



本章目录

RflySim：从算法开发到实机验证

第一章 绪论

- 1.1 概念分类与应用
- 1.2 发展历程与趋势
- 1.3 组成与架构
- 1.4 坐标系与控制原理
- 1.5 装配与调试
- 1.6 RflySim工具链**
- 1.7 学习路线与实验案例
- 1.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

1.6.1 开发背景与平台定位

教材对应：第 1.4 节

1.6.2 设计理念与特点

教材对应：第 1.4.2 节

1.6.3 代表性案例

感知、协同、抗扰与跨载具验证

1.6.4 教学科研与学习入口

系列教材、文档、案例与论文入口



1.6.1 开发背景与平台定位：实验与仿真两条路径

实机实验直观但投入高，仿真灵活但依赖模型

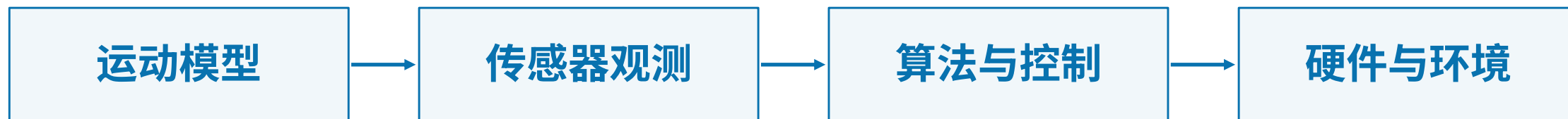
表1.1 基于实验的开发和测试与基于仿真的开发和测试对比

维度	基于实验的开发和测试	基于仿真的开发和测试
安全	旋翼转速高，实验危险性高，特别是对于在校学生	纯软件仿真不驱动实物，降低伤人损机风险；硬件须安全检查。
空间	室内空间小，室外空域难申请	无空域限制，可模拟任意工况、自动注入故障，随时获取状态真值
时间	调试测试耗时巨大，且多花在硬件调试而非算法	可在开发阶段随时进行
成本	硬件成本高、常摔机，且更新换代快	可并发大量用例，成本低、效率高；可信度难保证，多用于开发和功能测试

仿真把可重复的功能测试前移，把实机资源用于关键验证。

1.6.1 开发背景与平台定位：仿真平台的现实挑战

实验平台搭建会分散算法研究精力



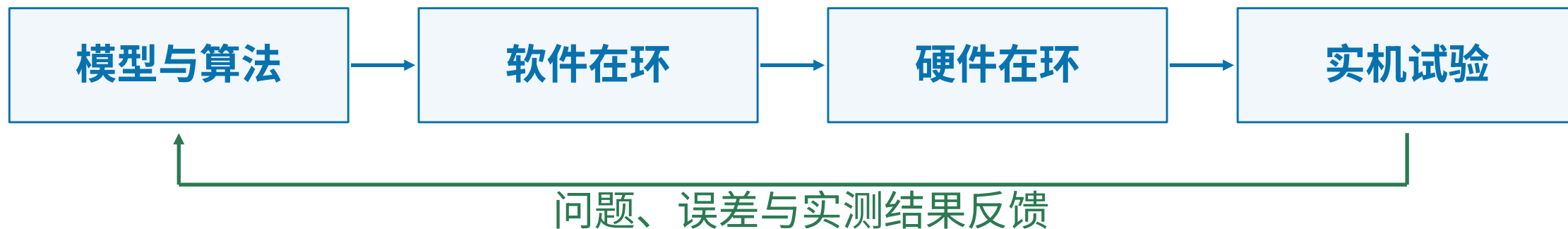
模型状态、观测数据与控制指令通过接口交换

- **接口衔接：**模型状态、传感器数据和控制指令要统一单位、坐标、时间与格式。
- **环境协同：**仿真器、渲染程序、开发环境和硬件各有依赖，单个程序可用不等于系统已经连通。
- **复用价值：**集成后的模型、接口和例程可以用于下一次实验，减少重复搭建。

把模型、观测、算法与硬件接通，是开展系统实验的基础。

1.6.1 开发背景与平台定位：仿真验证系统需求

仿真前置让问题在部署前被发现



- **重复工况：**重新设置初始状态与扰动，比较算法修改前后的运动结果。
- **观察内部：**读取模型状态和参考真值，定位误差从哪个环节产生。
- **扩展测试：**仿真中构造异常，再接入真实自驾仪做硬件在环（半实物）仿真。

测试结果回到模型与算法，形成持续改进的开发过程。

1.6.1 开发背景与平台定位：现有平台及其局限（选讲）

常见仿真平台各有长处和局限

平台	突出长处	主要局限
X-Plane	飞行动力学逼真，支持硬件在环	闭源；多旋翼等小型机支持较弱
FlightGear	开源社区成熟，支持编队与联网飞行	渲染质量与物理精度有限
Gazebo	多物理引擎、传感器仿真与ROS集成	图形渲染一般，场景构建较复杂
jMAVSim	PX4官方轻量仿真器，部署简便	场景与传感模型简化，复杂视觉支持弱
AirSim	基于虚幻引擎（UE）渲染，图像逼真	依赖UE编辑器建场景，硬件要求高

