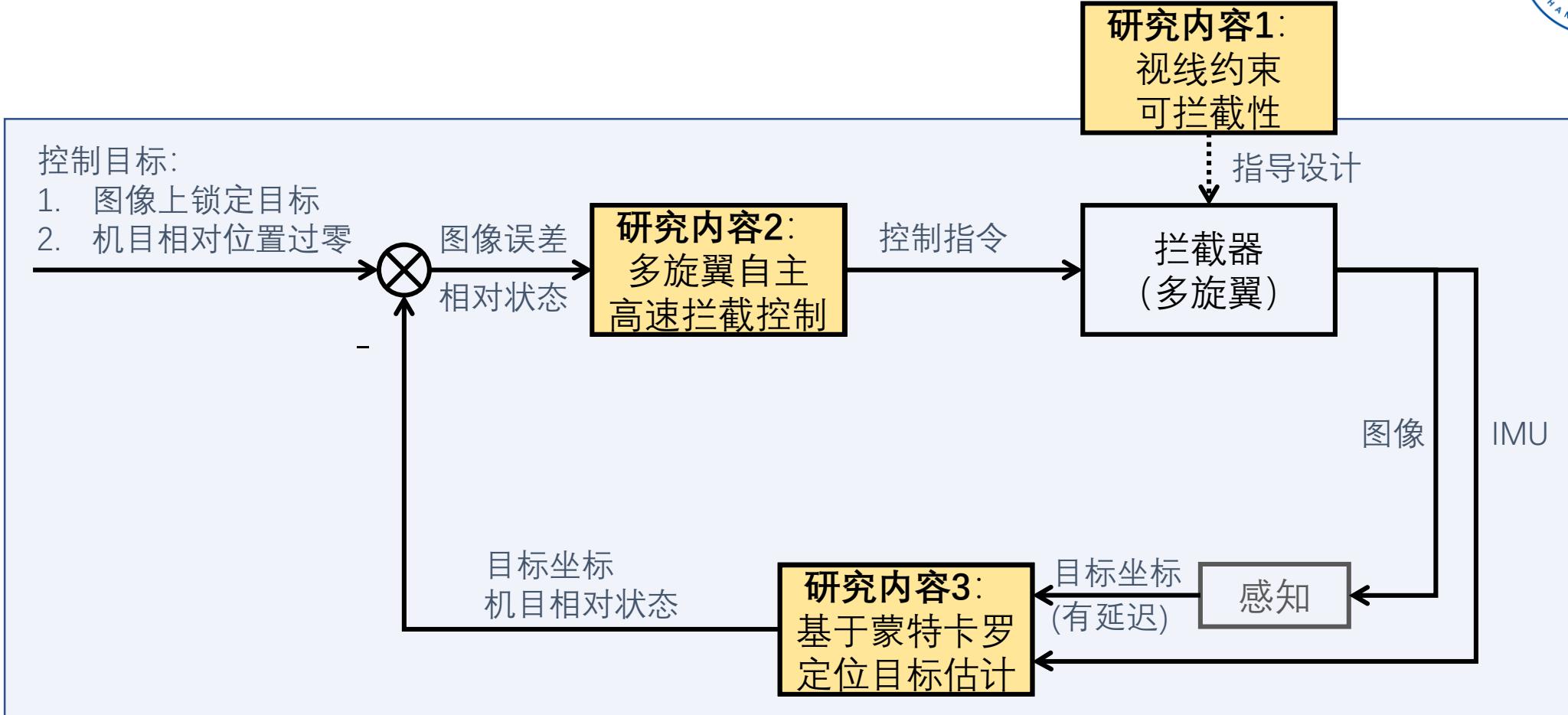
## 研究内容

1. 视线约束下可拦截性研究
2. 多旋翼自主高速拦截控制
3. 基于蒙特卡洛定位的目标估计
4. 集群多视角目标估计和基于图博弈的任务分配

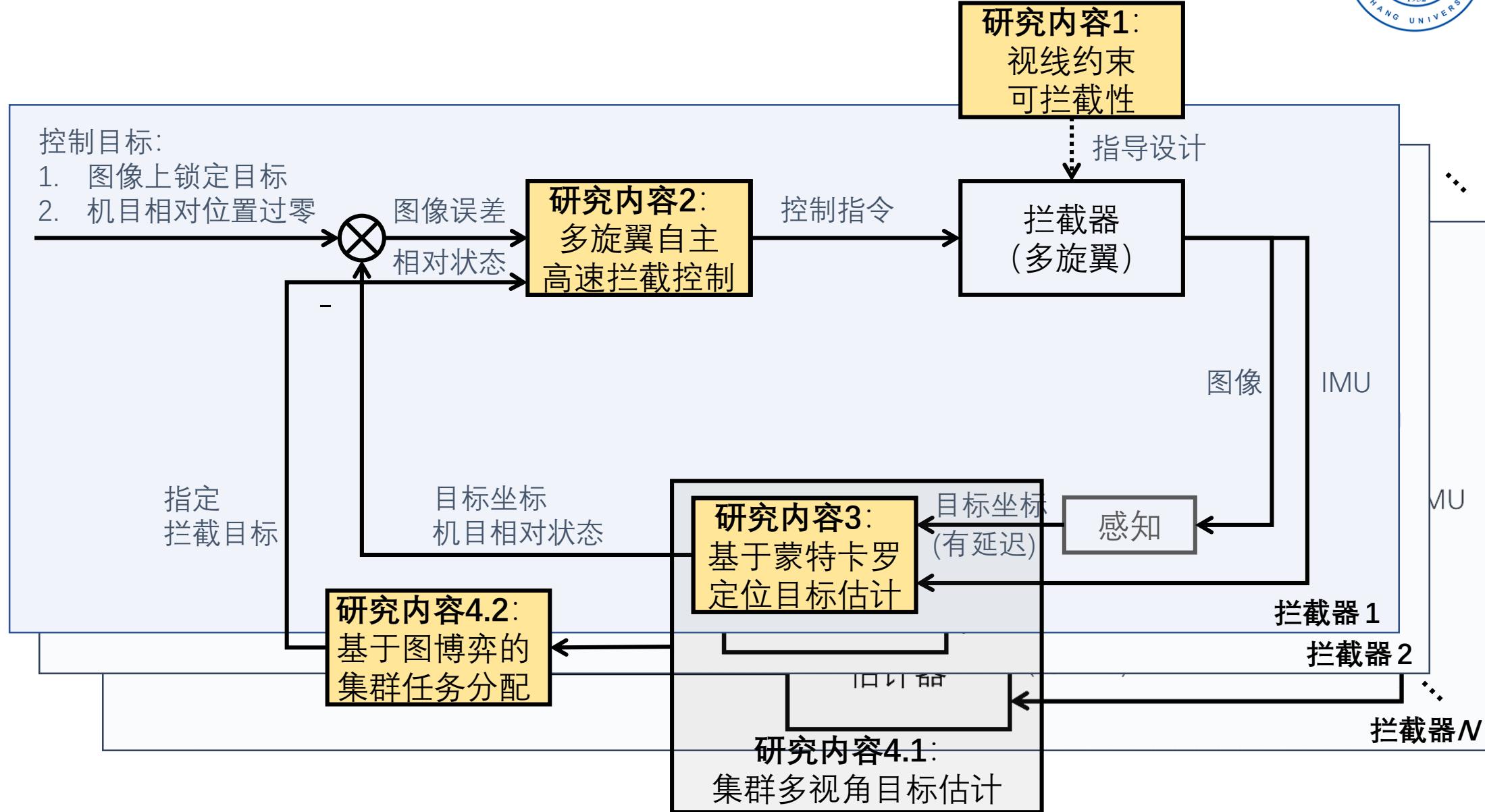


## 2. 建模和可拦截性

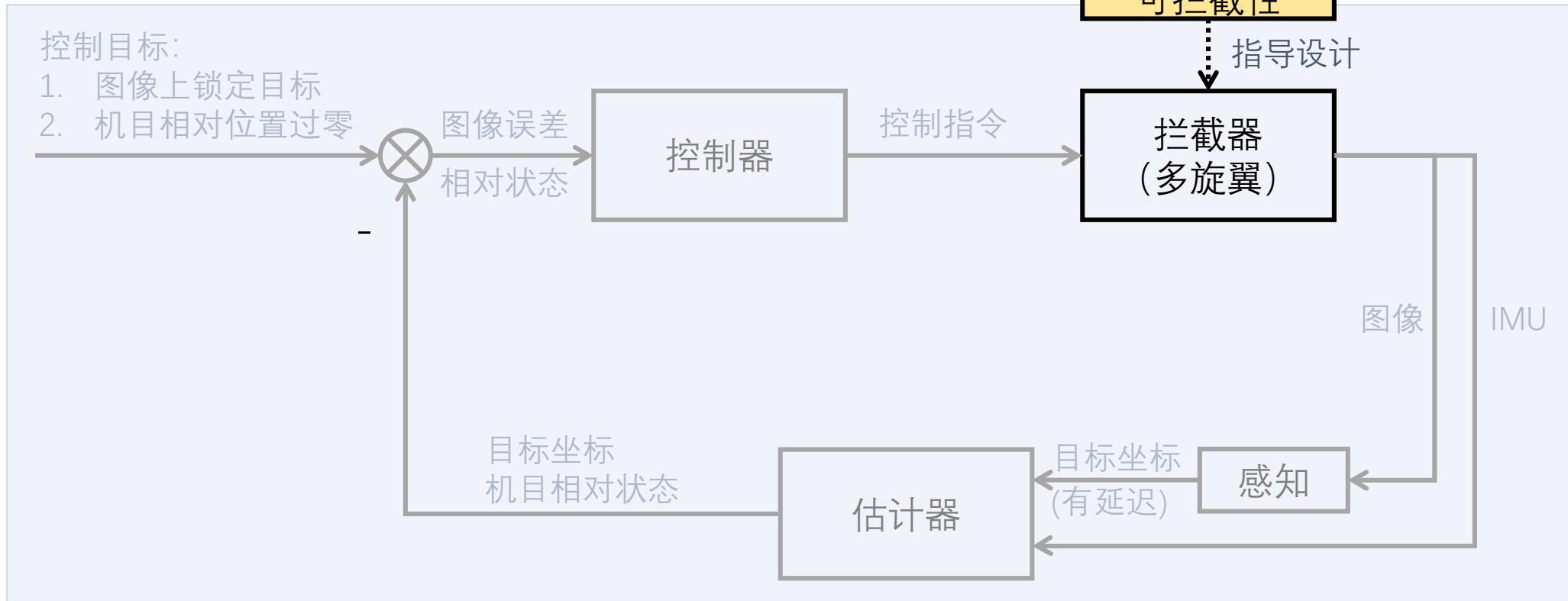
# 研究内容——总述



## 研究内容——总述



# 研究内容——1. 视线约束下可拦截性研究



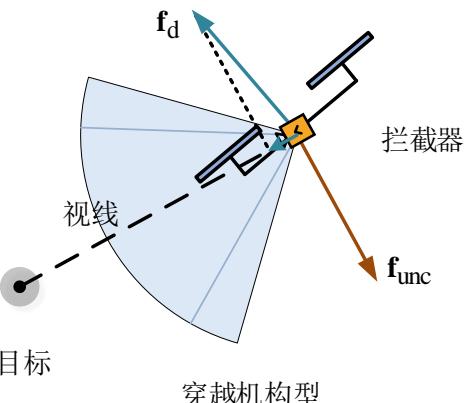
可拦截的极限是什么?

# 研究内容——1. 视线约束下可拦截性研究

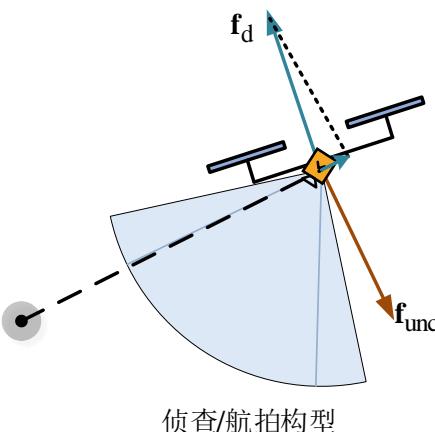
## 视线约束下的可拦截性理论

对于一类视觉传感器捷联的拦截系统，

1. 什么样的动力配置能够完成拦截任务？
2. 进一步地，如何评价拦截能力并指导拦截器设计？
3. 有限时间可拦截



(a) 可拦截。合力在视线上分量为正



(b) 不可拦截。合力在视线上分量为负



# 研究内容——1.1 视线约束下的可拦截与可拦截度定义



- 全局视线约束可拦截**: 对任意的初始状态  ${}^t\mathbf{p}(t_0), {}^t\mathbf{v}(t_0)$ , 存在有限时间  $t_f > t_0$  和控制量  $\mathbf{u}(t), t \in [t_0, t_f]$  使得状态  ${}^t\mathbf{p}(t_f) = 0$ , 同时视线约束成立。

- 可拦截度** (Degree of Interceptability, DOI)  
评价系统拦截能力

$$I = \min_{e\mathbf{a}_t} \max_{n_{td}, {}^t\mathbf{f}_d} \frac{\mathbf{n}_{td}^T {}^t\mathbf{f}_{net}}{\tau_{t,\max} mg},$$

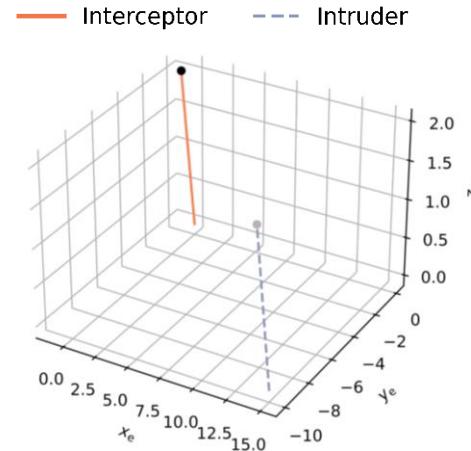
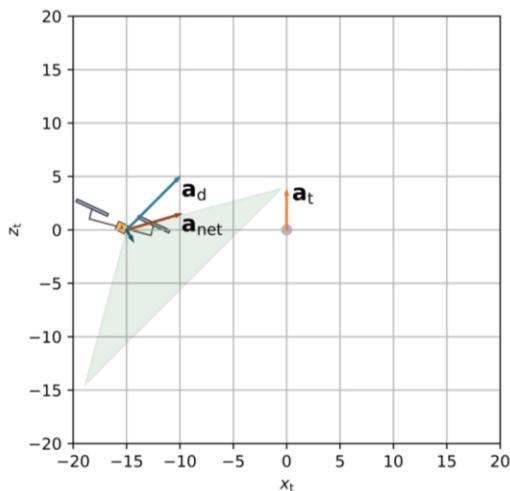
$$\text{s.t. } \Omega(0, \varepsilon) \subseteq \frac{1}{m} \mathbf{e}_3^T {}^t\mathbf{f}_{net},$$

$$\mathbf{n}_{td} \in \mathcal{C},$$

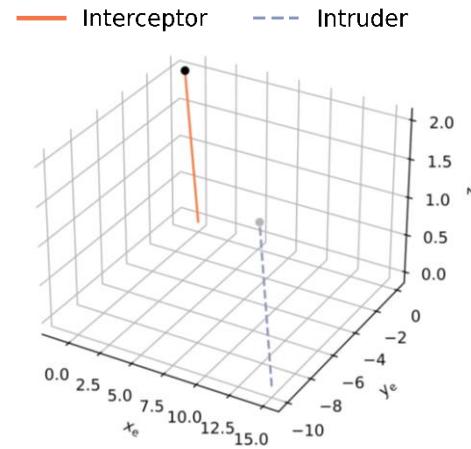
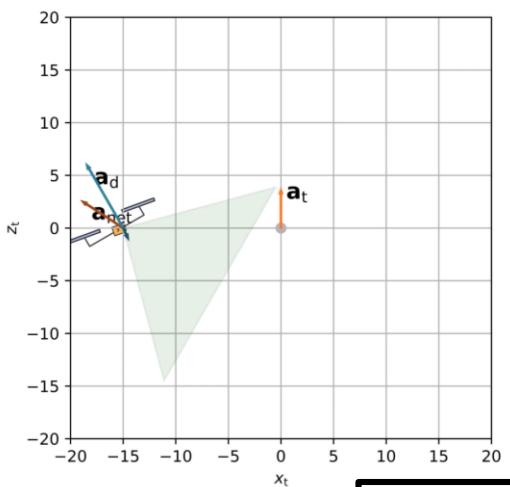
$$\|{}^t\mathbf{f}_d\| \leq f_m, \mathbf{R}_f \in \Omega_R,$$

$$\|e\mathbf{a}_t\| \leq \tau_{t,\max} g, \mathbf{n}_{td}^T e\mathbf{a}_t \leq 0$$

