智能无人系统控制实践

第六章 外部控制与轨迹规划

作者：戴训华 中南大学

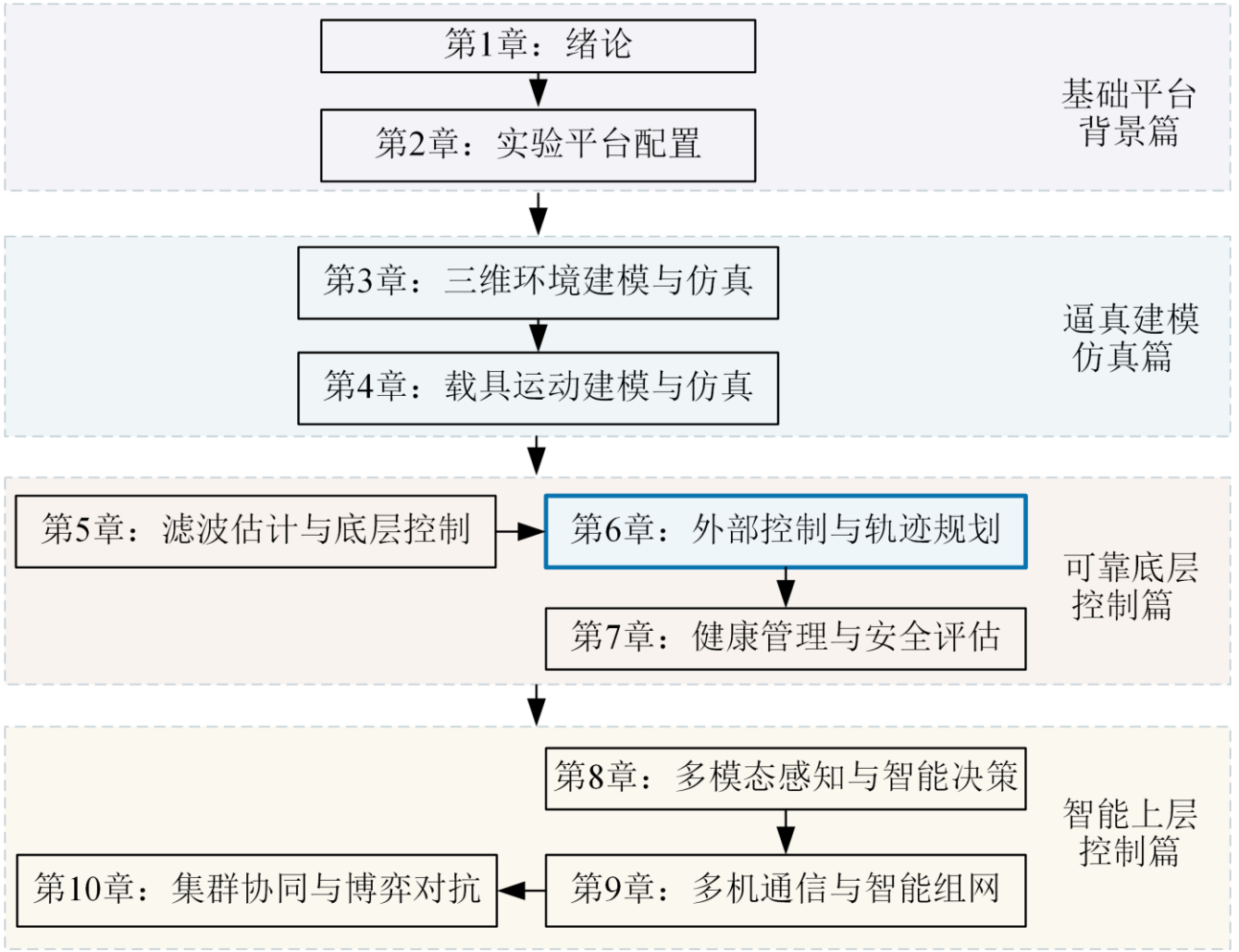
主页：https://faculty.csu.edu.cn/daixunhua

邮箱：dai.xh@csu.edu.cn

平台官网：https://rflysim.com

配套教材





教材：戴训华，全权，任雪峰. 智能无人系统控制实践[M]. 北京：电子工业出版社，2026.

本章学习目标

学完第六章能够完成什么

1. 说明控制层次、指令来源和三种控制模式的分工
2. 连接外部控制接口，发送运动目标并获取状态反馈
3. 生成满足时间、运动限制和避障要求的轨迹
4. 比较参考与实际运动，解释误差并验证任务终态

本章目录

外部控制与轨迹规划：本章学习路线

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层
6.2 外部控制原理与控制模式
6.3 轨迹规划建模与生成
6.4 轨迹规划算法与避障
6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制
6.6 前沿技术与控制方法
6.7 平台框架与通信接口
6.8 外部控制例程与实验验证
6.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

6.1.1 背景意义
教材对应：第6.1.1.1节

6.1.2 控制分层
教材对应：第6.1.1.2节

6.1.3 指令来源与运动参考
教材对应：第6.1.1.3节、第6.1.3节

6.1.4 性能分析
教材对应：第6.1.1.4节

6.1.1 背景意义：任务与运动

能稳定悬停，为什么还不会自动巡检?