有的平台重动力学，有的重图像，有的支持多机联网，选平台先看任务需求。

1.6.1 开发背景与平台定位：统一性·通用开发框架

RflySim是面向无人系统与具身智能的开发工具链

RflySim: Reliable Flight Simulation, 初衷是可靠飞行仿真, 现已扩展到多类具身无人系统



空地平台：实机任务



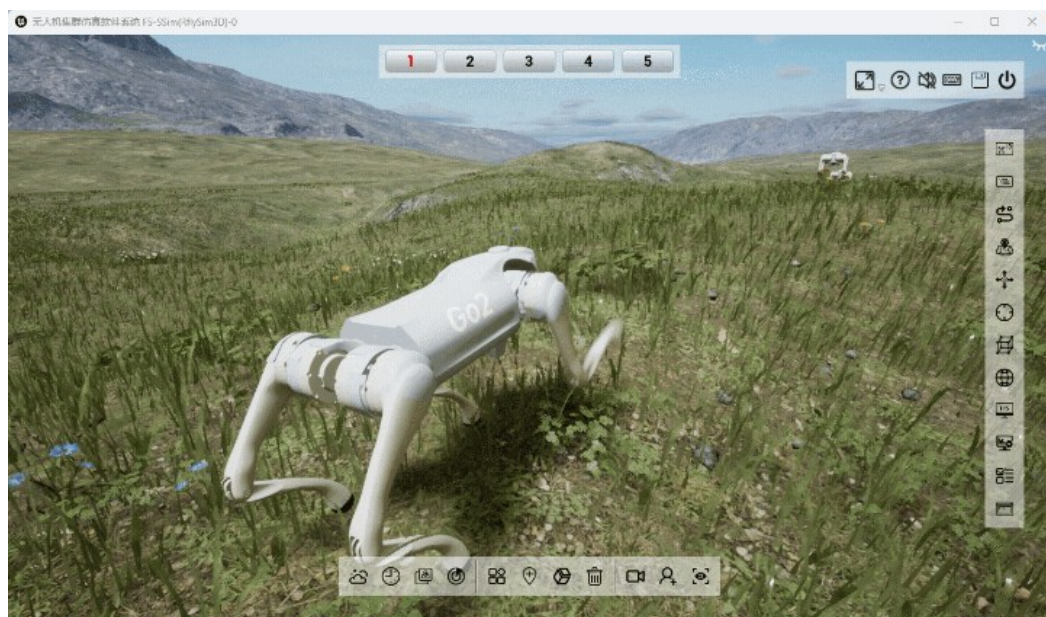
地面载具：驾驶仿真

从飞行系统起步，RflySim将建模、仿真与验证方法扩展到多类载具。

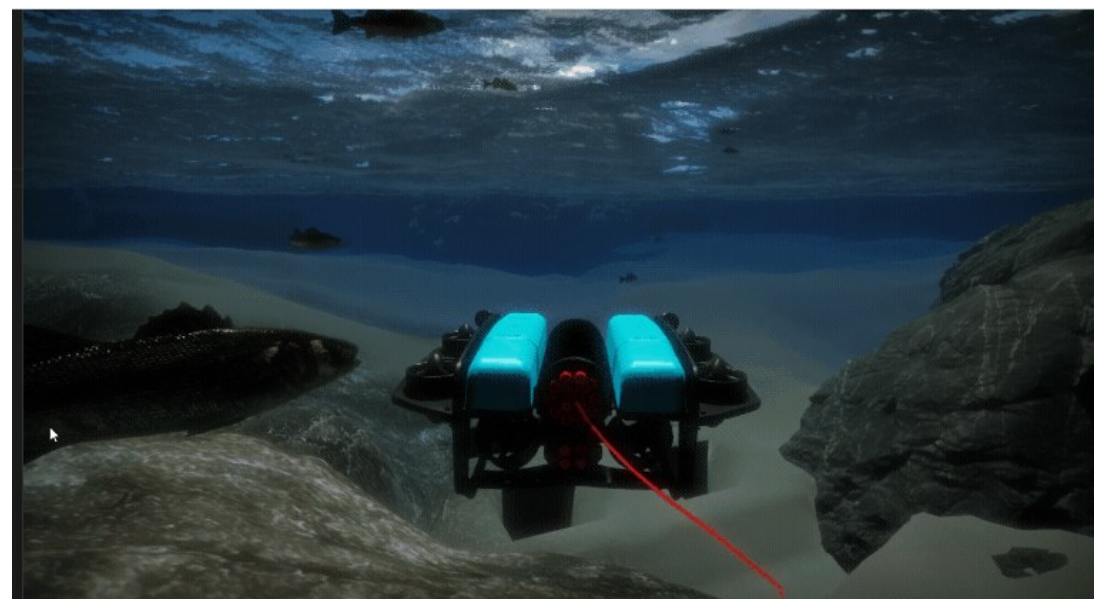
1.6.1 开发背景与平台定位：统一性·跨载具扩展

具身移动与水下探索延续相同开发方法

力、约束与观测条件随载具变化，模型和算法通过接口接入共同框架。



四足平台：具身运动仿真



水下探索：三维运动仿真

通用的是开发与验证流程，载具模型和任务算法随对象变化。

1.6.1 开发背景与平台定位：统一性·多载具模型 同一建模框架提供多种载具模型



图1.17 多种载具三维仿真模型

上排：四旋翼、固定翼、复合翼垂起无人机

下排：无人艇、直升机、无人车

- **建模基础**：用MATLAB中的Simulink图形化工具建模，内置多种载具通用运动模型。
- **参数生成**：改质量、尺寸和动力参数，或用实测数据辨识出新模型。
- **统一流程**：换载具不换方法，仍按建模到评估的流程推进。