**定理 1.** 当且仅当  $I > 0$ , 拦截系统是全局视线约束可拦截的。



成功,  $I = 0.71 > 0$



失败,  $I = -0.50 \leq 0$

# 研究内容——1.1 多旋翼拦截器设计准则



拆哪都行 bilibili

$$I = \frac{\|\mathbf{f}_{unc}\| (\cos \mu^* + \sin \mu^* \cot \lambda_d)}{\tau_{t,\max} mg}.$$

**可拦截,  $I > 0$**

**建议:**

- 推力具有前向分量;  $\beta$  越大越有利于拦截任务;
- 设计的视线向量相对于光轴尽可能向上,  $\gamma > 0$
- 相机有向上的安装角,  $\delta_c < 0$ 。

**最大可拦截度**

当  $\lambda_d = \lambda_{\min}$  时, 可拦截度达到最大。此时推力与光轴方向一致。

**不可拦截,  $I \leq 0$**

**原因:**

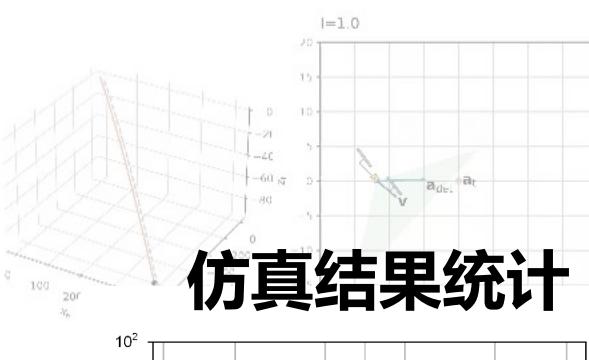
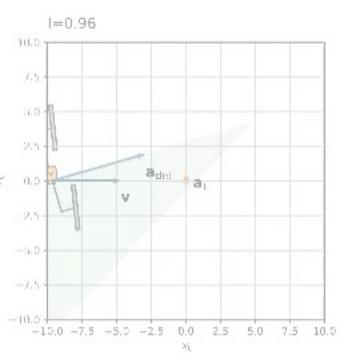
- 拦截器的加速度小于目标的逃逸加速度;
- 多旋翼不合理的配置导致推力在视线向量上的投影为负,  $\lambda_d \geq \frac{\pi}{2}$  且  $(\cos \mu^* + \sin \mu^* \cot \lambda_d) \leq 0$ 。



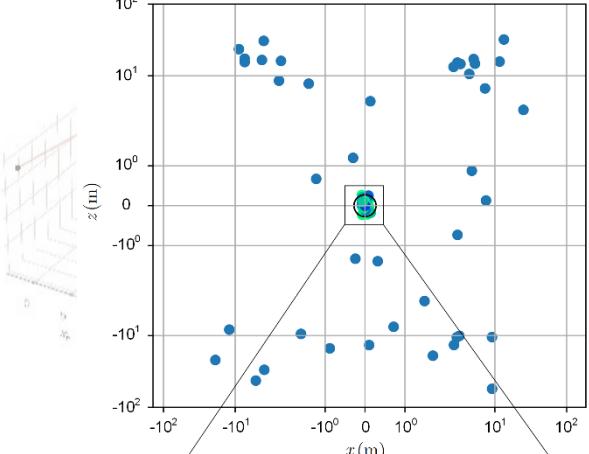
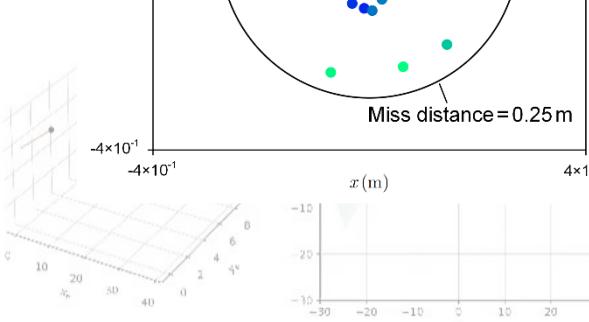
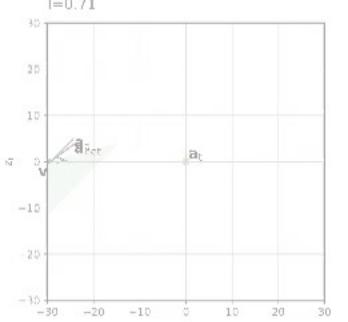
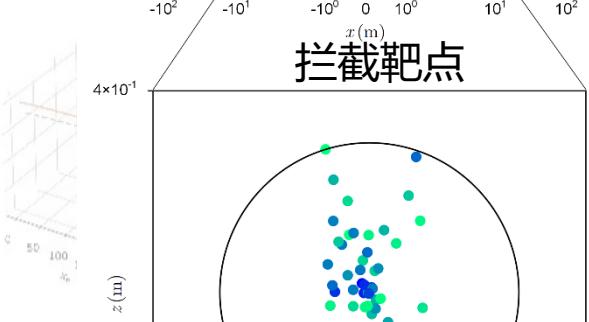
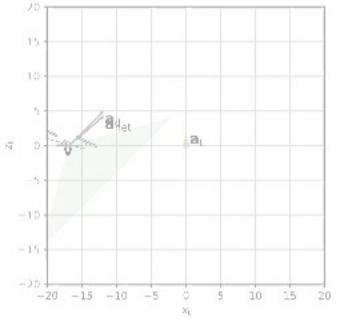
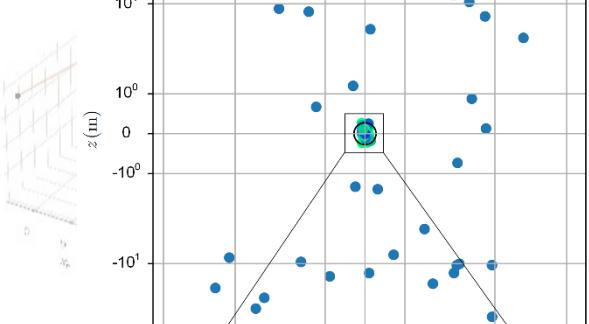
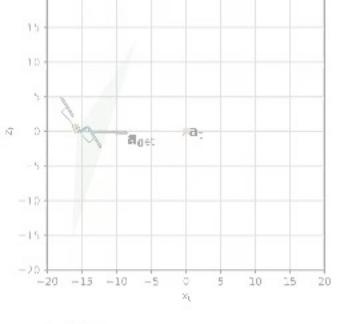
Camera install angle: 0°



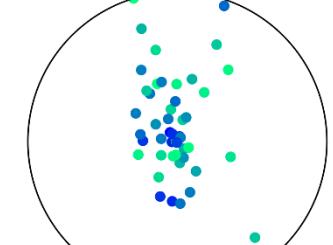
FPV



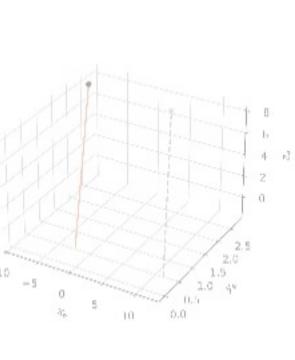
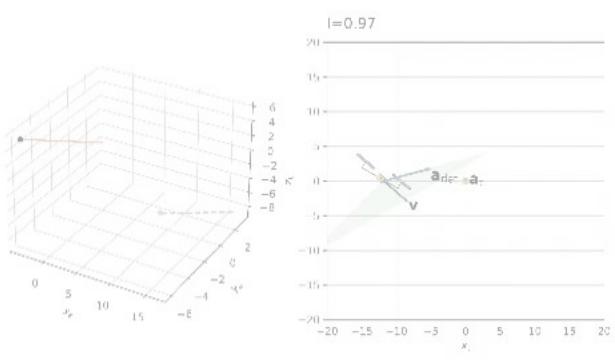
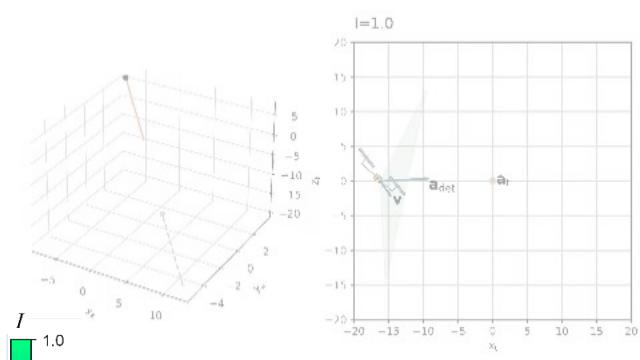
## 仿真结果统计



拦截靶点

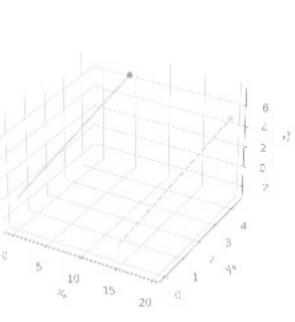
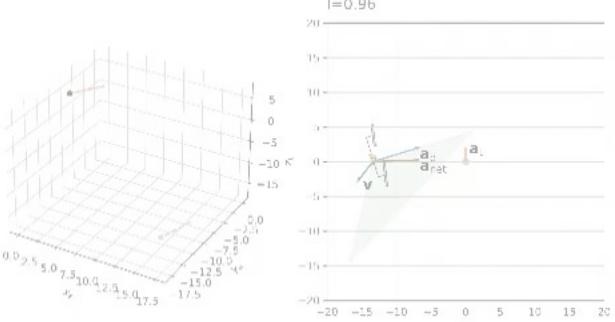
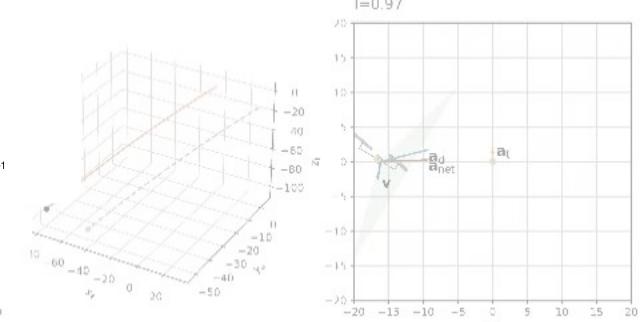
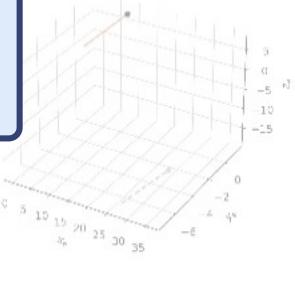
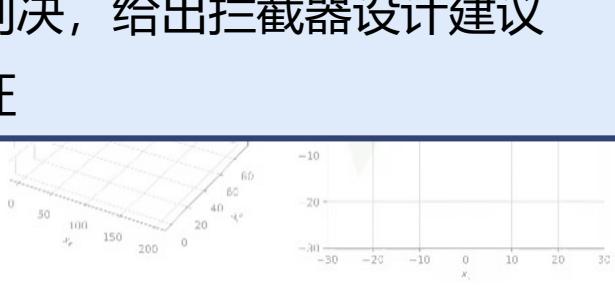
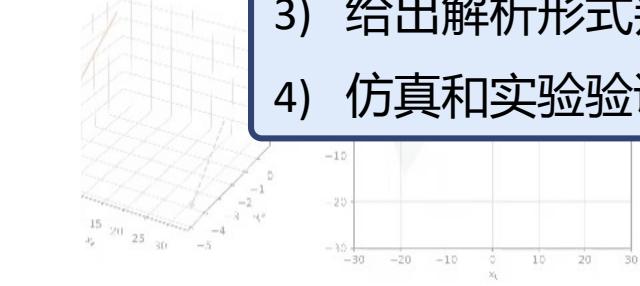


Miss distance = 0.25 m



## 小结

- 1) 定义视线约束全局可拦截性和可拦截度
- 2) 系统可拦截当且仅当可拦截度大于0
- 3) 给出解析形式判决，给出拦截器设计建议
- 4) 仿真和实验证



# 研究内容——1.2 视线约束可拦截区域建模



视线约束可拦截区域 (LOS-Constrained Interceptable Domain) 可以定义为：

包含控制器的动力系统在满足视线角约束下的状态演变过程。1. 直观对比控制器之间的优劣；2. 评价飞行器配置参数对可拦截区域的影响；3. 计算理论最优拦截策略

多旋翼相对运动模型

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{p}}_r = \mathbf{v}_r \\ \dot{\mathbf{v}}_r = \mathbf{g} + \frac{1}{m} \mathbf{f} - \mathbf{a}_t \\ \dot{\mathbf{R}} = \mathbf{R}[\boldsymbol{\omega}] \end{cases}$$

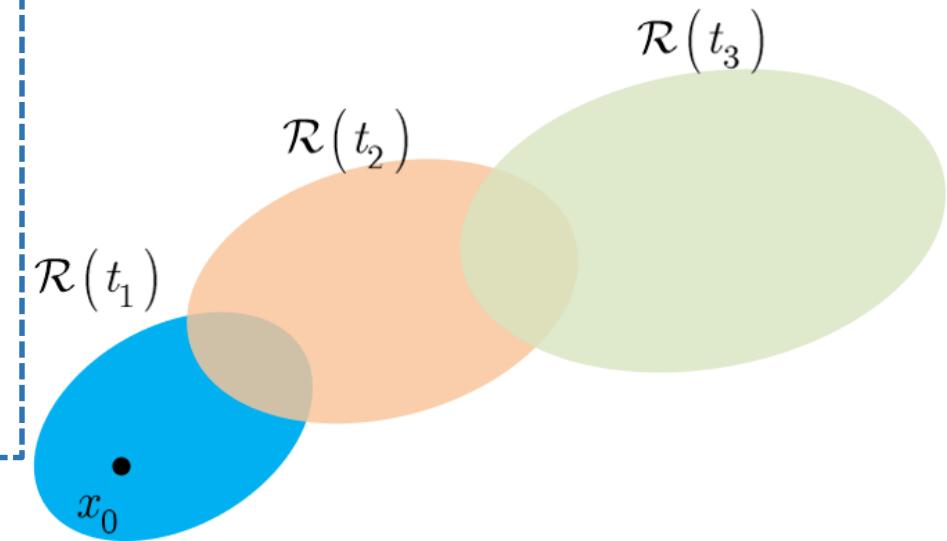
$$\mathbf{u} = [\mathbf{a}_t^T, f, \boldsymbol{\omega}^T]^T$$