巡检任务：到达设施附近，沿线采图，遇障调整路线，返回降落。

稳定响应

保持高度与姿态
抑制风扰与偏差

→

完成运动

决定经过的位置
安排速度与到达时间

→

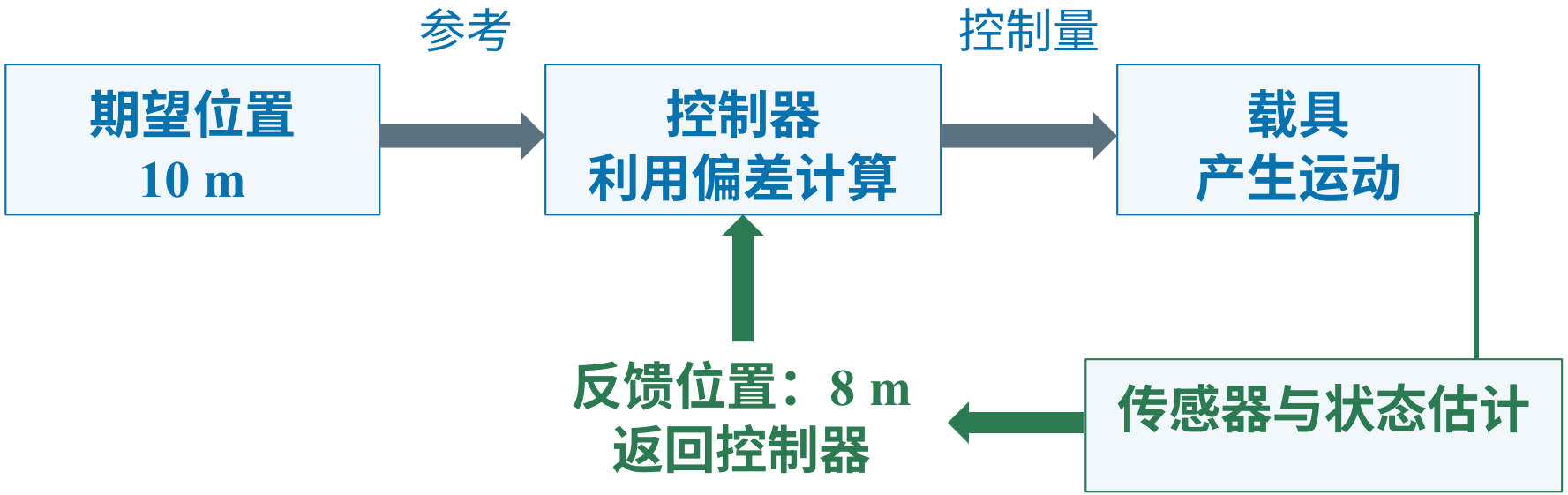
完成任务

判断是否完成采图
处理变化并选择后续动作

稳定控制是起点；自主任务还需要把目标、环境和运动组织起来。

6.1.1 背景意义：闭环作用

参考、反馈和控制量各指什么



参考：
希望达到的量
反馈：
当前状态估计
控制量：
驱动运动的量

$$e = x_{\text{ref}} - \hat{x} = 10 - 8 = 2\ \text{m}$$

本例均采用同一地面坐标系；
误差会随新的观测继续更新。

e 为误差，x_{ref} 为期望位置，$\hat{x}$ 为估计位置。

6.1.1 背景意义：外部控制的价值

保留稳定内环，扩展任务能力

外部控制：控制输入由既有底层控制系统（如自驾仪）之外的模块计算，如地面站、机载计算机或仿真平台，经有线或无线链路交给底层执行。

任务落地：把“沿设施巡检”转成目标序列，兼顾效率、安全约束与状态反馈。

计算扩展：利用机载或地面计算资源处理图像、规划与学习算法。

模块复用：保留已有估计与控制环，复用任务逻辑；接口和运动限制仍需适配。

研发迭代：分开检查规划、指令和响应，使仿真对照及算法替换更直接。

接口把任务算法接入载具，也把状态反馈和执行约束带回算法。

本章目录

外部控制与轨迹规划：本章学习路线

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层
6.2 外部控制原理与控制模式
6.3 轨迹规划建模与生成
6.4 轨迹规划算法与避障
6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制
6.6 前沿技术与控制方法
6.7 平台框架与通信接口
6.8 外部控制例程与实验验证
6.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

6.1.1 背景意义
教材对应：第6.1.1.1节

6.1.2 控制分层
教材对应：第6.1.1.2节

6.1.3 指令来源与运动参考
教材对应：第6.1.1.3节、第6.1.3节

6.1.4 性能分析
教材对应：第6.1.1.4节

6.1.2 控制分层：控制分层架构

底层、上层与集群层处理不同尺度的问题

指令／运动参考

状态反馈

集群层	全局任务、各机状态 → 任务分配与协同约束	**巡检：**把设施分配给不同载具， 协调时序、安全间隔与通信
上层	任务、环境与自身状态 → 路线及运动参考	**巡检：**选择接近和绕行路线， 决定在哪里采图
底层	运动参考、状态估计 → 执行器控制量	**巡检：**跟踪运动要求， 持续修正姿态与速度偏差

功能可以分层，反馈不能断开：每一层都需要知道自己的要求是否被执行。

6.1.2 控制分层：功能与部署

“外部”按控制边界划分，不按距离划分

判断边界：以既有底层控制系统为界（定义见6.1.1），与计算机离载具多远无关。



机载不等于底层，地面也不等于集群层；先看职责，再看部署。

6.1.2 控制分层：典型组合

按任务需要组合控制层次

组合	适合的任务组织	仍需核对
仅底层	响应遥控或预设目标，如航拍	人或任务逻辑能否及时给出指令
底层＋上层	单机感知与规划，如智能车	感知是否有效，局部计算是否及时
底层＋集群层	中心统一调度，如灯光编队	中心、通信和各机反馈是否可用
三层整合	全局协同与局部自主，如救援	局部决策与全局约束是否一致

教材的三层整合例是分布式集群；但层次本身不决定集中或分布。

6.1.2 控制分层：任务等级与接口粒度

指令越接近执行器，外部程序承担的控制越多

指令粒度	输入例子	接收方还需完成什么
集群级	三架载具分别巡检三个区域	任务分配、时序协调与冲突处理
任务级	接近设施、沿线采图并返航	环境判断、路线选择与运动参考生成
执行级	位置、速度、姿态 或执行器控制量	由所选入口决定保留哪些内部控制环