模型库让开发不必从零开始，参数辨识让通用模型贴近具体载具。

1.6.1 开发背景与平台定位：功能完整性

各类无人系统：从装配测试到真机部署

工具链集成建模、感知、诊断、规划、控制、组网与集群模块，AI可辅助编写与检查代码。



图：装配测试环节示例（无人机虚拟拆装）

装配测试 →
部件关系与接线

算法开发 →
模型、代码与指标

半实物仿真 →
硬件接口与时序

真机部署
实测数据与改进

在虚拟世界中借助AI，快速完成设计、装配和验证，并快速迁移到载具实体。

1.6.1 开发背景与平台定位：贯穿示例

一个自主导航任务贯穿开发与验证



图：室内自主运动与空地协同（实机）

- **任务目标：**载具观测环境，绕过障碍并到达目标位置。
- **算法分工：**定位估计自身位置，建图表示环境，规划选择路径，控制驱动运动。
- **验证对象：**既看是否到达，也比较轨迹偏差、避障距离和对环境变化的响应。

环境观测

定位建图

路径规划

运动控制

任务效果由观测、规划与控制共同决定，平台支撑整条流程。



本章目录

RflySim：从算法开发到实机验证

第一章 绪论

- 1.1 概念分类与应用
- 1.2 发展历程与趋势
- 1.3 组成与架构
- 1.4 坐标系与控制原理
- 1.5 装配与调试
- 1.6 RflySim工具链**
- 1.7 学习路线与实验案例
- 1.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

1.6.1 开发背景与平台定位

教材对应：第 1.4 节

1.6.2 设计理念与特点

教材对应：第 1.4.2 节

1.6.3 代表性案例

感知、协同、抗扰与跨载具验证

1.6.4 教学科研与学习入口

系列教材、文档、案例与论文入口



1.6.2 设计理念与特点：工具组成

一次仿真由三维显示、运动仿真与地面站协同完成



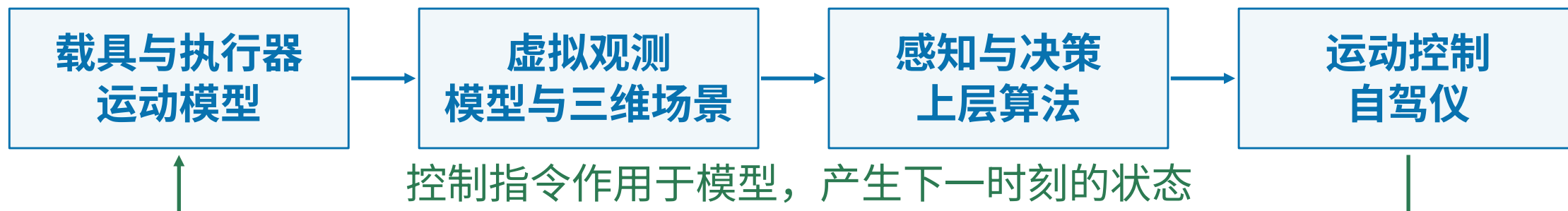
图：RflySim一次仿真的主要软件窗口

- **三维显示：** RflySim3D基于虚幻引擎（UE）渲染场景，生成相机、点云与深度数据。
- **运动仿真：** CopterSim运行载具模型，与PX4自驾仪交换传感器数据和电机指令。
- **地面站：** QGroundControl规划任务，显示位置和姿态。