$\xrightarrow{\hspace{1cm}}$

$$\mathbf{x} = [\mathbf{p}_r, \mathbf{v}_r, \mathbf{R}] \in \text{SE}_2(3)$$

状态方程

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}) \\ &= \begin{bmatrix} \mathbf{v}_r \\ \mathbf{g} + \frac{f}{m} \mathbf{R} \mathbf{R}_f \mathbf{e}_3 - \mathbf{a}_t \\ \mathbf{R}[\boldsymbol{\omega}] \end{bmatrix} \end{aligned}$$



LOS约束

初始状态  $\mathbf{x}(0)$

有界输入  $\mathbf{u}(t)$

$$\mathcal{R}(r) = \left\{ \mathbf{x}(r) = \int_0^r \mathbf{f}(\mathbf{x}(t), \mathbf{u}(t)) dt \mid \mathbf{x}(0) \in \mathcal{X}_0, \mathbf{u}([0, r]) \in \mathcal{U}([0, r]), \mathbf{x}([0, r]) \in \mathcal{X}_{\text{FOV}} \right\}$$

视线约束可拦截区域示意图

# 研究内容——1.3 无人机配置和参数



## 飞控&动力

- 250轴距机架 + Pixhawk Nano V5 飞控
- 三层架构：电源层/飞控电调/计算单元

## 计算单元

- NVIDIA Jetson Xavier NX

## 感知

- CSI相机：120° 视场角

## 定位

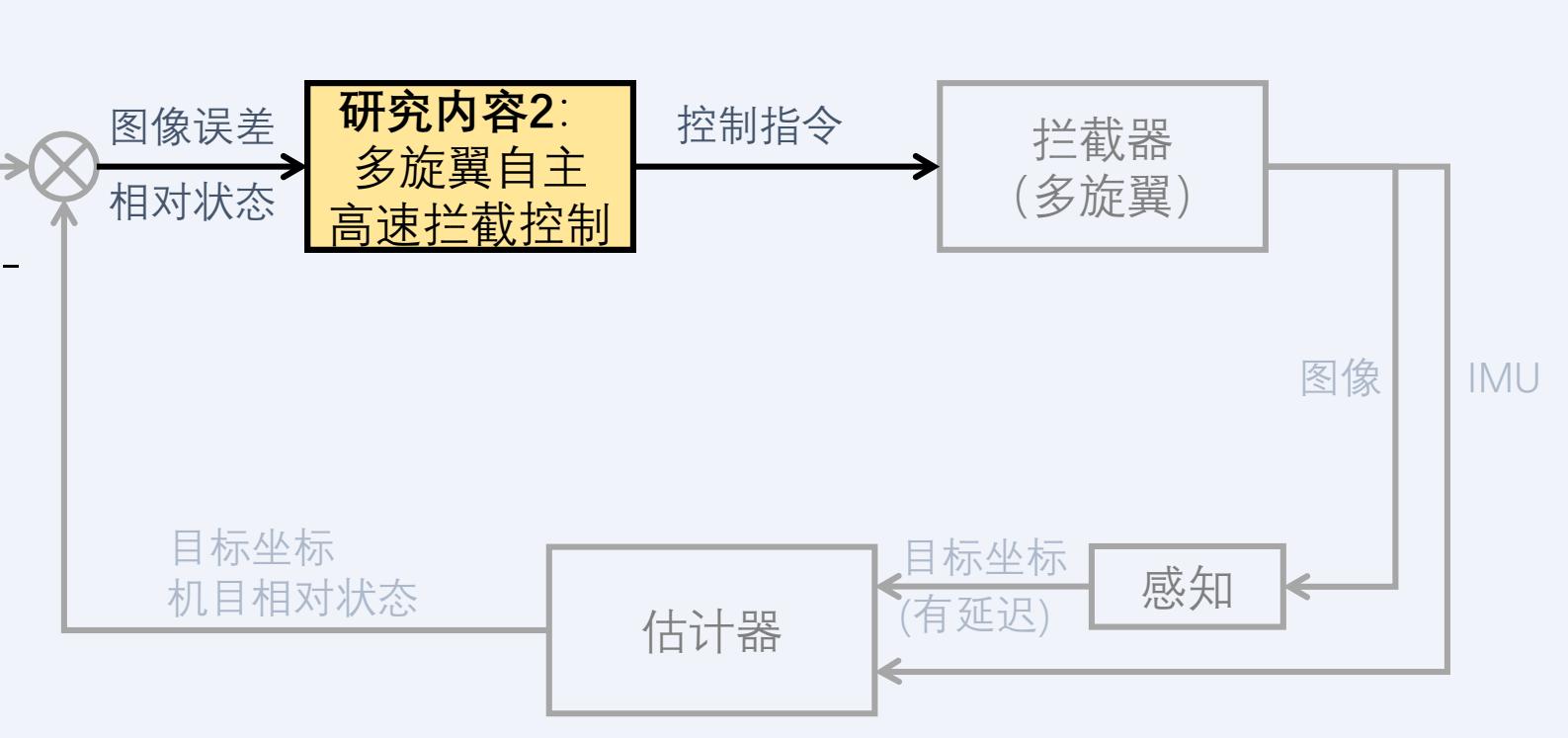
- RTK：获取拦截器真值便于后期分析

## 研究内容——2. 多旋翼自主高速拦截控制



控制目标：

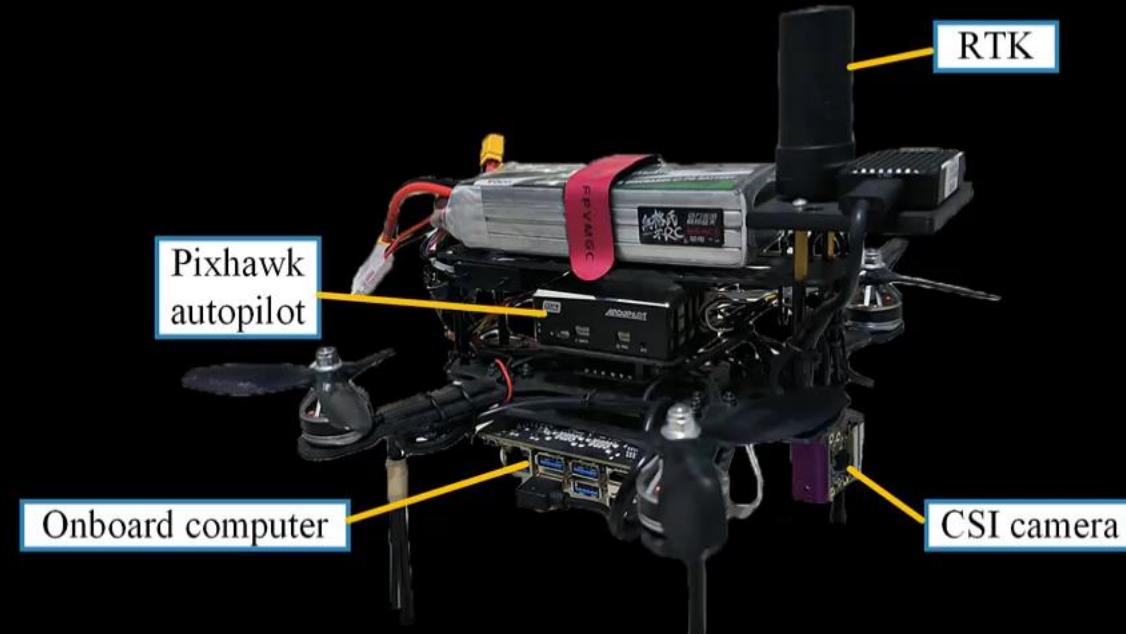
1. 图像上锁定目标
2. 机目相对位置过零



如何逼近理论拦截极限？

# Real Flight Experiments

All videos are at  $1\times$  speed



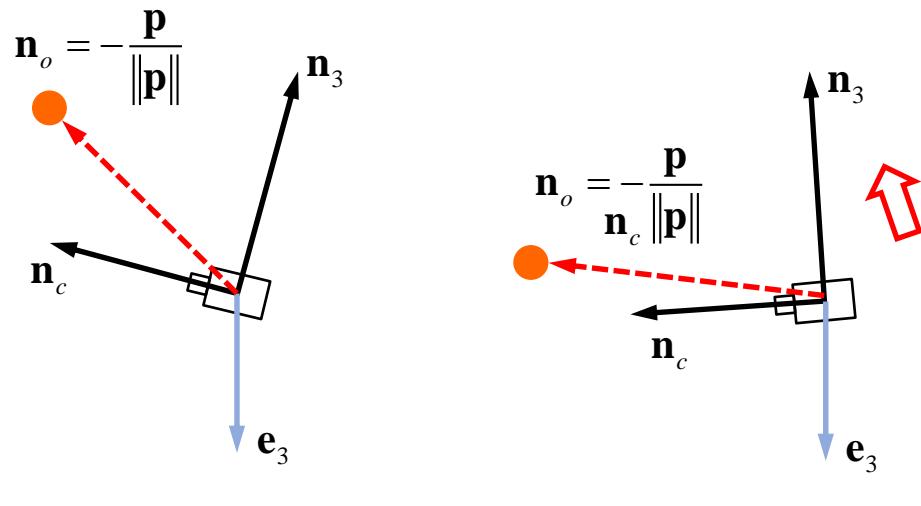
Interceptor multicopter with **monocular camera** fixed to the airframe

# 研究内容——2.1 基于图像视觉伺服的多旋翼自主高速拦截控制



## 研究目标：

设计基于**图像伺服**的高速拦截算法，使得无人机在仅有图像特征信息的情况下能够设计**高机动敏捷控制器**，实现精确拦截目标的要求。



同时控制到期望的姿态

$${}^b\boldsymbol{\omega} = \frac{z_1}{k_b^2 - z_1^2} \mathbf{R}_b^{eT} (\mathbf{n}_{td} \times \mathbf{n}_t) + {}^b\boldsymbol{\omega}_2$$

设计拉力调节高度

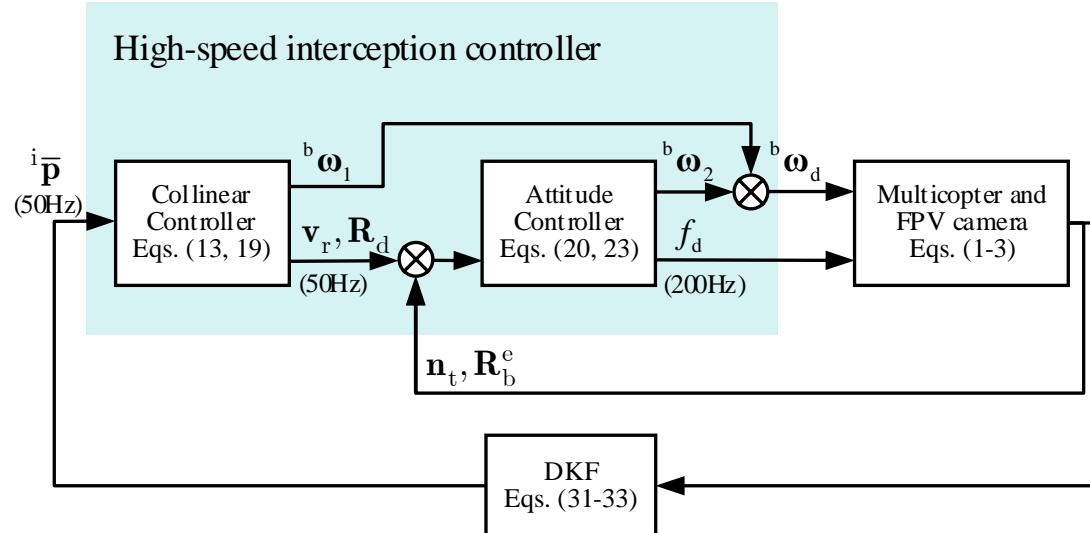
$$\begin{aligned} \mathbf{a}_d &= \mathbf{g} + \frac{f}{m} \mathbf{n}_{fd} + \frac{1}{m} {}^e\mathbf{f}_{drag} \\ \Rightarrow f_d &= \mathbf{n}_f^T (m\mathbf{a}_d - m\mathbf{g} - {}^e\mathbf{f}_{drag}) \end{aligned}$$

问题1. (控制器设计问题) 假定包括多旋翼飞机和图像测量在内的状态信息是准确可用的。同时，目标和拦截器在惯性系统中的位置是未知的。对于拦截器模型，设计 $f, {}^b\omega$ 的控制器使图像跟踪误差收敛为零，即  $\mathbf{n}_t \rightarrow \mathbf{n}_{td}$ ，并且拦截器多旋翼飞机进一步接近目标，即  ${}^t\mathbf{p} \rightarrow \mathbf{0}$ 。

# 研究内容——2.1 基于图像视觉伺服的多旋翼自主高速拦截控制



为解决问题1(控制器设计问题)，在 $SO(3)$ 上设计角速度环控制器，在距离收敛的情况下锁定目标



$$L = L_3 + L_4$$

$$= \frac{1}{2} \log \frac{k_b^2}{k_b^2 - z_1^2} + \frac{1}{2} \mathbf{p}_r^T \mathbf{p}_r + \frac{1}{2} \mathbf{z}_2^T \mathbf{z}_2 + \text{tr} (\mathbf{I} - \mathbf{R}_d^T \mathbf{R}_b^e)$$

证明了拦截器与目标的相对位置趋于零。整个拦截过程中，目标矢量始终锁定在拦截器的视野范围内

## 1. 约束目标在视野范围内

定义视线误差  $z_1 = 1 - \mathbf{n}_{td}^T \mathbf{n}_t$ ，设计屏障李雅普诺夫函数  $L_1 = \frac{1}{2} \log \frac{k_b^2}{k_b^2 - z_1^2}$  保证视线角约束