以多旋翼为例：位置接口仍使用内部位置等控制环；姿态接口需要外部程序承担更多运动控制。

本章目录

外部控制与轨迹规划：本章学习路线

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层

6.2 外部控制原理与控制模式

6.3 轨迹规划建模与生成

6.4 轨迹规划算法与避障

6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制

6.6 前沿技术与控制方法

6.7 平台框架与通信接口

6.8 外部控制例程与实验验证

6.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

6.1.1 背景意义

教材对应：第6.1.1.1节

6.1.2 控制分层

教材对应：第6.1.1.2节

6.1.3 指令来源与运动参考

教材对应：第6.1.1.3节、第6.1.3节

6.1.4 性能分析

教材对应：第6.1.1.4节

6.1.3 指令来源与运动参考：外部控制框架

人的任务意图通过不同入口进入载具

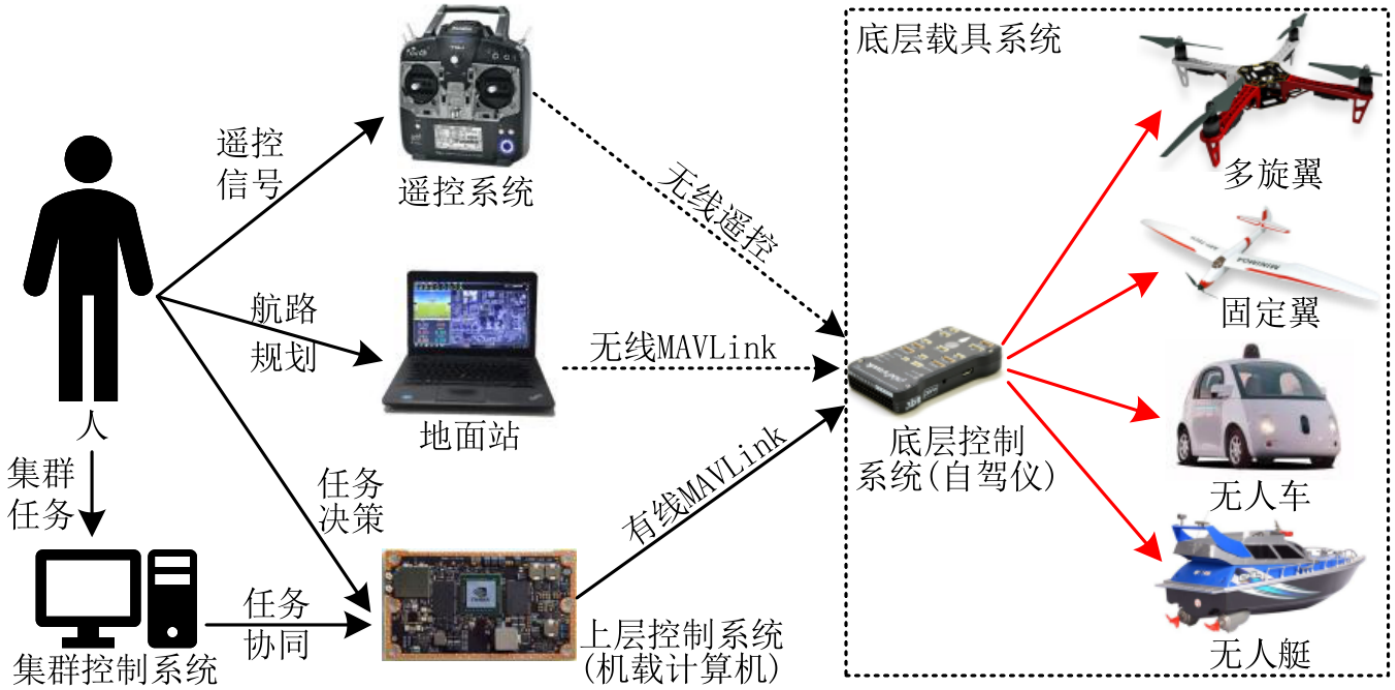


图6.1 无人系统外部控制框架

MAVLink：无人载具常用的消息协议。

实时操控（遥控信号）：
人持续操纵，结合反馈判断。

任务模式（Mission）：
人设定航点，任务逻辑执行（图中称航路规划）。

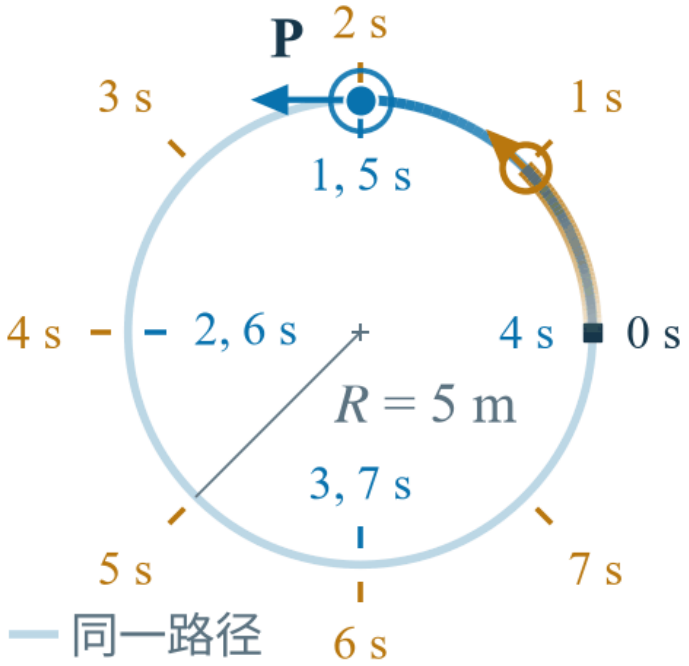
本地自治（任务决策）：
人给定目标与约束，程序根据观测更新运动要求。

图右侧多种载具：
同一分层思路服务不同平台。

6.1.3 指令来源与运动参考：路径与轨迹

同一条路径，可以对应不同的轨迹

同一路径，不同时间安排



$t = 1.00$ s

	速度 v	加速度 v^2/R
● A	7.85 m/s	12.34 m/s^2
○ B	3.93 m/s	3.08 m/s^2

首次到点 P