仿真不只是显示运动，还要让算法的动作改变下一次观测。

1.6.2 设计理念与特点：模块职责

模型、算法、场景与硬件构成开发闭环

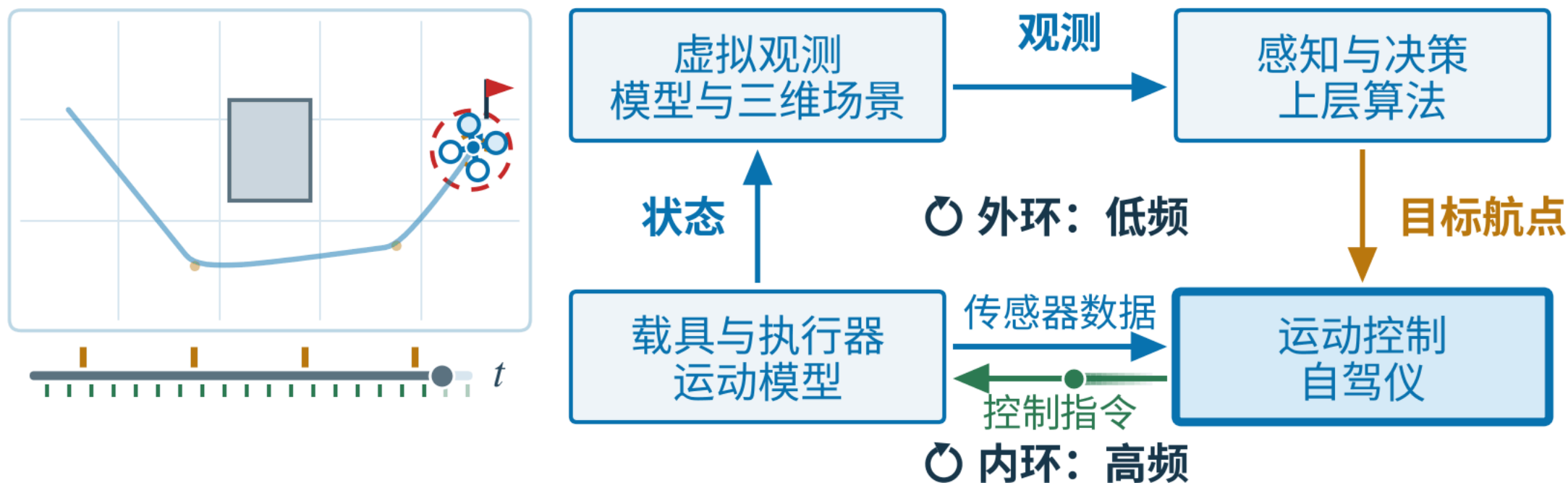


- **运动计算：**运动仿真软件CopterSim按控制输出更新位置、姿态和速度。
- **观测与决策：**三维显示软件RflySim3D生成图像、点云，导航算法据此规划路径。
- **指令与监控：**自驾仪把路径目标变为执行器输出；地面站配置任务并显示状态。

运动状态产生观测，算法给出指令，指令再改变运动状态。

1.6.2 设计理念与特点：闭环时序

内环持续修正运动，外环间歇更新目标



图：多速率闭环教学仿真，示例周期比为5：1，并非平台默认频率

外环更新运动目标，内环在两次目标更新之间持续修正运动。

1.6.2 设计理念与特点：在环验证

软件在环与硬件在环改变运行位置



- **软件在环：** 算法与虚拟载具都在计算机上运行，先比较绕障路线与跟踪误差。
- **硬件在环（也称半实物仿真）：** 真实自驾仪接入闭环，检查接口与实时运行。