## 2. 速度矢量与视线共线

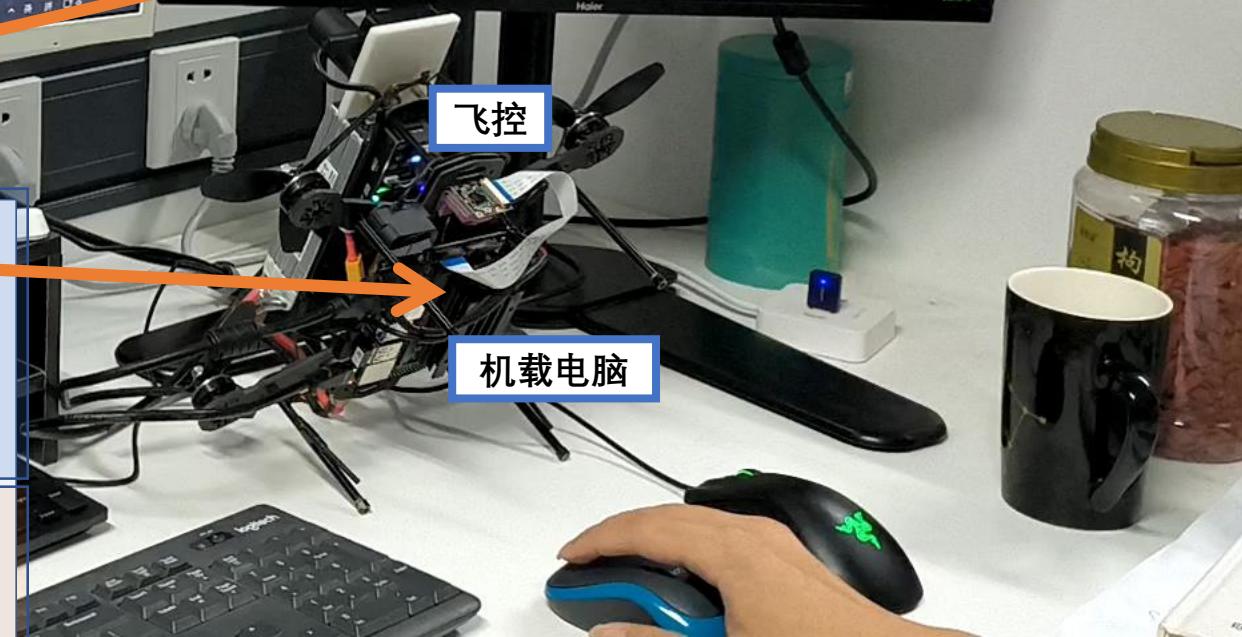
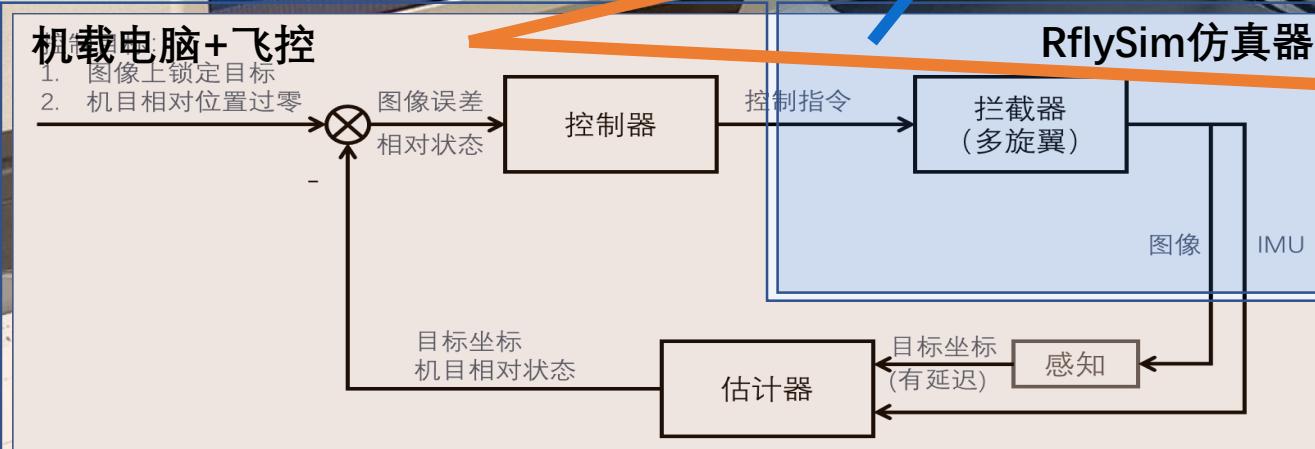
定义速度跟踪误差  $\mathbf{z}_2 = \mathbf{v}_r + k_1 \mathbf{p}_r$ ，设计李雅普诺夫函数  $L_2 = \frac{1}{2} \mathbf{p}_r^T \mathbf{p}_r \geq 0$  引导速度共线

$$L_3 = L_1 + L_2 + \frac{1}{2} \mathbf{z}_2^T \mathbf{z}_2 \geq 0$$

## 3. 姿态控制器跟踪期望姿态

设计李雅普诺夫函数  $L_4 = \text{tr} (\mathbf{I} - \mathbf{R}_d^T \mathbf{R}_b^e)$  引导姿态收敛

旋转矩阵无奇异性问题；姿态环控制相应时间短



## 研究内容——2.2 结合制导思想的图像伺服控制方法

图像伺服本质：保证目标在视线范围内，控制飞行器速度与 $n_t$ 共线

→ 追踪法制导

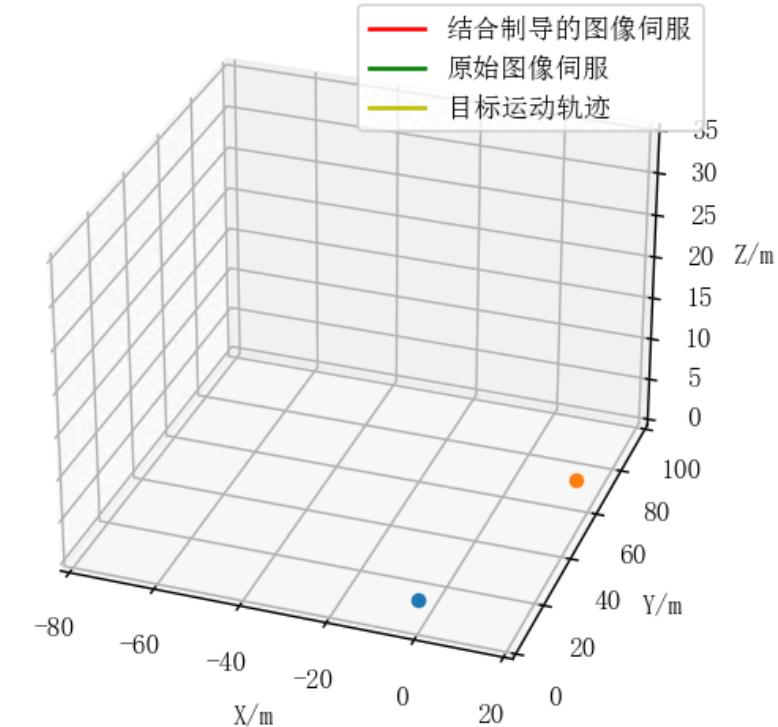
在三维空间中，比例导引指令为  $a_{\text{PNG}} = N\Omega_R \times v_m$

如何将PNG引入图像伺服？

$$\alpha_3 = -mg - {}^e f_{\text{drag}} + \boxed{N\omega_R \times v} + \frac{z_1}{k_b^2 - z_1^2} \frac{m}{\|p_r\|} (-I + n_t n_t^T) n_{\text{td}} + k n_t.$$

$$f_d = \|\alpha_3\|$$

$${}^e \omega_d = \left( \frac{z_1}{k_b^2 - z_1^2} (n_{\text{td}} \times n_t)^T + \frac{f_d}{m} z_5^T [n_f]_x \right)^\dagger z_5^T \left( -\frac{1}{m} \dot{\alpha}_3 + c_4 z_5 \right)$$



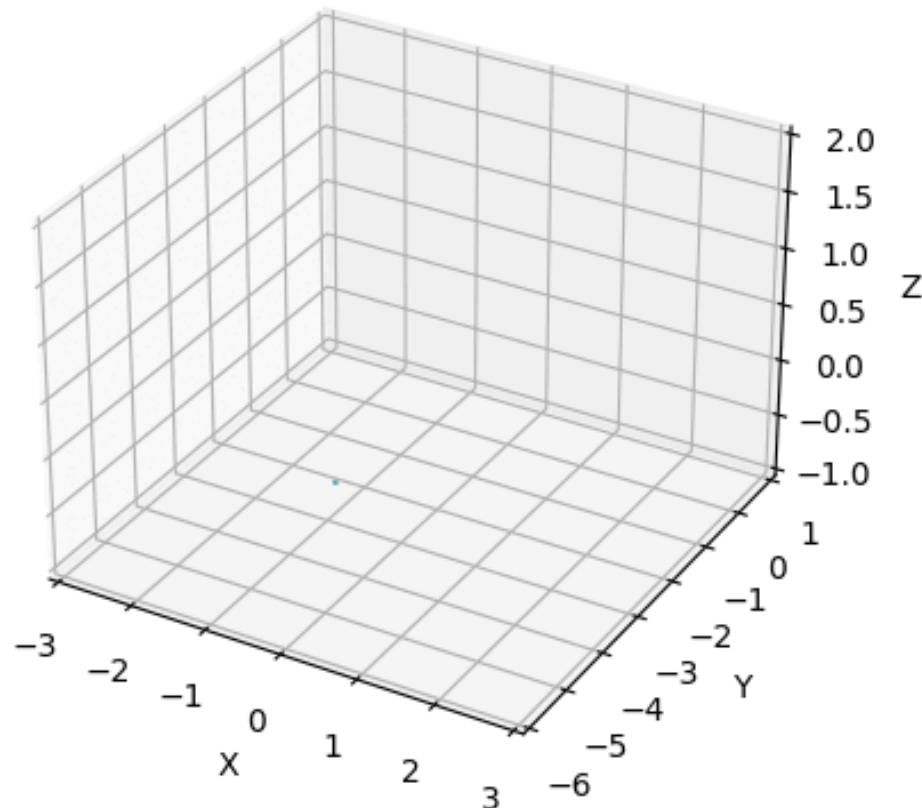
改进后的图像伺服方法依然能够正确追踪目标，并且拦截时间小于改进前，运动轨迹也比改进前更加平滑。

# 研究内容——2.2 结合制导思想的图像伺服控制方法

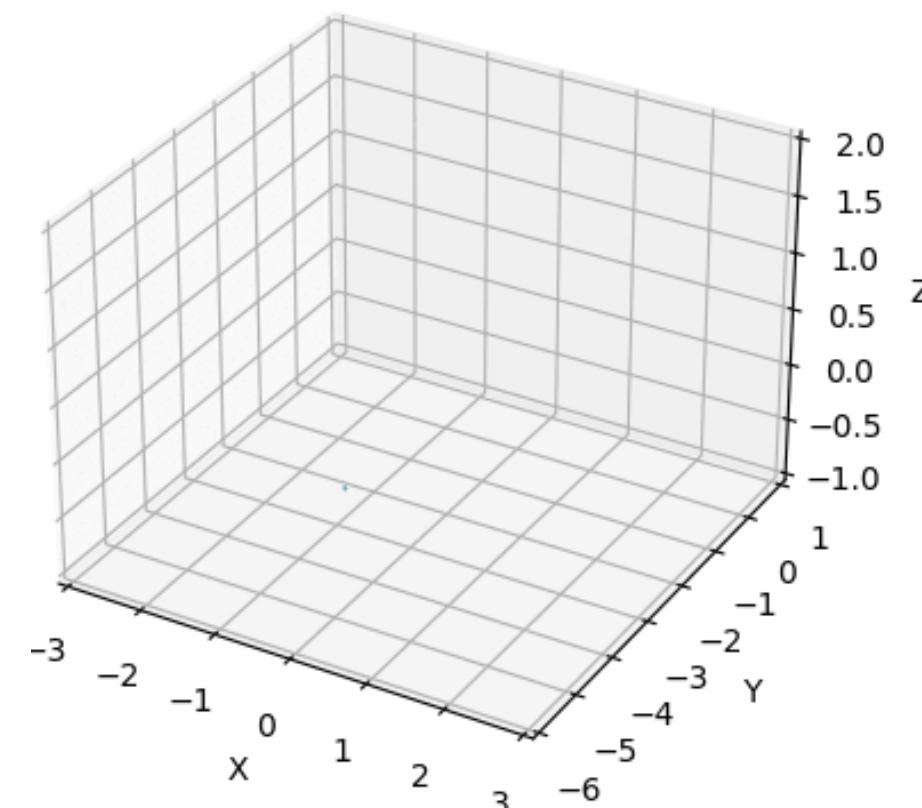


初始位置集合

x:[-2.11,3.27]  
y:[-4.92,1.23]  
z:[-3.65,2.40]



原始图像伺服控制器演变过程



结合制导的图像伺服控制器演变过程

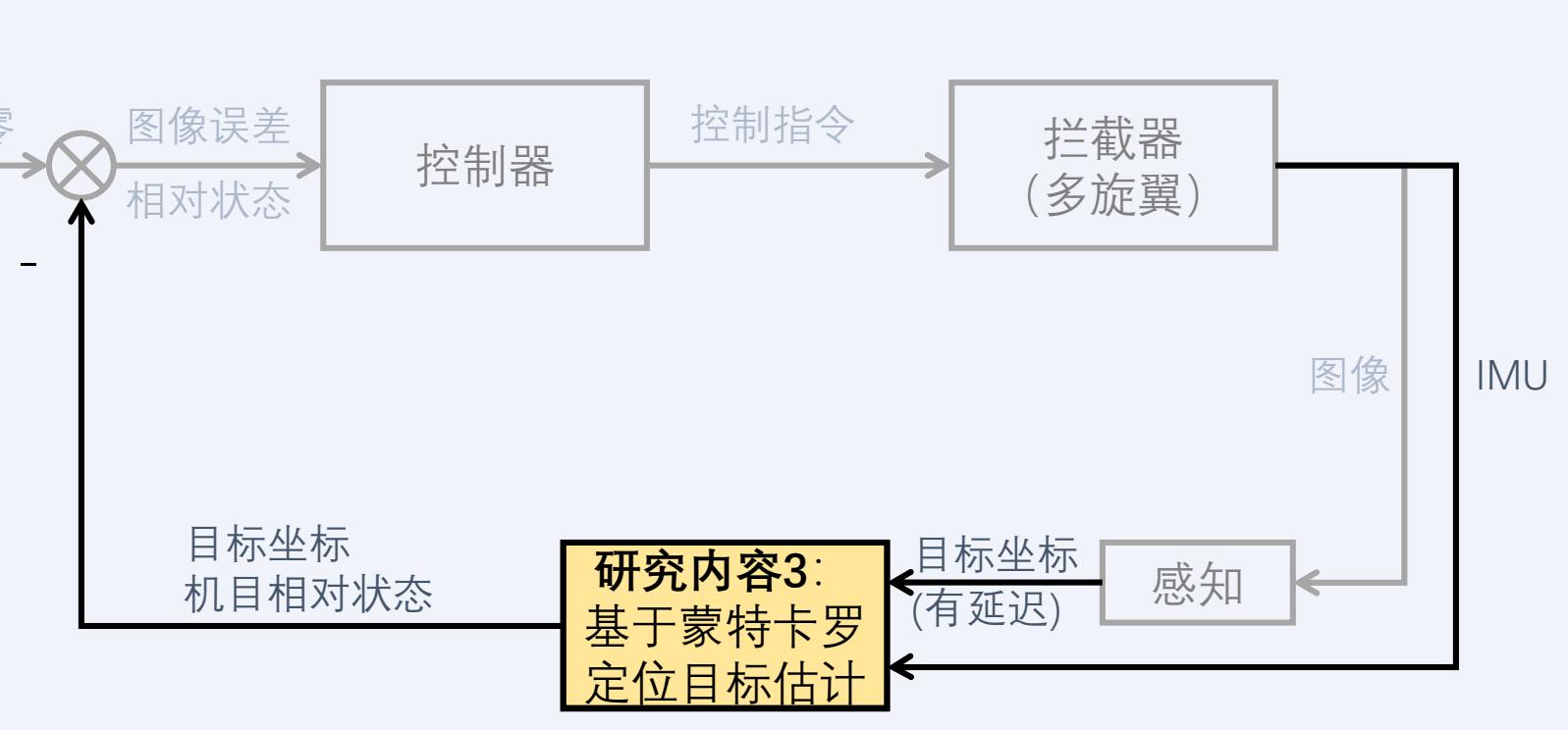
对于远距离目标，**结合制导的图像伺服控制器视线约束可拦截性区域更大**，追踪性能优于原始图像伺服控制器。拦截过程均满足视线约束