A 1.00 s　　B 2.00 s

圆上数字：到达时刻

路径：经过哪些位置，不规定到达时刻。

轨迹：规定各位置的到达时刻。

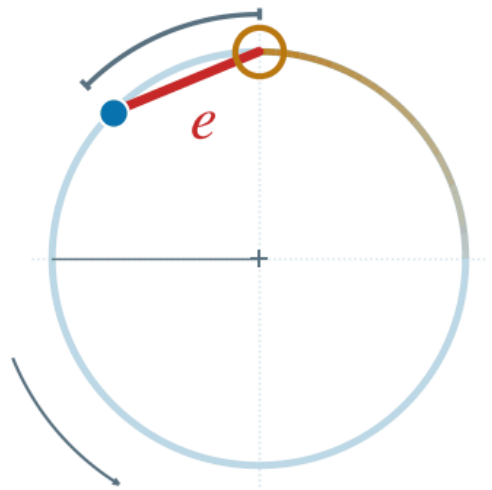
时间安排：同一路线也可对应不同速度与加速度。R为半径，t为经过时间。

路线相同，不代表运动要求相同；时间安排也是规划的一部分。

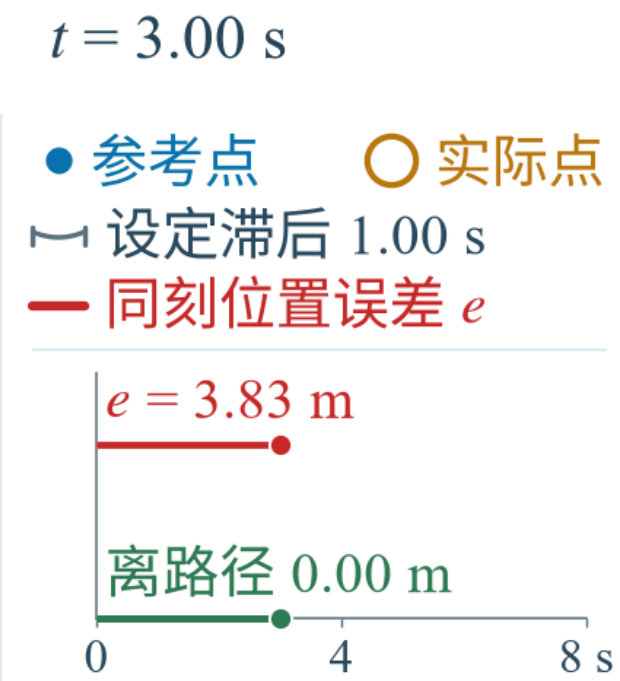
6.1.3 指令来源与运动参考：路径跟随与轨迹跟踪

在路线上，不等于在规定时刻到达

路径正确，仍有时序误差



$R = 5$ m，$v = 3.93$ m/s



路径跟随：关注实际位置是否接近期望路线。

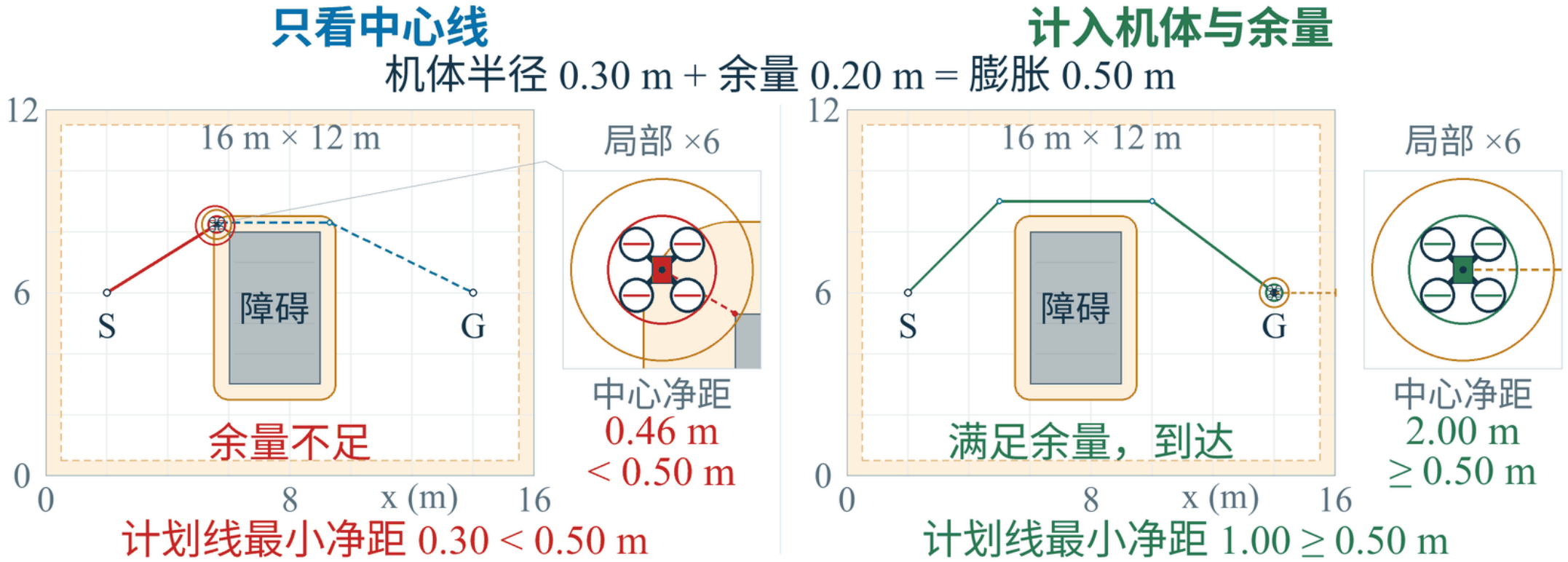
轨迹跟踪：比较同一时刻的参考与实际状态。

圆周例子：两点都在圆上。
v为圆周线速度，
e为同刻两点的直线距离。

只画空间路线会掩盖时序误差；跟踪评价必须把时间对齐。

6.1.3 指令来源与运动参考：路径可行性

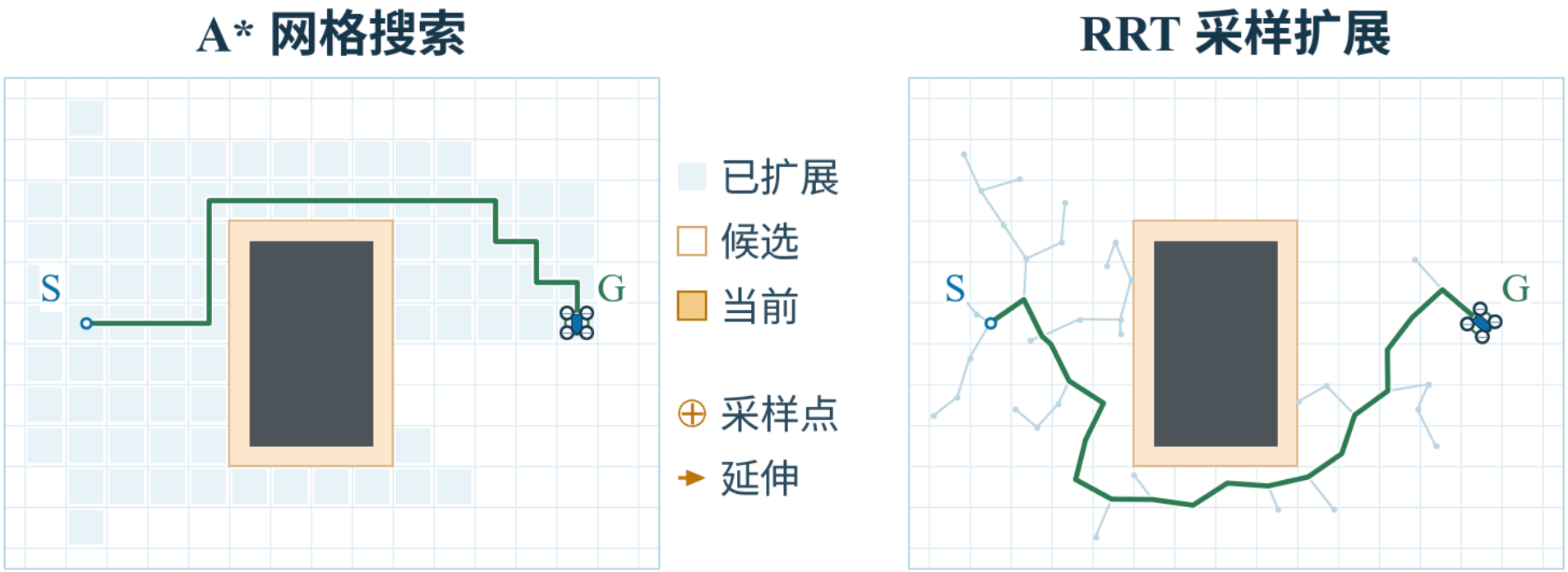
中心线能绕过去，机体也能安全通过吗



图：把机体包络与安全余量计入路线的空间要求

6.1.3 指令来源与运动参考：路径搜索

同一张地图，怎样找到绕行路线



网格连成可行路径　　树枝连成可行路径

图：搜索按代价选择网格，采样向新点延伸；路线还需安排时间

6.1.3 指令来源与运动参考：一步计算

同走10米，匀速段用时决定速度要求

匀速段长10 m，从0 m到10 m；从进入该段开始计时，不含起停。

匀速段用时	匀速段速度	5 s时的位置
20 s	$v = 10/20 = 0.5\ \mathrm{m/s}$	$x(5) = 0.5 \times 5 = 2.5\ \mathrm{m}$
10 s	$v = 10/10 = 1\ \mathrm{m/s}$	$x(5) = 1 \times 5 = 5\ \mathrm{m}$