接入真实硬件后，可以进一步检查算法实现与硬件运行的配合。

1.6 RflySim工具链

1.6.2 设计理念与特点：高效率·开发测试框架

从软件在环、硬件在环到真机实验逐级验证

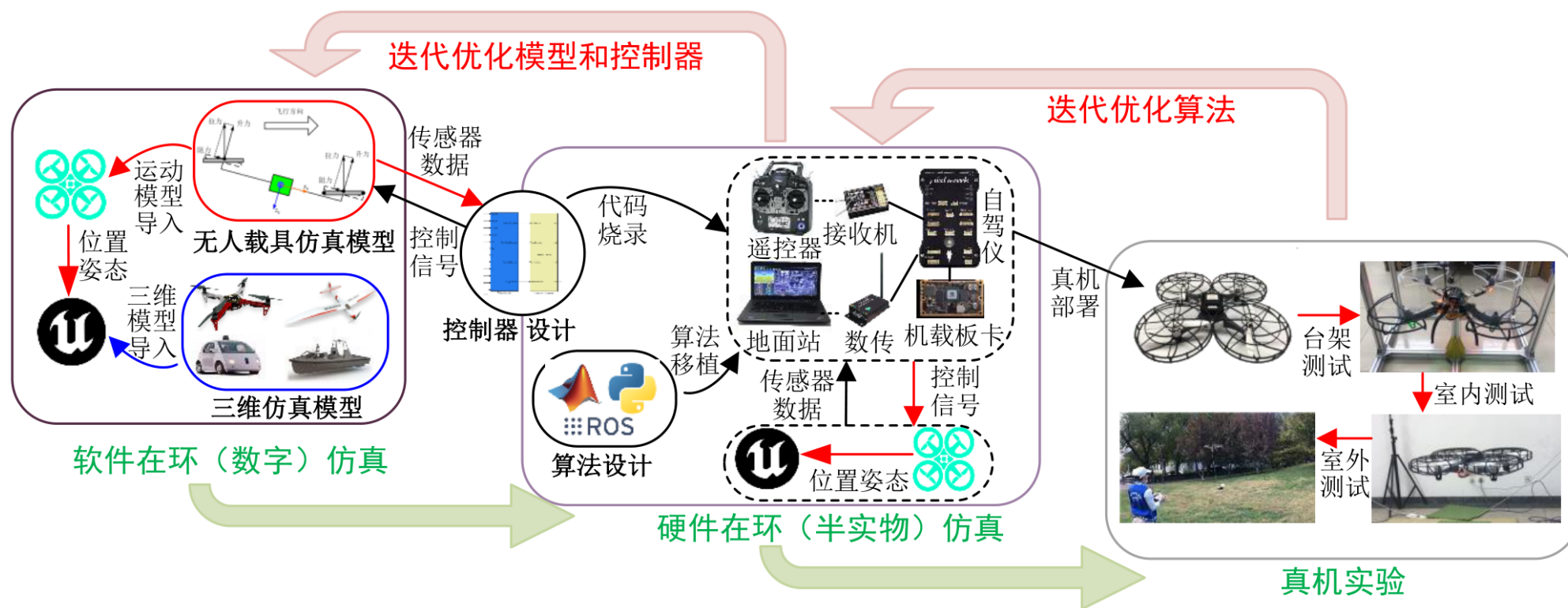


图1.18 RflySim高效开发与测试框架

1.6.2 设计理念与特点：高效率·硬件在环局部

硬件在环：真实控制硬件接入仿真闭环

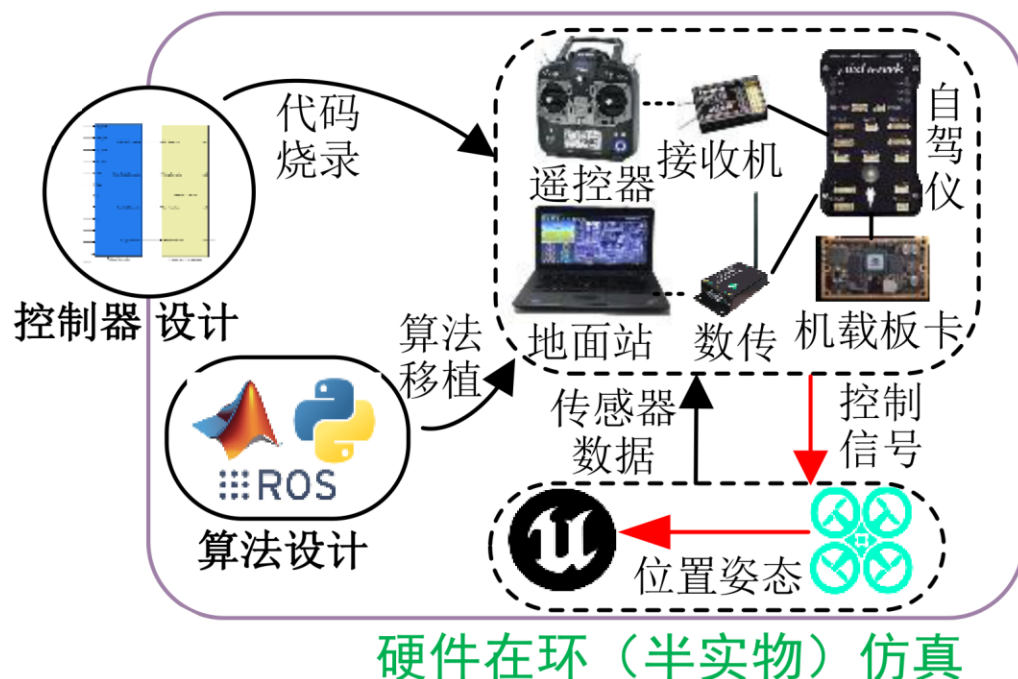


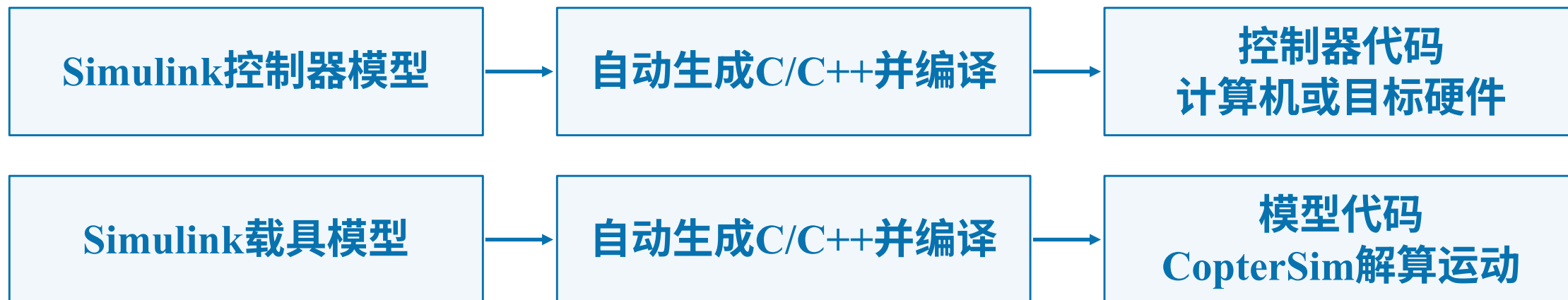
图1.18（局部）硬件在环（半实物）仿真

- **真实设备：** 自动驾驶仪、遥控器与接收机、地面站、数传和机载板卡。
- **仿真提供：** 载具运动与传感器数据，三维场景同步显示。
- **代码烧录：** Simulink控制器生成代码，烧录进自动驾驶仪运行。
- **算法移植：** Python/ROS上层算法移到机载板卡运行。