# 研究内容——3. 目标估计与任务分配



控制目标：

1. 图像上锁定目标
2. 机目相对位置过零



目标丢失如何持续拦截？

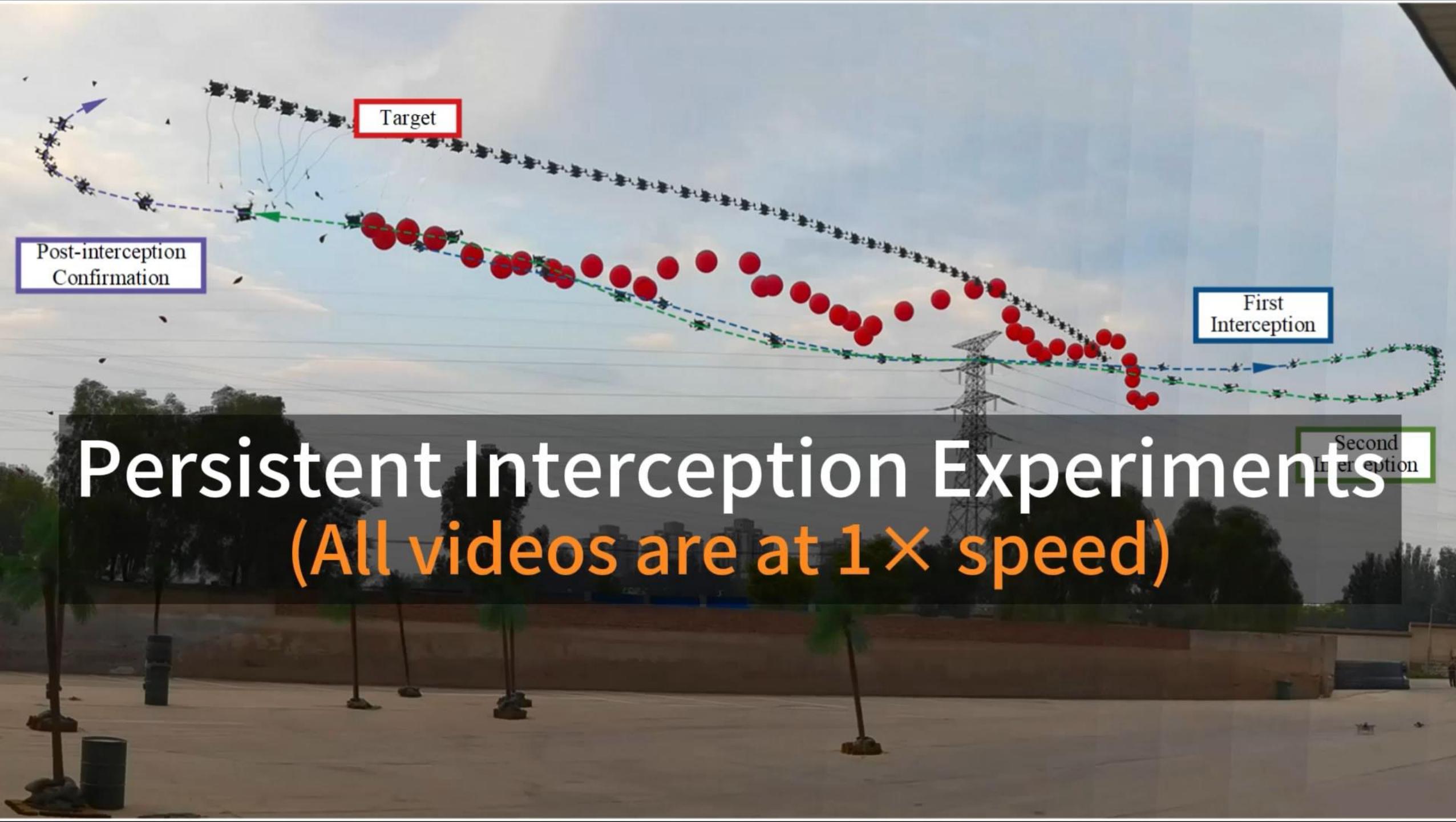


中国红旗17导弹神级走位  
网友：拐弯也就算了  
还掉头 过分了！



1. 如何在已知初始位置的情况下进行主动搜索？
2. 如何在拦截后主动进行持续拦截或拦截确认？

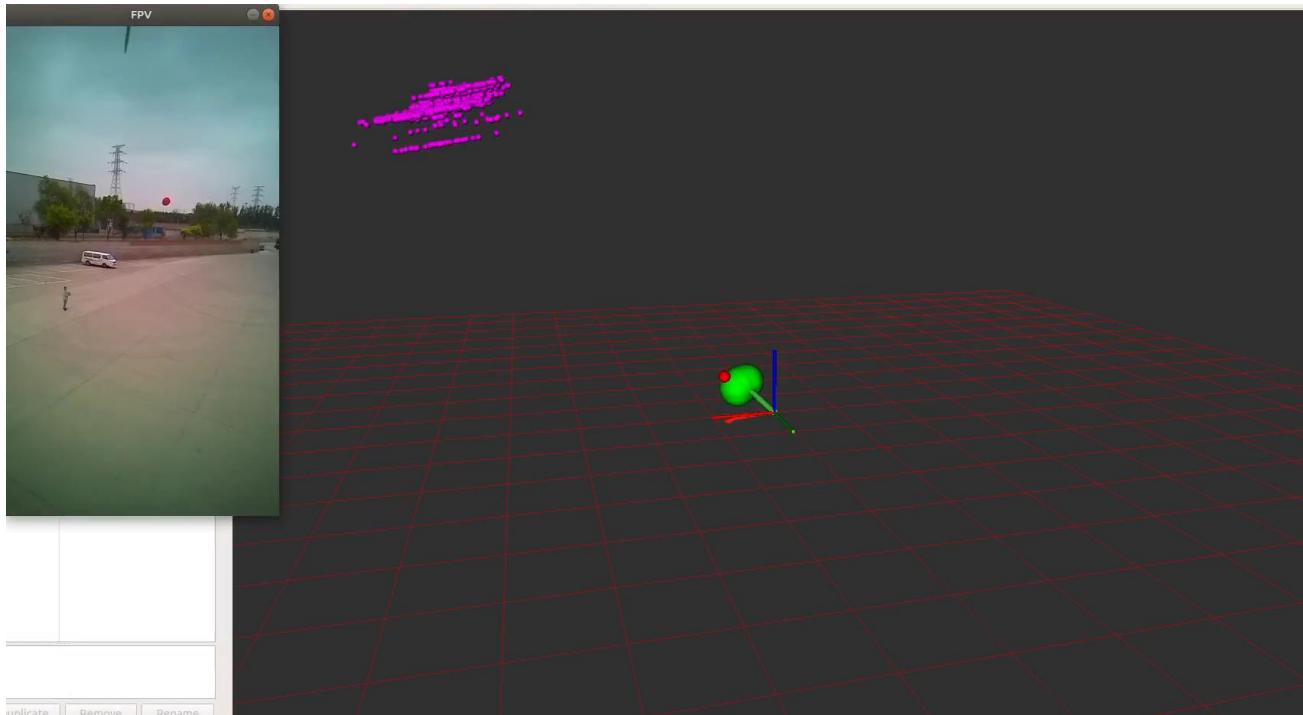
难点：单目相机无法直接获得目标位置



# Persistent Interception Experiments

(All videos are at  $1\times$  speed)

# 研究内容——3.1 蒙特卡罗定位方法状态估计



## Step1: 运动递推

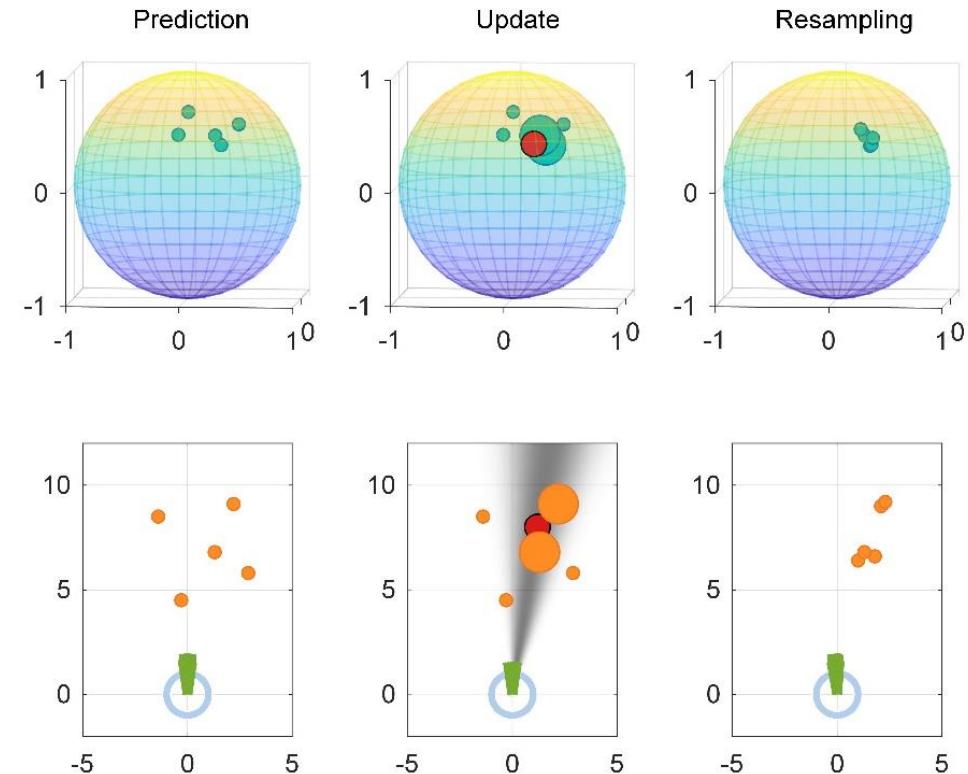
无人机运动时，粒子根据**IMU**运动指令预测无人机的位置

## Step2: 观测概率更新

根据预测的**粒子的方位与观测的匹配程度**，更新粒子权重

$$\begin{aligned} & \mathbb{P}(\mathbf{x}_{k-D} | \mathbf{z}_{0:k-1}, \mathbf{u}_{0:k-D}) \\ &= \int \mathbb{P}(\mathbf{x}_{k-D} | \mathbf{x}_{k-D-1}, \mathbf{u}_{k-D}) \mathbb{P}(\mathbf{x}_{k-D-1} | \mathbf{z}_{0:k-1}, \mathbf{u}_{0:k-D-1}) d\mathbf{x}_{k-D-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbb{P}(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_{k-D}) &= \text{prob}(\arccos(\mathbf{p}_m^T \mathbf{s} \mathbf{p}_{k-D}), \sigma_p^2) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_p^2}} \exp\left\{-\frac{\arccos^2(\mathbf{p}_m^T \mathbf{s} \mathbf{p}_{k-D})}{\sigma_p^2}\right\} \end{aligned}$$



## Step3: 依概率重采样

根据贝叶斯定理，**重采样后的粒子概率分布为真值的无偏估计**

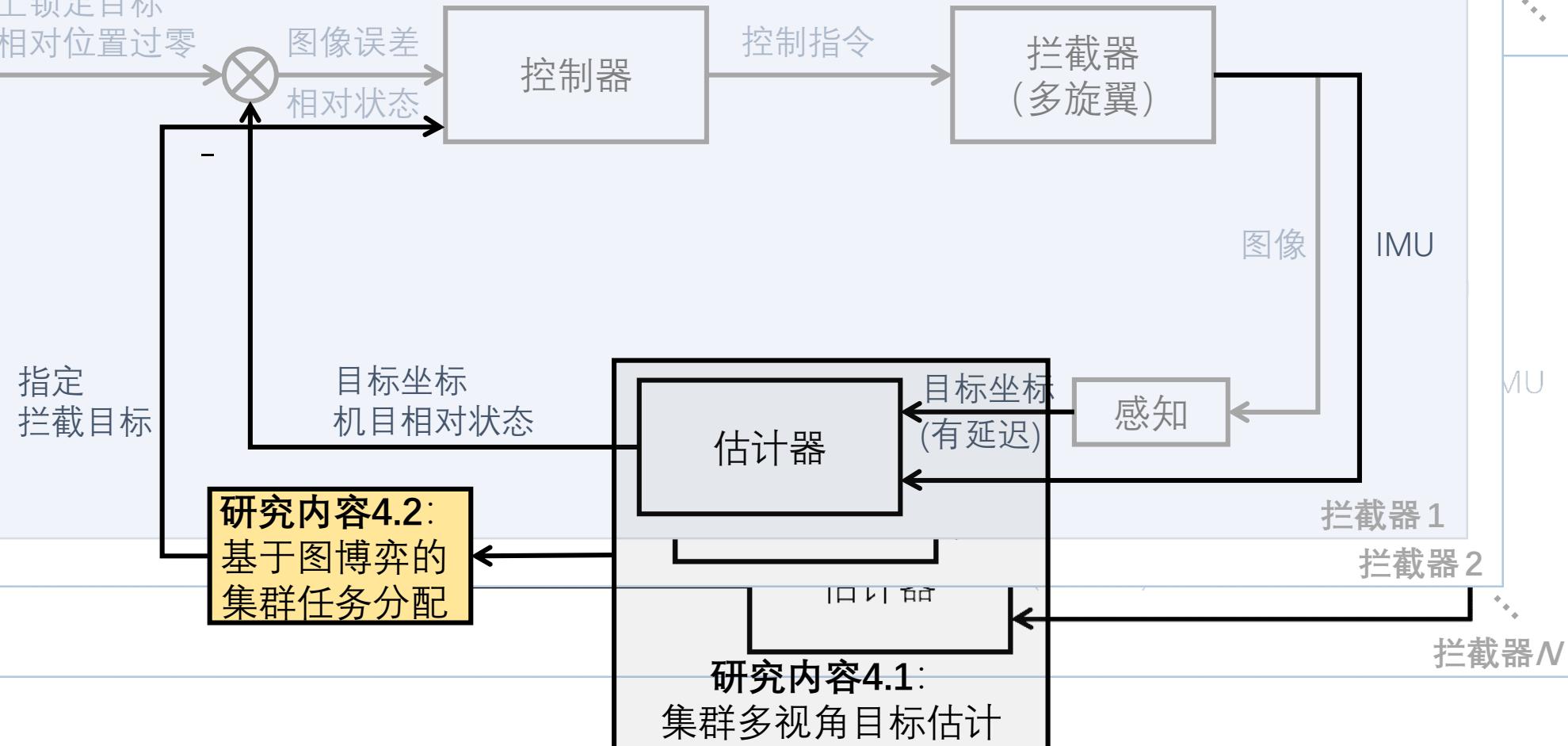
$$\begin{aligned} & \mathbb{P}(\mathbf{x}_{k-D} | \mathbf{z}_{0:k}, \mathbf{u}_{0:k-D}) \\ &= \frac{\mathbb{P}(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_{k-D}) \mathbb{P}(\mathbf{x}_{k-D} | \mathbf{z}_{0:k-1}, \mathbf{u}_{0:k-D})}{\mathbb{P}(\mathbf{z}_k | \mathbf{z}_{0:k-1})} \\ &= \eta \mathbb{P}(\mathbf{z}_k | \mathbf{x}_{k-D}) \mathbb{P}(\mathbf{x}_{k-D} | \mathbf{z}_{0:k-1}, \mathbf{u}_{0:k-D}) \end{aligned}$$