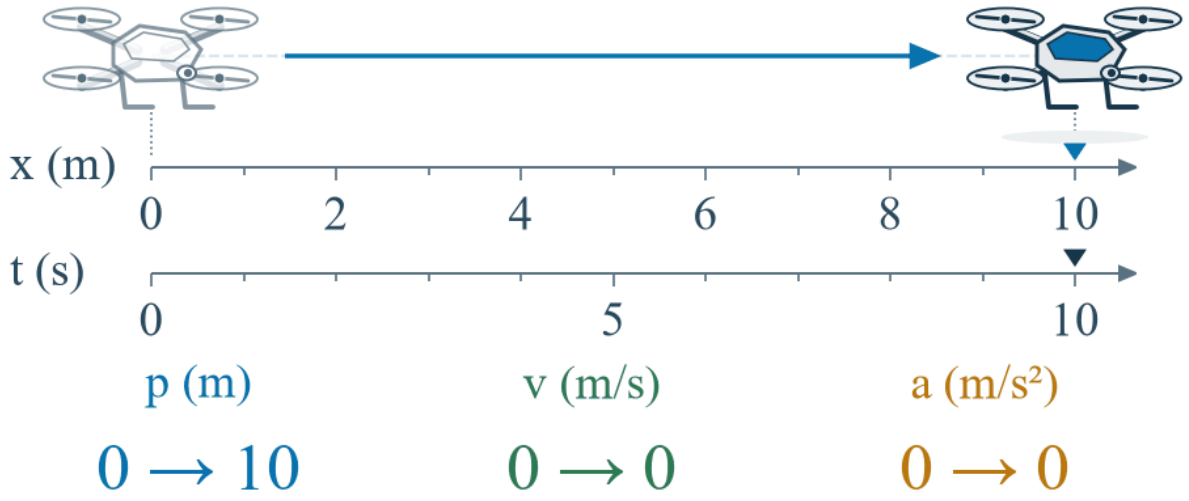
v为速度，x为沿线参考位置；两方案路径相同，时间安排不同。
参考按10 s、实际按20 s运动时，5 s时刻的同刻误差为5−2.5=2.5 m。

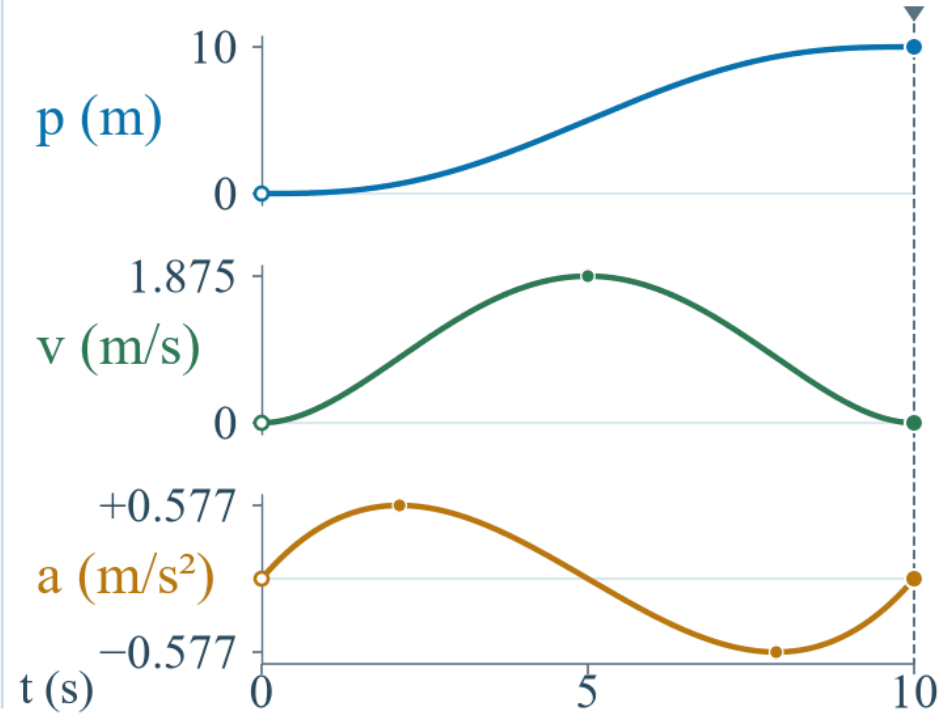
6.1.3 指令来源与运动参考：起停轨迹

从静止出发，再平稳停在目标位置

10 m：静止到静止　　T = 10 s

运动学参考　　起停 v = a = 0





图：同一10 m起停参考的机体位置、速度与加速度

6.1.3 指令来源与运动参考：时间分配

把同一轨迹放慢，能降低多少运动要求

沿用10 m起停轨迹，保持空间形状和归一化运动规律，只把用时从10 s改成20 s。

完成时间	峰值速度	峰值加速度
10 s	$1.875\ \mathrm{m/s}$	$0.577\ \mathrm{m/s^2}$
20 s	$0.9375\ \mathrm{m/s}$	$0.144\ \mathrm{m/s^2}$

$$v_{\max} \propto T^{-1} \qquad a_{\max} \propto T^{-2}$$

时间翻倍：峰值速度减半，加速度降为四分之一；路径长度仍为10 m。

本章目录

外部控制与轨迹规划：本章学习路线

第六章 外部控制与轨迹规划

6.1 外部控制基础与控制分层
6.2 外部控制原理与控制模式
6.3 轨迹规划建模与生成
6.4 轨迹规划算法与避障
6.5 轨迹跟踪原理与高机动控制
6.6 前沿技术与控制方法
6.7 平台框架与通信接口
6.8 外部控制例程与实验验证
6.9 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