接入真实硬件，可在可重复工况中检验接口与运行时序。

1.6.2 设计理念与特点：高效率

自动代码生成减少模型与实现的手工转换

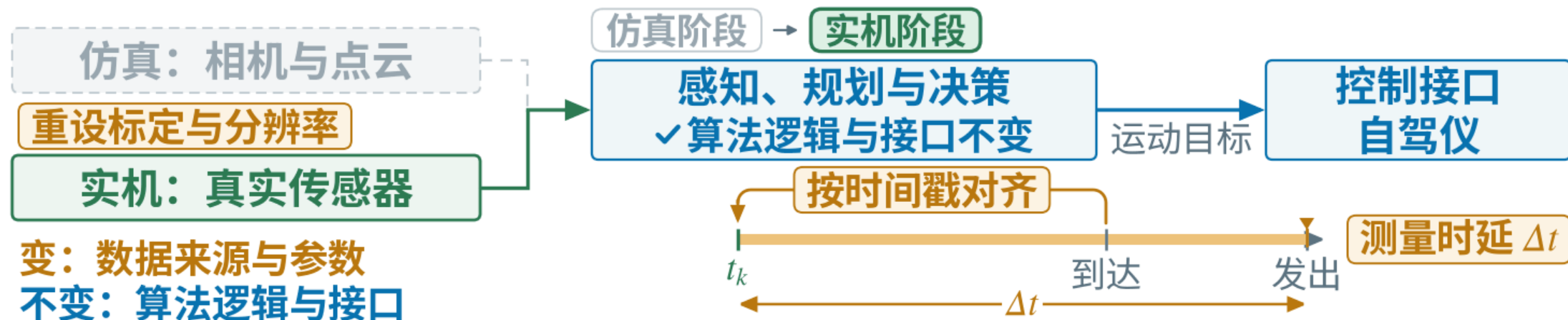


- **控制器代码：** Simulink框图自动生成C/C++代码，编译后在计算机或自驾仪运行。
- **载具模型代码：** Simulink载具模型生成代码，由CopterSim据推力和力矩计算运动。
- **迭代比较：** 修改模型后重新生成、编译，在原工况下比较误差与运行时序。

控制器代码给出指令，载具模型代码计算指令作用后的运动。

1.6.2 设计理念与特点：可迁移性

统一接口支撑感知决策算法迁移



图：仿真到实机的观测源替换与时延对照（示意）

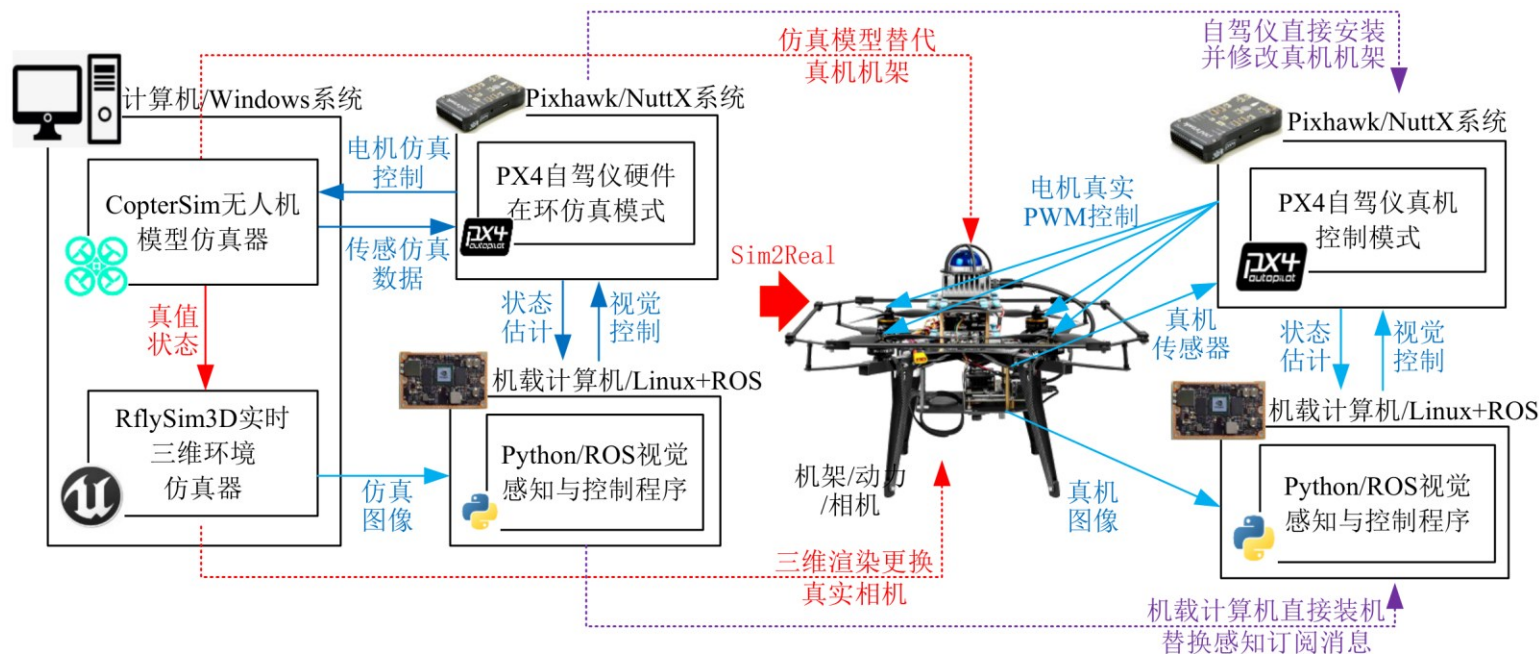
- **替换观测源：**虚拟相机换成真实相机，导航模块仍接收图像并输出运动目标。
- **保留算法结构：**检测、规划与控制接口延续，坐标、单位和消息含义保持一致。
- **适配实际差异：**按实物重设相机标定与分辨率，对齐时间戳并测量端到端时延。