# 研究内容——4 集群多视角目标估计



控制目标：

1. 图像上锁定目标
2. 机目相对位置过零

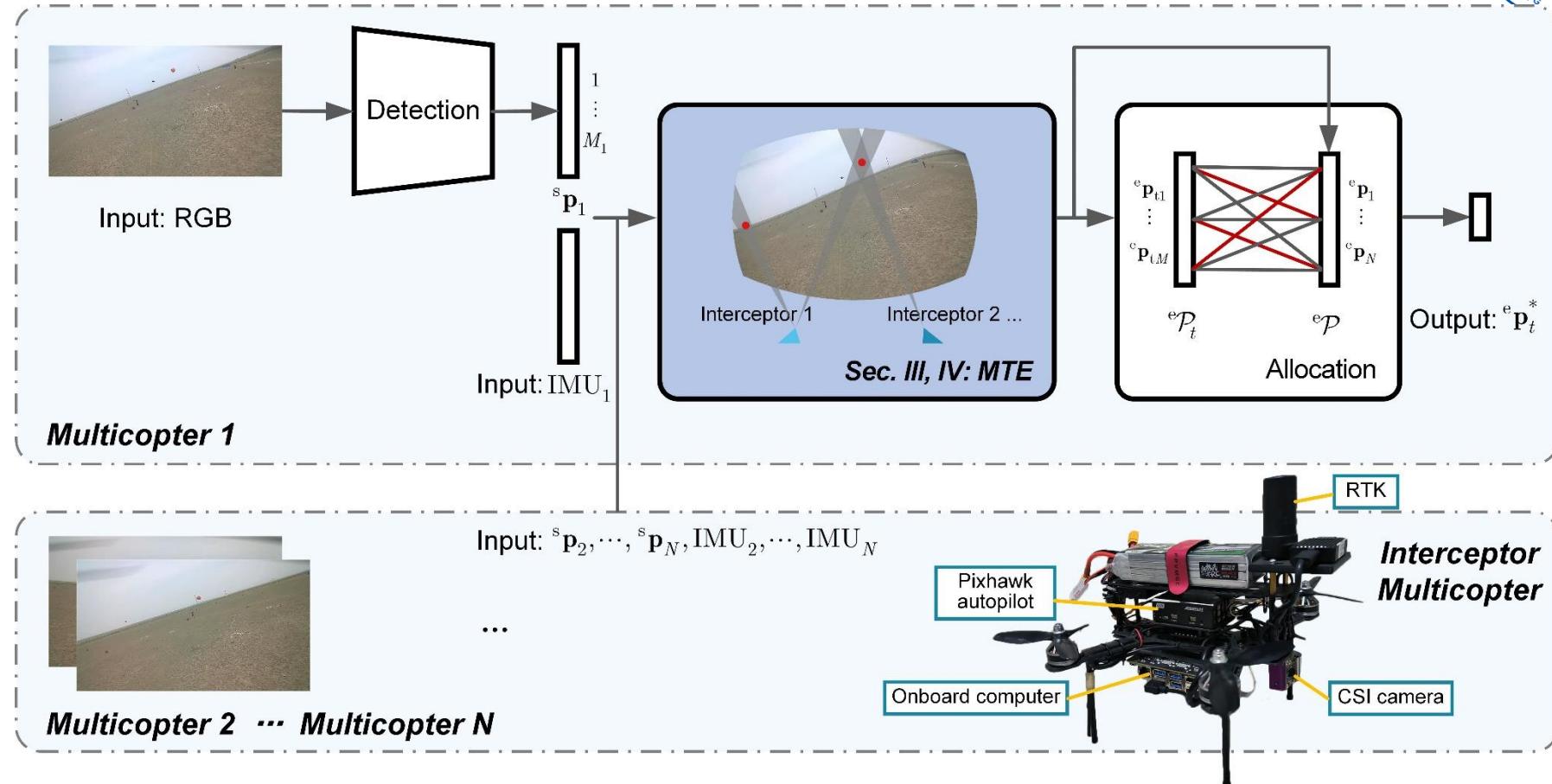


多目标如何拦截？

# Real Flight Experiments



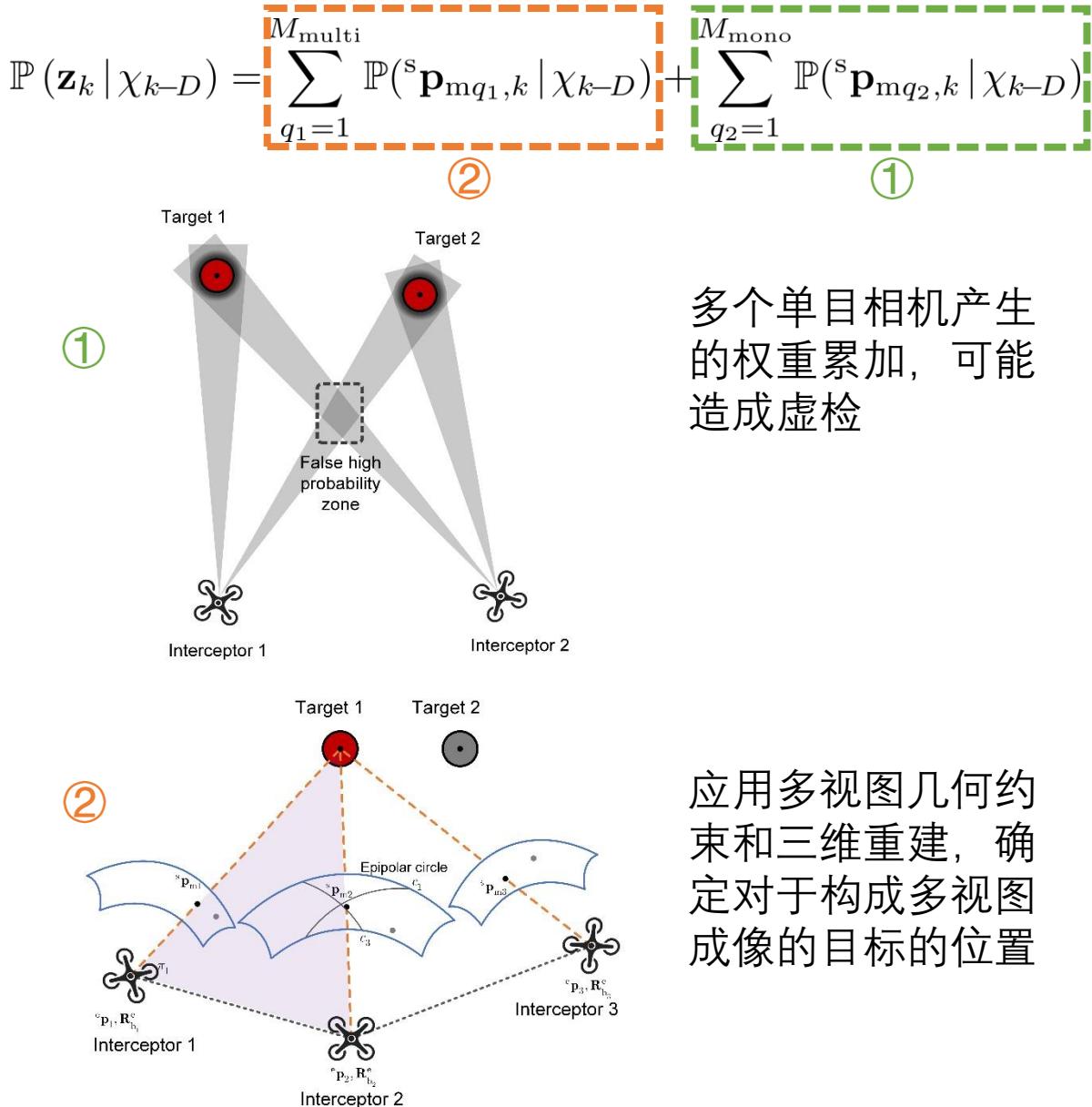
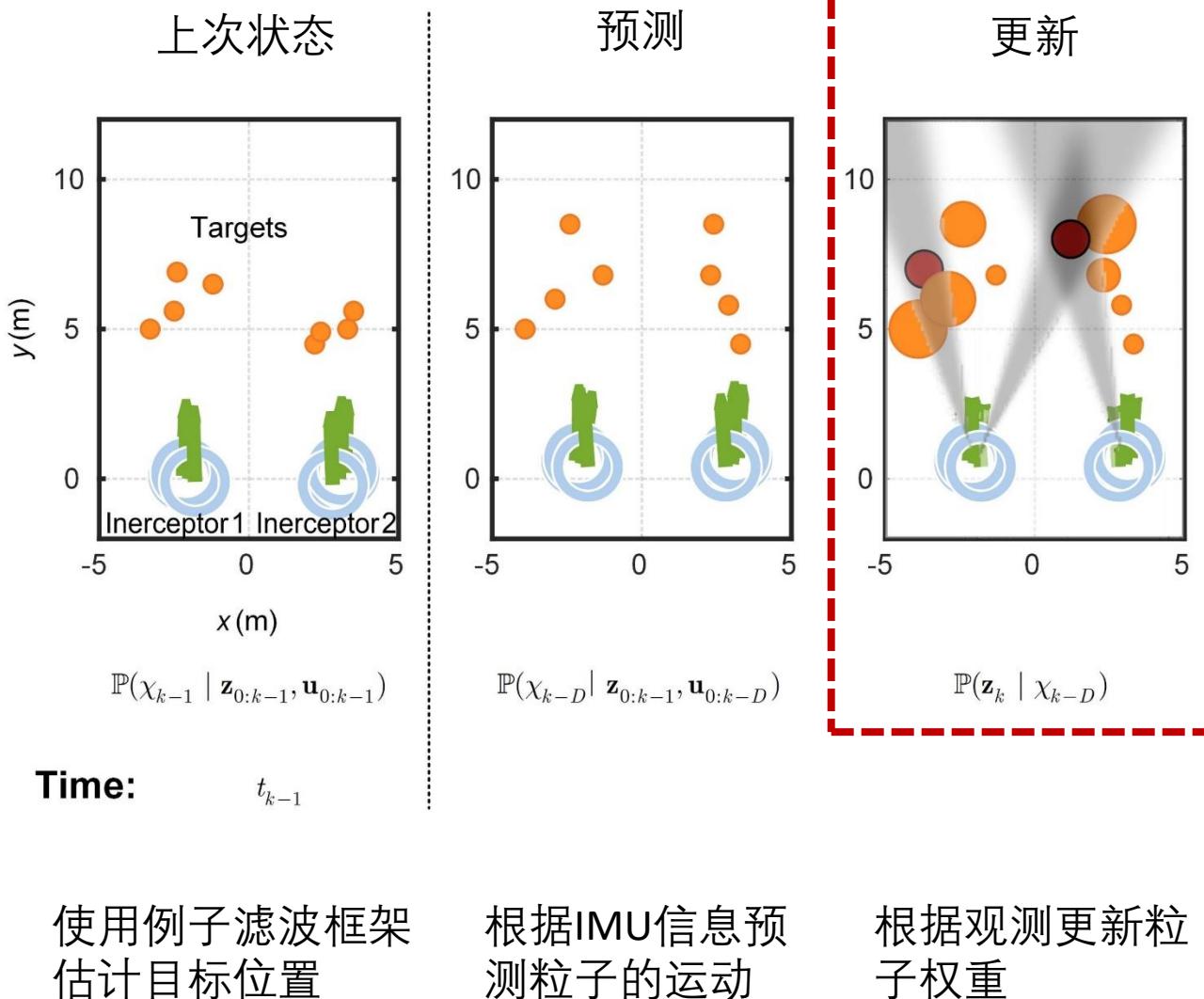
# 研究内容——4.1 集群多视角目标估计