6.1.1 背景意义
教材对应：第6.1.1.1节

6.1.2 控制分层
教材对应：第6.1.1.2节

6.1.3 指令来源与运动参考
教材对应：第6.1.1.3节、第6.1.3节

6.1.4 性能分析
教材对应：第6.1.1.4节

6.1.4 性能分析：内部与外部运行

同一位置控制模块，可以放在边界两侧

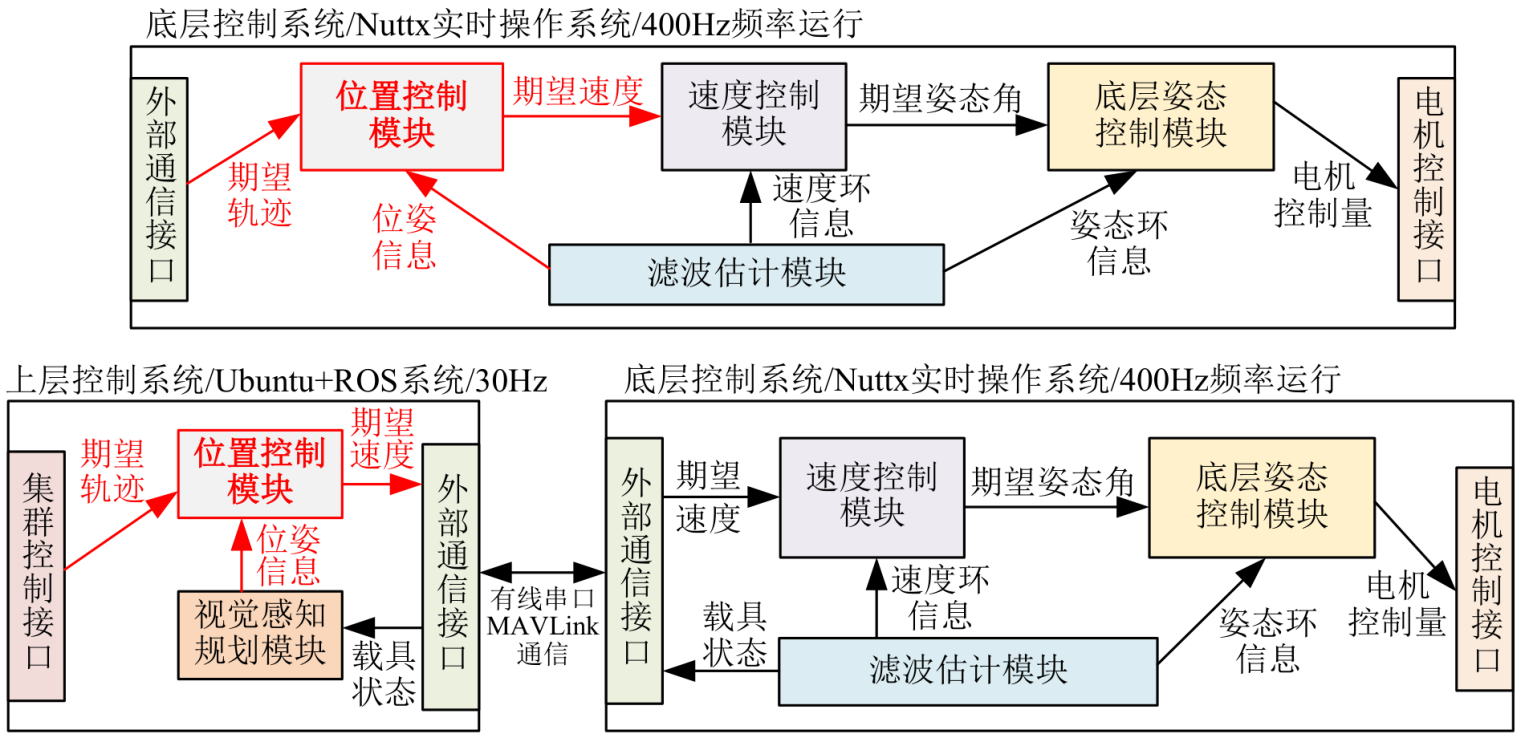


图6.2 轨迹跟踪算法的内部与外部运行框架

NuttX：自驾仪实时操作系统；ROS：模块通信框架；30 Hz、400 Hz为图示配置。

6.1.4 性能分析：内部运行模式

内部运行：位置误差在底层系统内闭合

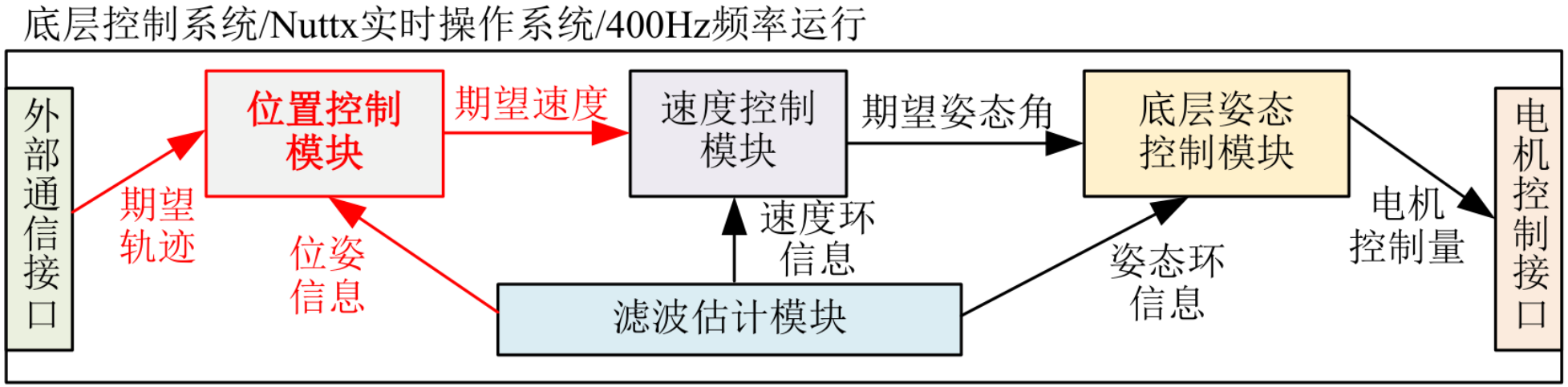


图6.2（上部）内部位置控制

输入：外部给出期望轨迹；位置误差由内部位置控制模块计算。

反馈：滤波估计模块提供位置等状态，内部各控制环继续驱动执行器。

6.1.4 性能分析：外部运行模式

外部运行：把状态送出，再把控制目标送回

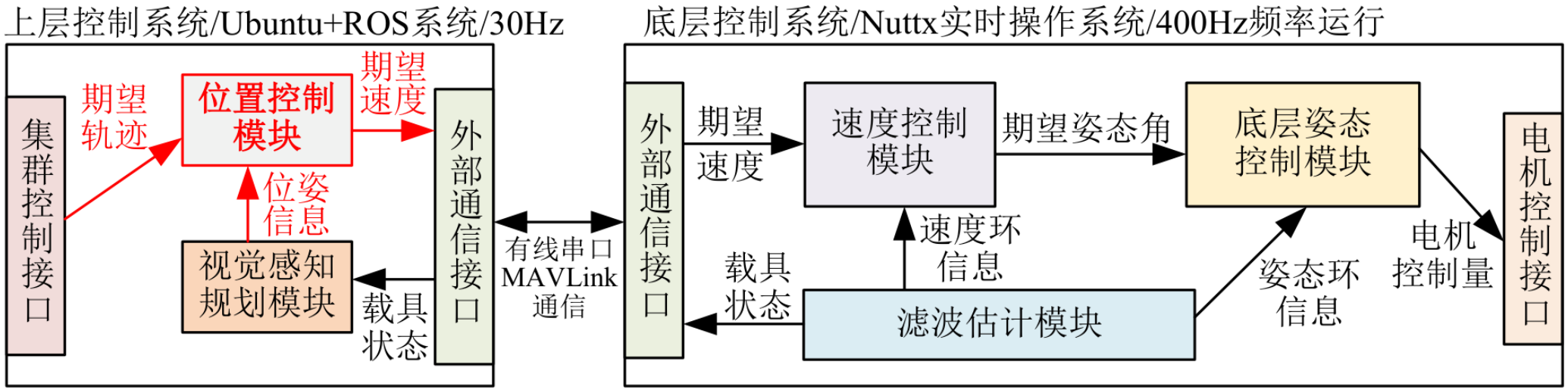


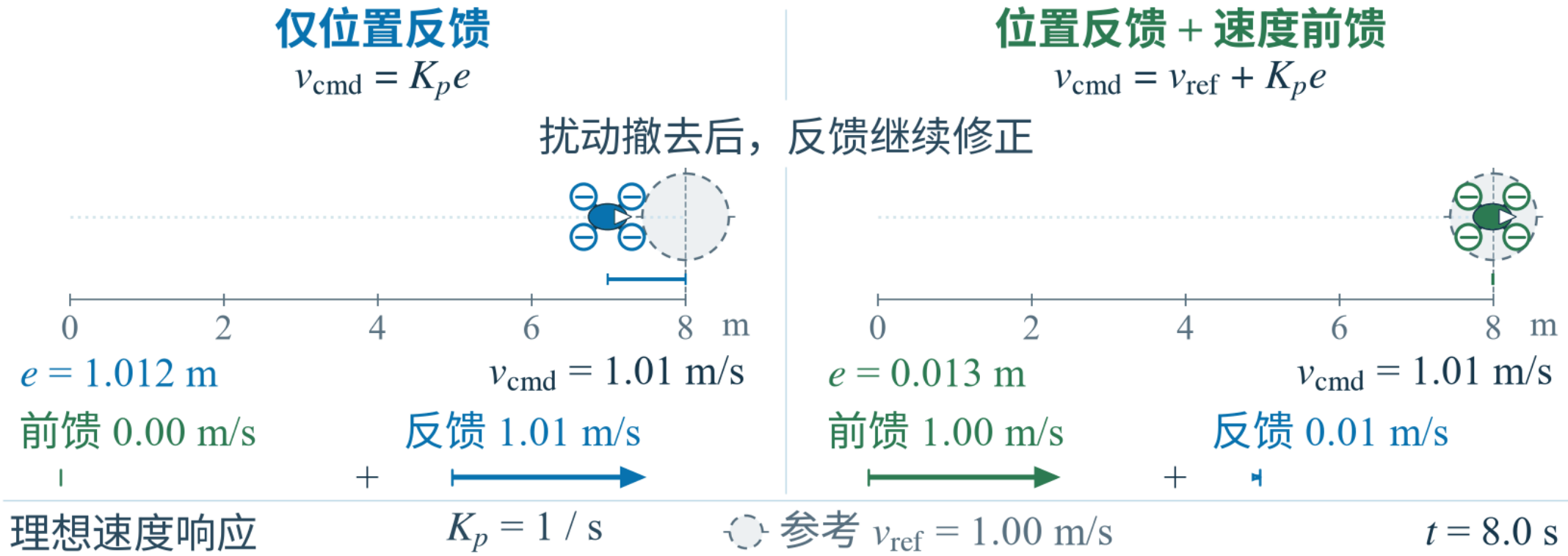
图6.2（下部）外部位置控制

新增的闭环环节：状态上传 → 外部计算 → 指令下传，时效性需要一起评价。

保留的内部控制：速度、姿态及执行器控制仍在底层完成，只有位置环移到外部。

6.1.4 性能分析：前馈与反馈