保持算法逻辑与接口连续，可减少从仿真走向实机的改写工作。

1.6 RflySim工具链

1.6.2 设计理念与特点：可迁移性·仿真到真机

仿真到真机（Sim2Real）换数据来源，沿用算法逻辑



(a) “仿真计算机+自动驾驶仪+机载计算机”硬件在环仿真

(b) “机架+自动驾驶仪+机载计算机”真机实验

图1.20 上层感知决策算法从仿真到真机快速迁移

迁移时换上真实机架与相机，自动驾驶仪切到真机模式，感知决策算法沿用。

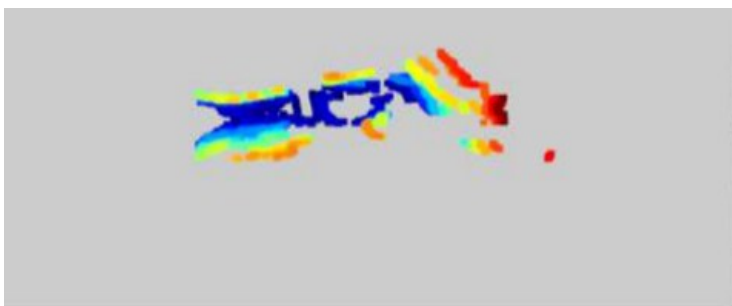
1.6.2 设计理念与特点：高逼真度·场景与传感器 实景纹理与多模态传感器仿真



三维场景（实景纹理）



彩色图像



激光点云



深度图像

- **实景纹理：**借助虚幻引擎渲染，岩壁、水面的纹理与光照接近实景。
- **多模态数据：**可输出彩色图像、激光点云和深度图像，供上层算法使用。
- **算法开发：**为目标识别、定位建图和路径规划等上层感知决策算法提供输入。

多种传感器从不同角度描述同一环境，为感知融合提供验证场景。

1.6.2 设计理念与特点：高逼真度·红外成像

战场场景中的红外吊舱与成像仿真



图：右为战场场景，左为伪彩与灰度红外视图

同一三维环境连接载具运动与图像观测，可重复检查视角和遮挡变化。

- **红外成像：**
按热辐射成像，
温差大更醒目。
- **伪彩与灰度：**
同一红外强度的
两种显示。
- **视线遮挡：**
吊舱转向与机动
改变可见区域。