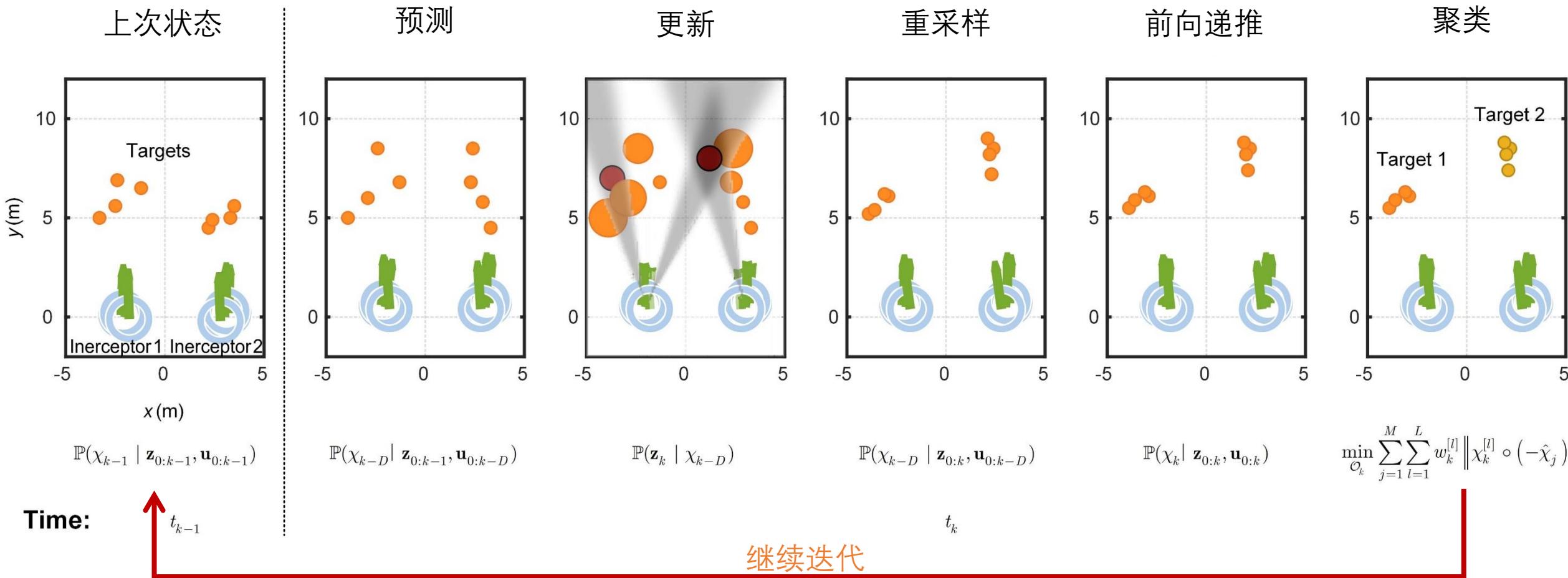
难点：多视角目标匹配和目标估计，如何统一各类数据

方法：受动作捕捉系统的启发，建立多视图几何匹配方法。蒙特卡罗粒子滤波统一本方法在单视角、多视角和有延迟情况下的估计

# 研究内容——4.1 集群多视角目标估计



# 研究内容——4.1 集群多视角目标估计



使用例子滤波框架  
估计目标位置

根据IMU信息预  
测粒子的运动

根据观测更新粒  
子权重

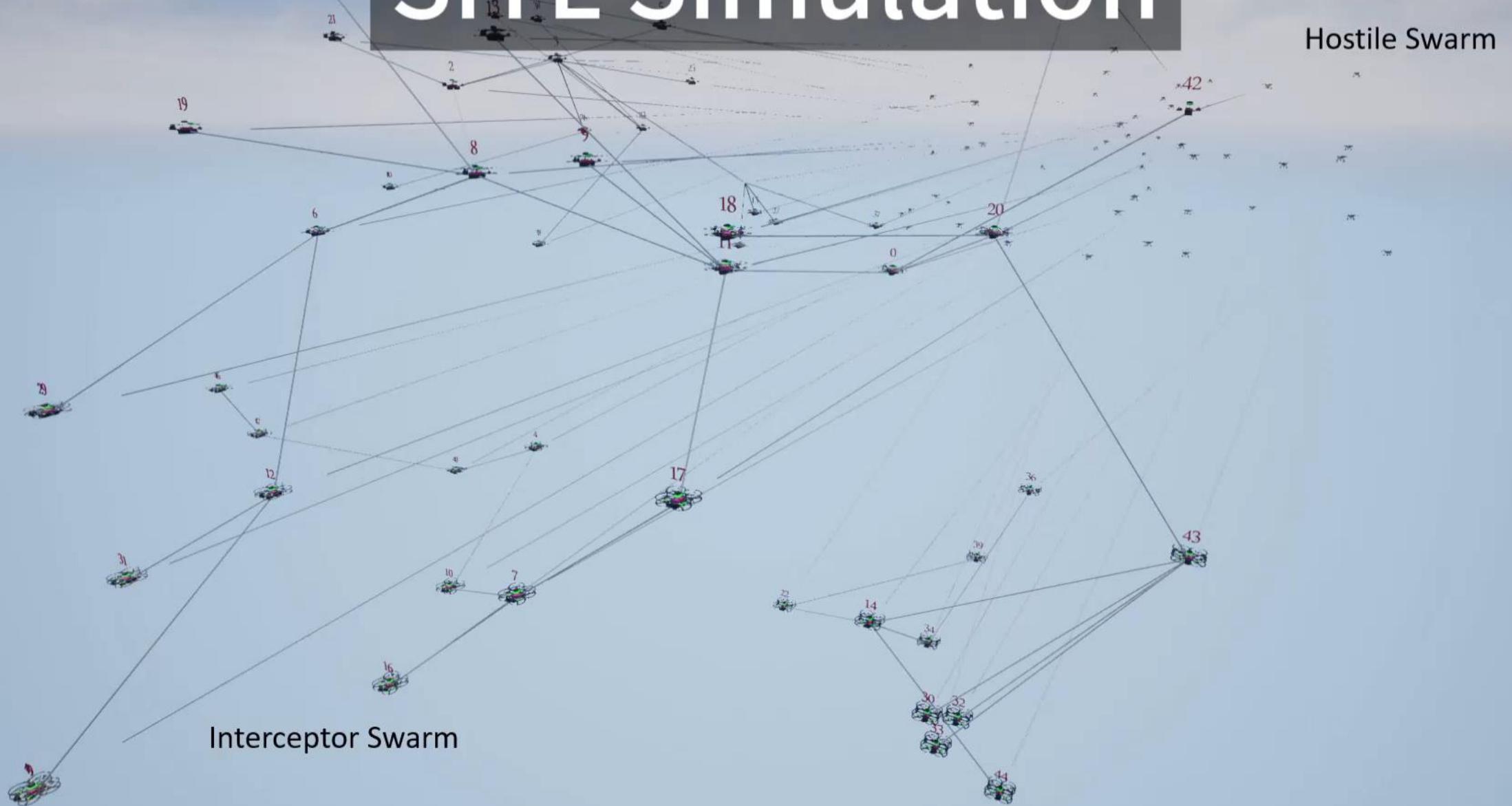
根据权重重  
采样粒子

前向递推消除  
延迟的影响

对粒子聚类  
区分目标

研究内容——4.2 基于图博弈的集群任务分配

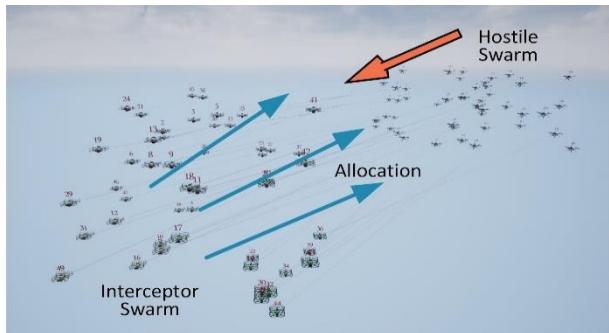
# SIL Simulation



# 研究内容——4.2 基于图博弈的集群任务分配

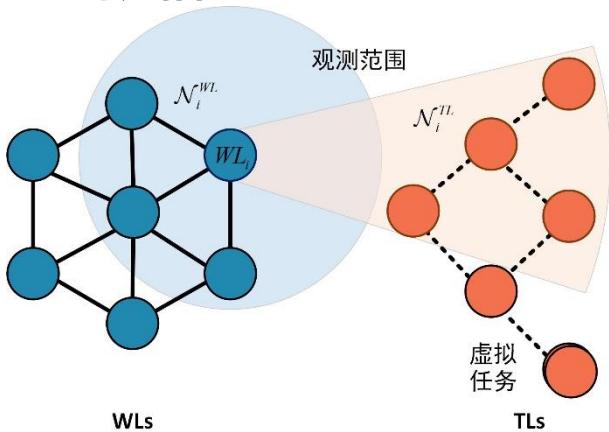


## 1. 集群拦截分配问题



研究目标：无直接通信的多目标任务分配

## 2. 问题描述



寻找WLs到TLs的映射，使得全局收益最大

## 3. 分布式图博弈求解



- 1). 构建WLs和TLs，统一不同集群规模
- 2). 计算worker和其他邻居的收益函数
- 3). 以分布式架构求解图博弈模型

## 4. 邻域均衡达成图上均衡

$$\mathbb{G}: \max_{p_i(\mathbf{s}_i)} u^{global} = \sum_{i \in \mathcal{W}, a \in \mathcal{A}_i, \mathbf{s}_{-i} \in \mathcal{S}_{-i}} p_i(a, \mathbf{s}_{-i}) u_i(a, \mathbf{s}_{-i})$$

$$\text{s.t. } \sum_{\mathbf{s} \in \mathcal{S}} p(\mathbf{s}) = 1$$

$$p(\mathbf{s}) \geq 0, \forall \mathbf{s} \in \mathcal{S}$$

$$p_i(\mathbf{s}_i) = \sum_{\mathbf{s}[\mathcal{N}_i^{WL} : \mathbf{s}_i] \in \mathcal{S}} p(\mathbf{s}) = \sum_{a \in \mathcal{A}_i} p_i(a, \mathbf{s}_{-i})$$

$$\sum_{\mathbf{s}_i [\mathcal{N}_{ij}^{WL} : \mathbf{a}_{ij}] \in \mathcal{S}_i} p_i(\mathbf{s}_i) = \sum_{\mathbf{s}_j [\mathcal{N}_{ij}^{WL} : \mathbf{a}_{ij}] \in \mathcal{S}_j} p_j(\mathbf{s}_j)$$

$$\sum_{\mathbf{s}_{-i} \in \mathcal{S}_{-i}} p_i(a, \mathbf{s}_{-i}) u_i(a, \mathbf{s}_{-i}) \geq \sum_{\mathbf{s}_{-i} \in \mathcal{S}_{-i}} p_i(a, \mathbf{s}_{-i}) u_i(a', \mathbf{s}_{-i})$$

} 策略定义

两邻域共有无人机策略一致

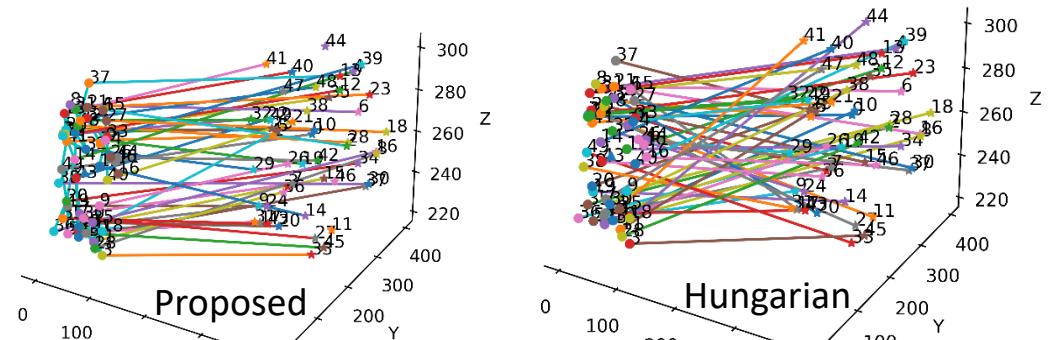
策略达成相关均衡，  
单方面改变策略都无法获得更大收益

# 研究内容——4.2 基于图博弈的集群任务分配效果



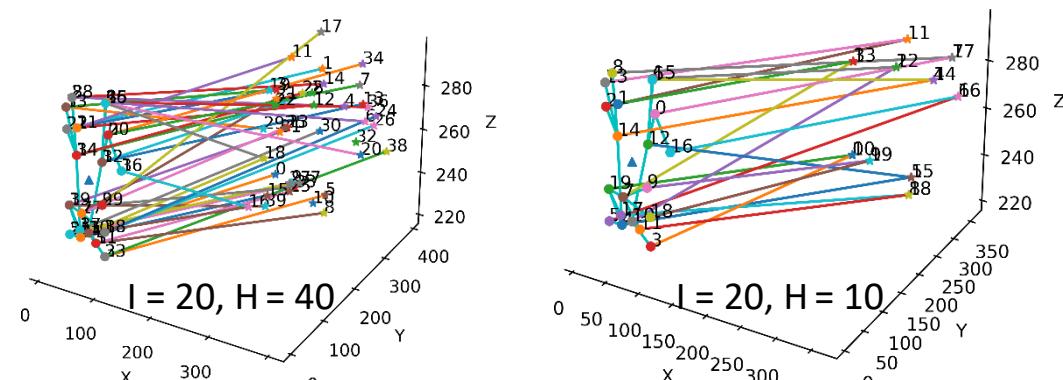
## 仿真 1. 比较集中式匈牙利算法

结果: 本方法与集中式匈牙利算法具有相近的覆盖率和收益,但是不依赖直接通信



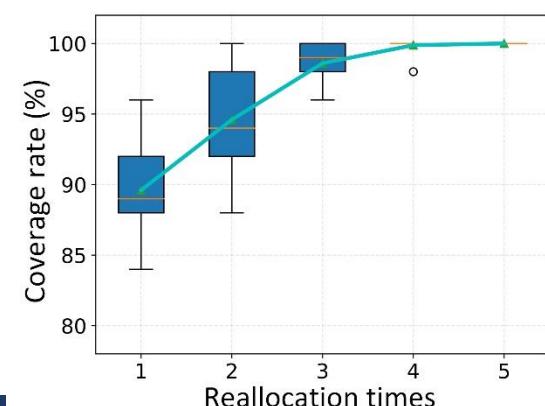
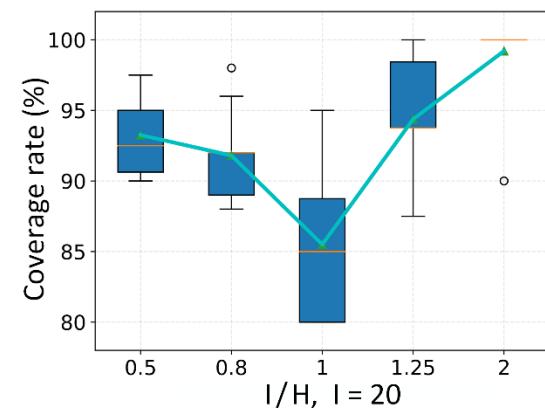
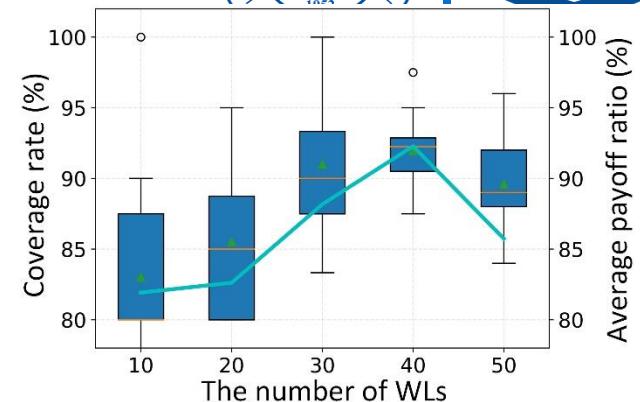
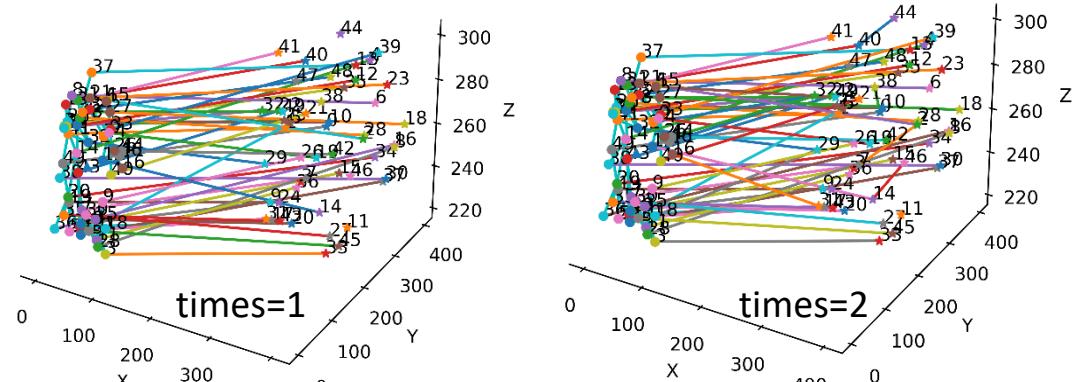
## 仿真 2. 不同拦截器—目标数量比