移动目标还在前进，位置重合也要继续运动



图：相同速度扰动下，仅位置反馈与加入速度前馈的响应

6.1.4 性能分析：频率与时延

更新频率说明多久更新一次，时延说明晚了多久

算例：发送频率50 Hz；一次“状态采样 → 指令生效”耗时100 ms。

$$T_{\text{send}} = \frac{1}{50} = 0.02\,\text{s} = 20\,\text{ms}$$

发送周期：相邻两次发送动作之间的间隔。

$$\tau = 100\,\text{ms} = 5T_{\text{send}}$$

端到端时延：采样到相应控制作用生效的时间。

时延含采样后的调度、计算、传输和执行；除平均值外，还要观察波动。

教材示例：内部运行（实时操作系统）姿态环常为250–1000 Hz；外部程序常为10–50 Hz，且随负载波动；数值随实现而变。

高频发送不能让旧状态变新；控制闭环需要及时而一致的信息。

6.1.4 性能分析：机动要求与执行能力

速度翻倍，转弯所需加速度变为四倍

匀速圆周运动，半径固定为5 m；只比较所需向心加速度。

$$a_c = \frac{v^2}{R}$$

结论：外部运行的更新率与时延限制，在快速、大加速度轨迹中易成性能瓶颈。

速度	向心加速度	时延内参考前移	相对运动要求
1 m/s	$a_c = 1^2/5 = 0.2\ \mathrm{m/s^2}$	0.1 m	比较基准
2 m/s	$a_c = 2^2/5 = 0.8\ \mathrm{m/s^2}$	0.2 m	加速度4倍，前移2倍

其中 v 为速度，R 为半径，a_c 为向心加速度；
$v\tau$为时延τ=100 ms内参考前移的距离（匀速粗估）。

6.1.4 性能分析：开发方法与模型简化

综合模型把控制器与载具响应一起描述



连续运动： 用质点等低阶模型代替载具，可在Simulink、Python中加速仿真与训练。

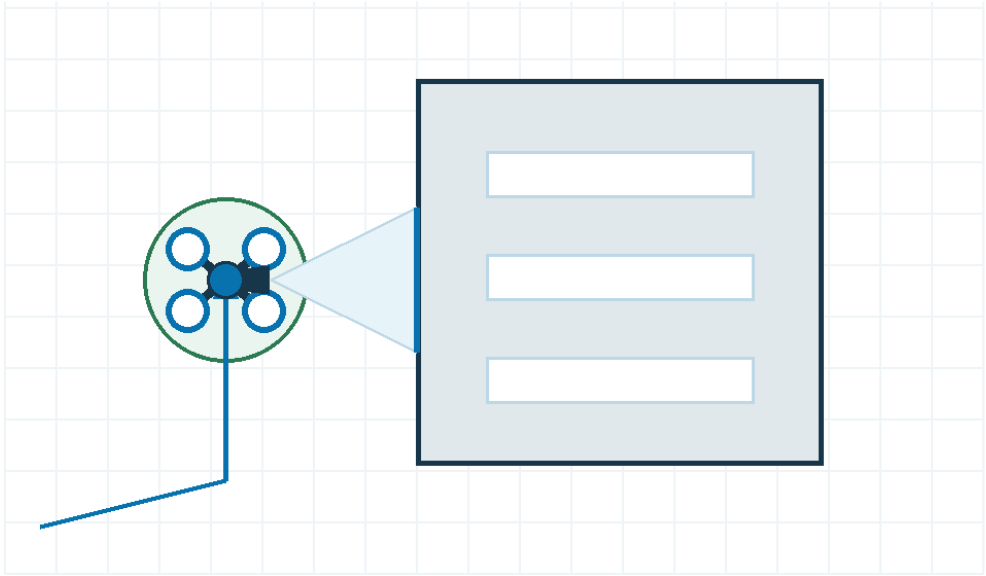
离散任务： 用状态机（按条件切换模式）组织起飞、巡检、返航。

模型边界： 响应有延迟、跟踪速度有限、输出有上限，只在一定范围内适用。

6.1.4 性能分析：任务状态与完成条件

发出了目标，怎样知道巡检真的完成了

定点巡检：到达设施旁，保持稳定，取得图像，再转向下一点。



运动到达

位置误差进入允许范围；
读回状态新鲜，控制模式有效。

稳定停留

保持满足条件达到约定时长；
超出范围就重新计时。

采图确认

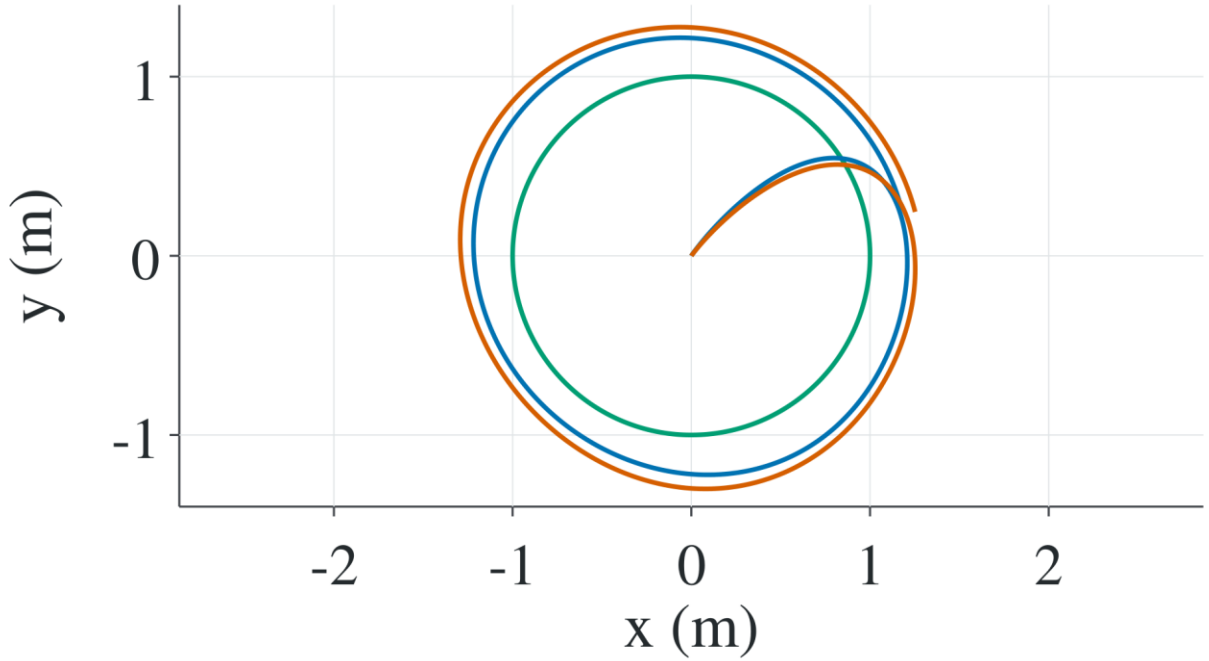
触发相机后确认采集或保存成功，
才将状态切换为前往下一点。

进入范围后，还需停稳与采图。

课件6.7示例取误差≤0.20 m、连续2 s；这些是本例阈值，需按任务调整。

6.1.4 性能分析：模型结果观察

同一参考圆，不同模型给出的响应并不重合



图：圆轨迹模型结果（前1200点，另加绿色参考）

三条曲线（T=10 s圆轨迹）

— 参考输入

— 辨识传递函数模型（sim1.0）

— 非线性机理模型（sim2.0）

两者接近：在该工况下响应相近。

形状偏离：空间响应与参考不同。

半径：参考为1 m，两条输出最大约1.25 m、1.32 m。

同刻误差还需要对齐时间。

6.1.4 性能分析：例程运行

在MATLAB中复现圆轨迹模型对照图

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/6.RflySimExtCtrl/1.BasicExps/e9_TrajectoireFollowing_Segment/e3.1/sim2.0/

入口：Plot_Compare_cercle.m；说明见e3.1/Readme.pdf第4.2节。

步骤：把MATLAB当前目录设为sim2.0 → 运行脚本 → 核对两条输出曲线与图例。

预期：一图两曲线；黑点线为非线性Model，蓝实线为传递函数TF。
图例：Output Cercle T=10s Model/TF；参考图含绿色参考，配色不同，按图例识别。

常见失败：提示找不到数据时，检查当前目录是否为sim2.0，以及其中是否有N4_Step1_cercle_comparaison_T10.mat与N4_Step1_cercle_comparaison_T10tf.mat。

重新生成（可选）：sim1.0、sim2.0各仿真T=10 s圆轨迹并运行Save_Cercle.m；再把sim1.0新存的…T10tf.mat复制到sim2.0；四步见课件6.8.2「保存与比较」页。

6.1.4 性能分析：记录与验证

保留同一时刻的数据，才能检验跟踪效果

圆轨迹图只保留空间形状。要判断是否按时跟上，需要把参考与估计对到同一时刻。

沿北向运动的同刻记录举例（统一坐标，单位为m）

时间 / s	参考位置	估计位置	位置误差
2.0	2.00	1.80	0.20
3.0	3.00	2.75	0.25
4.0	4.00	3.90	0.10

同时记录：控制请求、模式与任务状态，才能把误差和执行过程联系起来。

这是记录格式算例；例程旧MAT文件缺少明确时间列，不能直接当作同刻误差。

6.1.4 性能分析：工程取舍

选择部署位置，要同时考虑性能与研发成本

考虑方面	内部运行	外部运行
接口与时序	信号链路较短，便于统一调度	读状态、发指令，需评估时延
开发与资源	受嵌入式资源和固件流程约束	便于集成感知、规划与学习软件
模型与验证	关注控制环及执行器动态	关注接口响应与任务约束

先满足任务的时效与运动要求，再选择最合适的控制边界和工具。

课堂练习

用五个问题检查控制分工与时效

问题	参考要点
机载程序一定属于内部控制吗?	不一定。按相对于底层系统的边界判断。
始终沿参考圆运动，跟踪就准确吗?	不一定。还要比较同一时刻的参考与反馈。
发送50 Hz，时延就是20 ms吗?	不是。20 ms是发送周期，时延需单独测量。
三层控制系统一定是分布式集群吗?	不一定。教材的三层整合例是分布式集群，层次与决策组织是两个维度。
发送20 Hz、时延150 ms： 发送周期多大？时延是几个周期?	周期1/20 s=50 ms；150 ms=3个发送周期。

课堂练习

用新数据算向心加速度、时延前移与同刻误差

问题	参考要点
圆轨迹半径5 m，匀速3 m/s： 向心加速度需要多大？	$a_c = v^2/R = 3^2/5 = 1.8\ \mathrm{m/s^2}$， 是1 m/s时的9倍。
同上，若端到端时延为150 ms，参考 在时延内前移多远？（匀速粗估）	$v\tau = 3 \times 0.15 = 0.45\ \mathrm{m}$，是1 m/s时的3倍； 速度越高，旧状态造成的偏差越大。
直线段12 m，同时进入： 参考6 s、实际8 s匀速走完； 求4 s时的同刻误差与离路径距离。	参考2 m/s×4 s=8 m，实际1.5 m/s×4 s=6 m； 同刻误差2 m，离路径距离0 m。

本节小结

把任务要求接入可观察、可检验的运动闭环

控制分工：任务与规划确定运动要求，底层控制实现响应，状态反馈支持持续修正。

概念边界：功能层次不等于硬件位置；外部控制也可以运行在机载计算机上。

运动要求：路径描述空间路线，轨迹再规定到达时刻；执行还受载具能力限制。

性能判断：发送周期、端到端时延和跟踪误差分别测量，不能互相替代。

易错点：把发送周期当时延；只看路线不对齐时刻；把机载等同于底层。

同一巡检任务可采用不同控制模式，下一步比较人和程序怎样分工。