结果: 可以处理数量不一致情况。随着拦截器比例增加, 拦截效果更好, 符合预期



## 仿真 3. 多次分配

结果: 增加再分配次数可以提高拦截效果





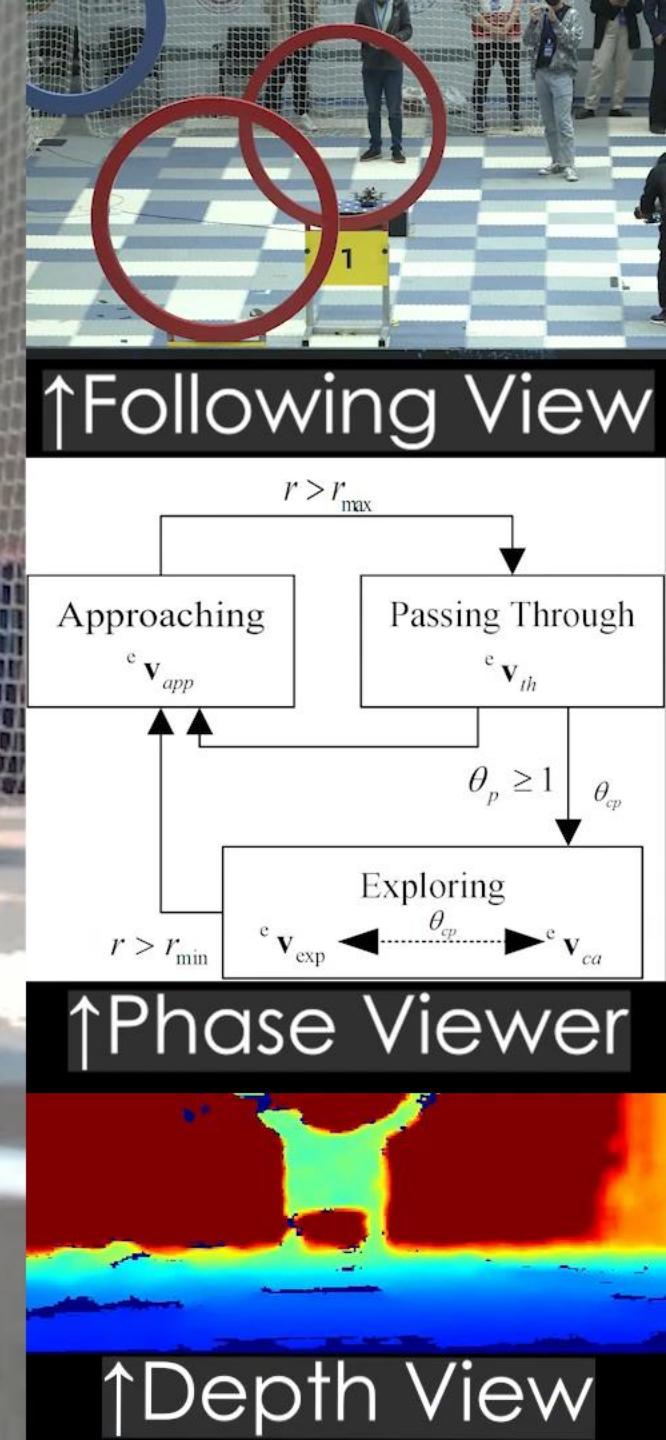
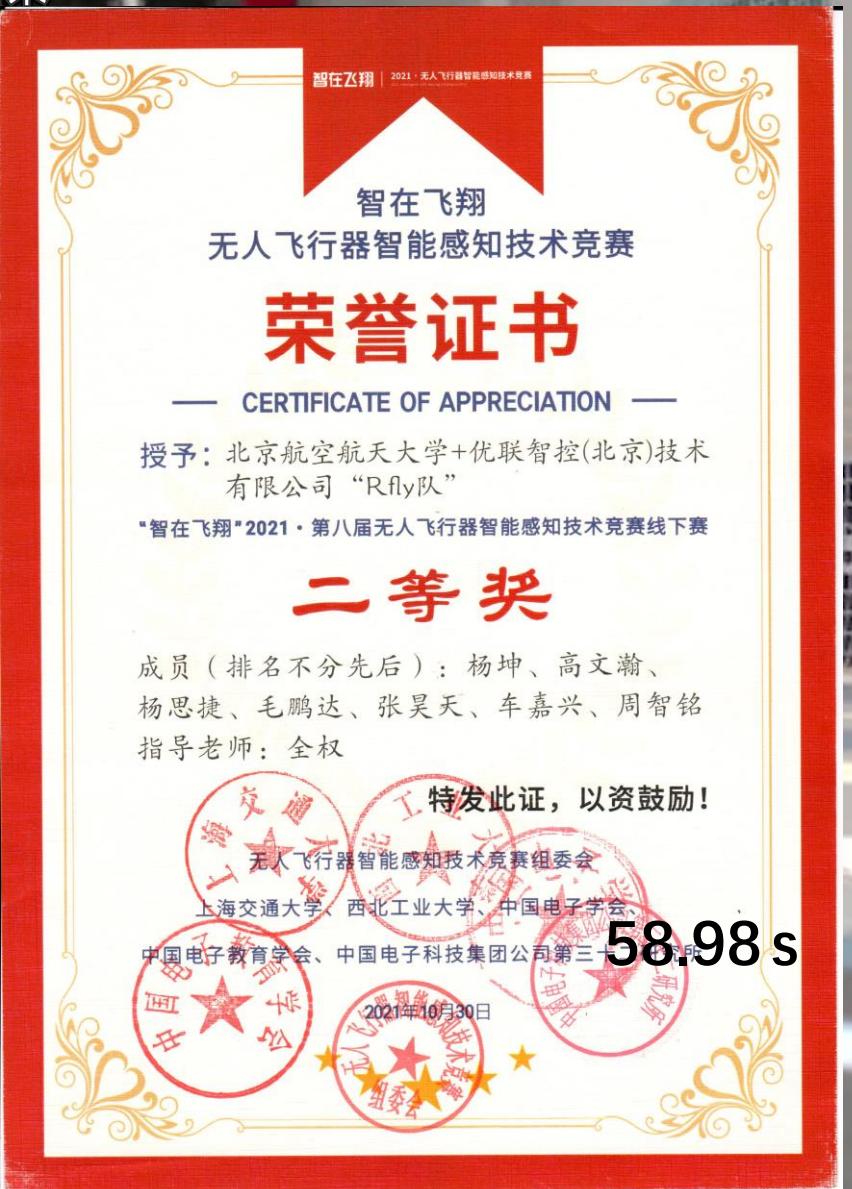
### 3. 研究成果应用转化

# 成果展示 ——智在飞翔仿真赛

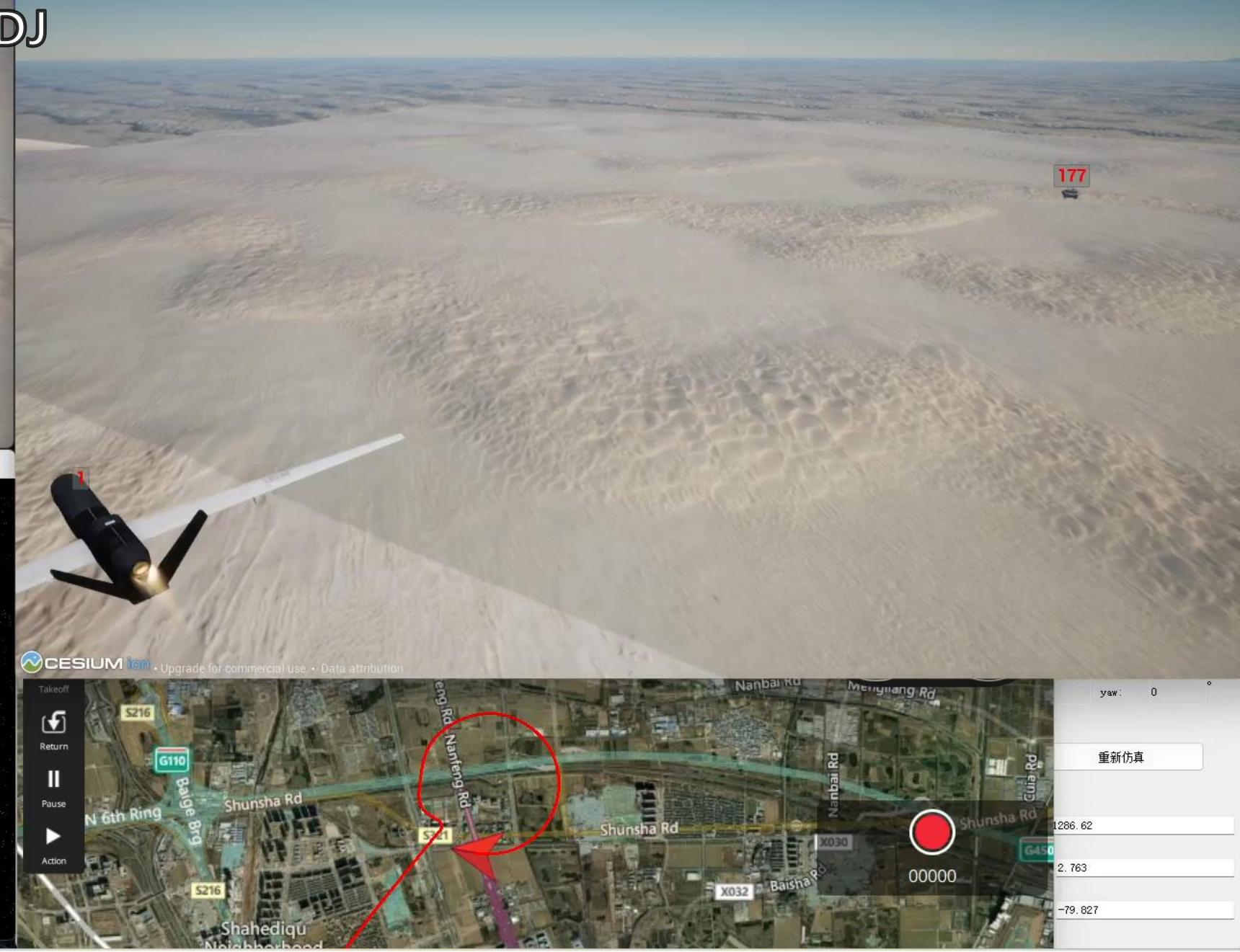
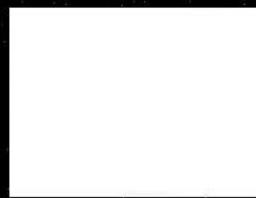


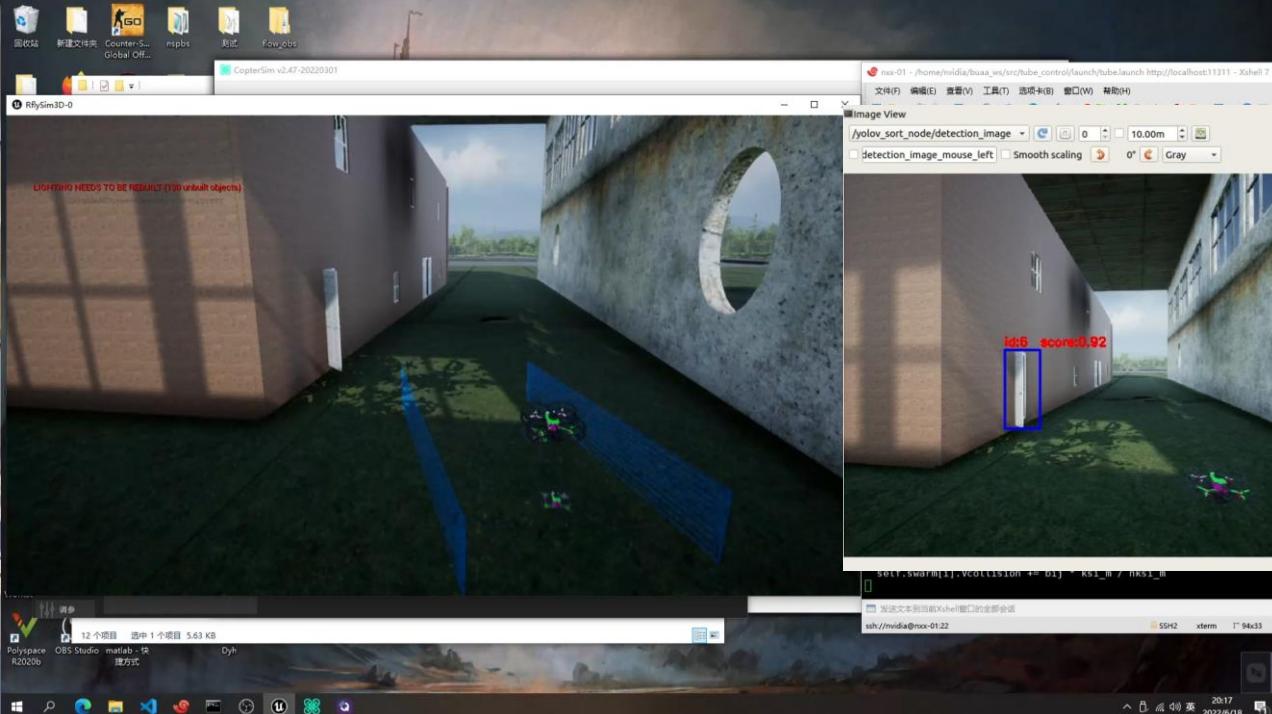
Speed × 2

## 成果展示——室内自主穿越竞速

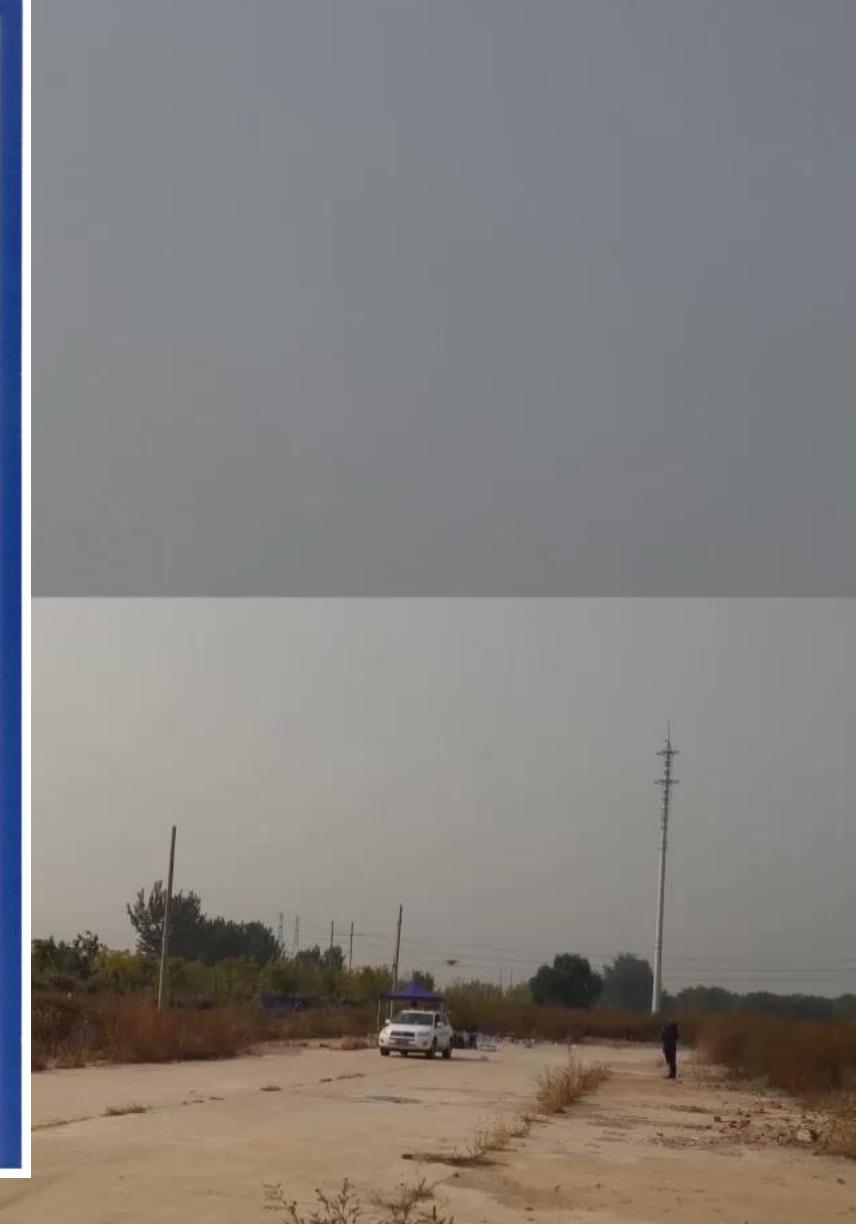


# 成果展示——固定翼搜索DJ





# 成果展示——空中精准对接1





## 4. 总结



## 概念创新

- 提出了多旋翼可拦截性和可拦截度的定义
- 理论上证明了可拦截度可以作为无人机是否全局可拦截的判据
- 据此给出多旋翼拦截器设计指导

## 方案创新

- 提出了针对单目相机的蒙特卡罗粒子滤波定位方法
- 提出了弱通信条件下基于图博弈的自主决策方法

## 方法创新

- 提出了基于图像视觉伺服的多旋翼高机动拦截控制框架
- 提出了可拦截度方法及应用，持续拦截、多视角目标估计、集群拦截等关键技术

## 应用创新

- 为无人机拦截系统提供了空中视角，增加了总体拦截成功率
- 可进一步推广到无人机自主跟踪、多种机型（多旋翼、固定翼）拦截/DJ、集群对抗等多种应用



- 无人机小型化
- 感知更远更全：近视眼和远视眼相结合
- 机动性进一步提高：从打气球到打飞碟
- 拦截效率进一步提高：单机拦截多个气球
- 机型扩展：从多旋翼到固定翼等
- 从单机到多机：结合以上性能进行群体博弈
- 防守策略提升：多地防守、地空协同
- ...





请各位专家批评指正！