1.6.2 设计理念与特点：集群规模

分布式运行支持多载具共同实验

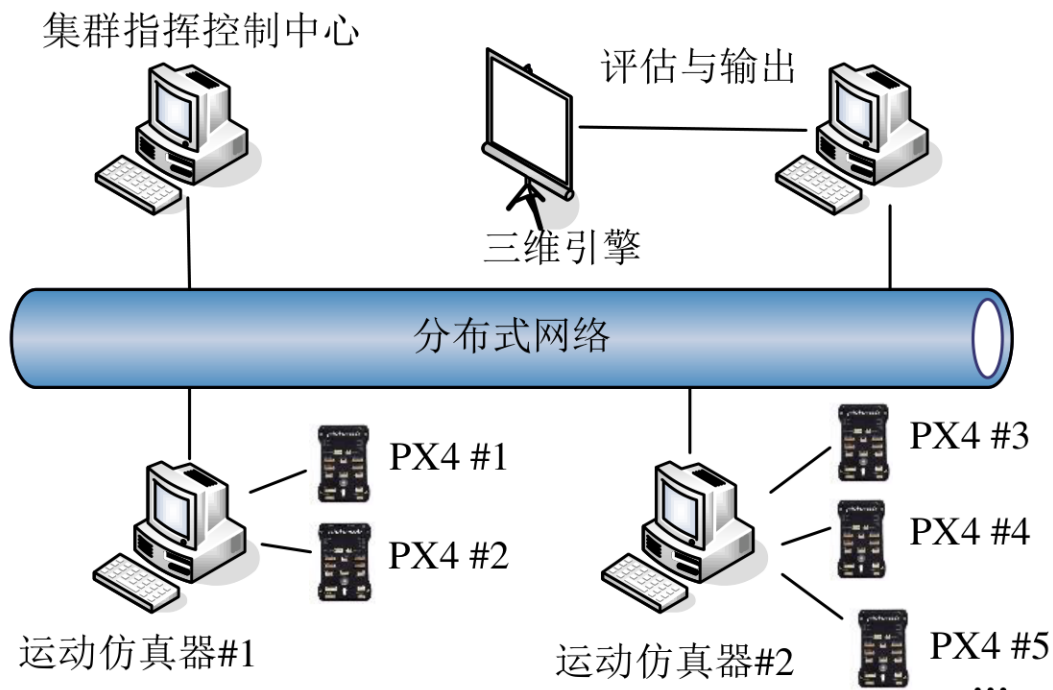


图1.21 多电脑分布式仿真拓扑图

- **运动仿真器**：每台计算机连接多个PX4自驾仪，计算各自载具的运动。
- **三维引擎**：在共享场景中显示全部载具并生成视觉数据。
- **指挥与评估**：指挥中心下发共同任务，评估计算机记录结果。
- **规模约束**：图像频率、模型复杂度和网络时延限制实时规模。

多节点分担计算并交换状态，支持共同任务中的多载具验证。

1.6.2 设计理念与特点：易用性

集成环境和配套例程减少重复搭建

- **集成环境：**在Windows上一键部署，含Windows的Linux子系统（WSL）中的Ubuntu与PX4编译环境。
- **配套例程：**基础与进阶例程已接通模型、算法、接口和场景，先运行一次作为基准。
- **有依据地修改：**保留基准工况，每次只改一个模块或参数，比较路径、误差与耗时。
- **持续复用：**保存配置、代码与记录，下一个算法直接复用接口和测试条件。

复用环境、接口和例程，把更多时间用于算法修改与实验比较。

1.6.2 设计理念与特点：七项特点

七项特点共同支撑连续开发

- **统一性**：多类载具使用共同的开发与验证框架。
- **易用性**：集成环境与配套例程减少重复搭建。
- **高效率**：模型自动生成代码，软/硬件在环逐级验证，加快修改后的比较。
- **高逼真度**：虚幻引擎渲染实景，可生成彩色、深度、点云和红外数据。
- **可迁移性**：连续的算法实现与接口减少部署改写。
- **集群规模**：分布式运行扩展多载具共同实验。
- **功能完整性**：建模、感知、诊断、规划、控制、组网与集群模块衔接。

平台优势来自各环节的衔接与复用，共同服务于开发和验证。



本章目录

RflySim：从算法开发到实机验证

第一章 绪论

- 1.1 概念分类与应用
- 1.2 发展历程与趋势
- 1.3 组成与架构
- 1.4 坐标系与控制原理
- 1.5 装配与调试
- 1.6 RflySim工具链**
- 1.7 学习路线与实验案例
- 1.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

1.6.1 开发背景与平台定位

教材对应：第 1.4 节

1.6.2 设计理念与特点

教材对应：第 1.4.2 节

1.6.3 代表性案例

感知、协同、抗扰与跨载具验证

1.6.4 教学科研与学习入口

系列教材、文档、案例与论文入口



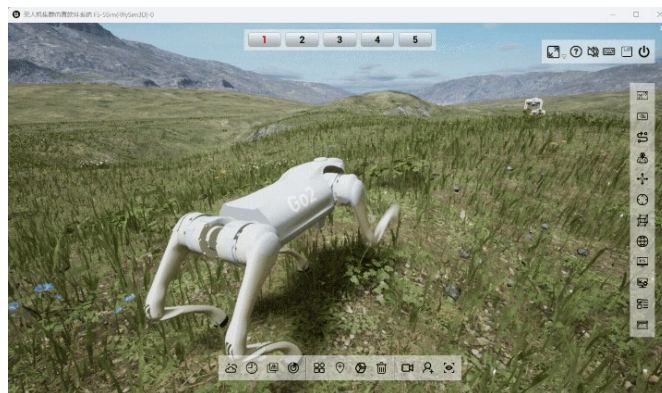
1.6.3 代表性案例：任务分组与共同结构

任务决定验证重点，载具决定模型适配

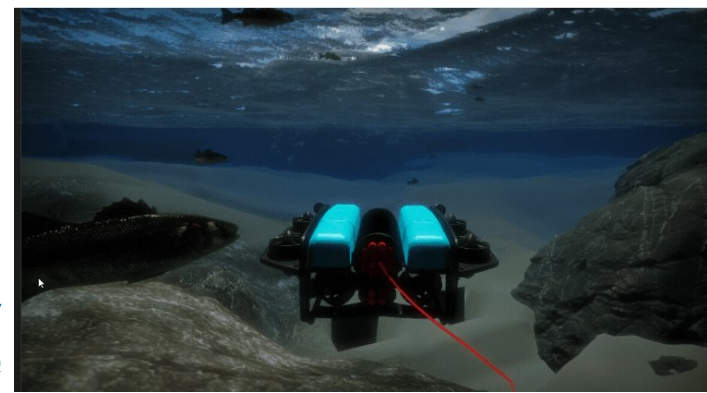
潜航器仿真



飞行器
实机



四足
仿真



感知

决策

控制

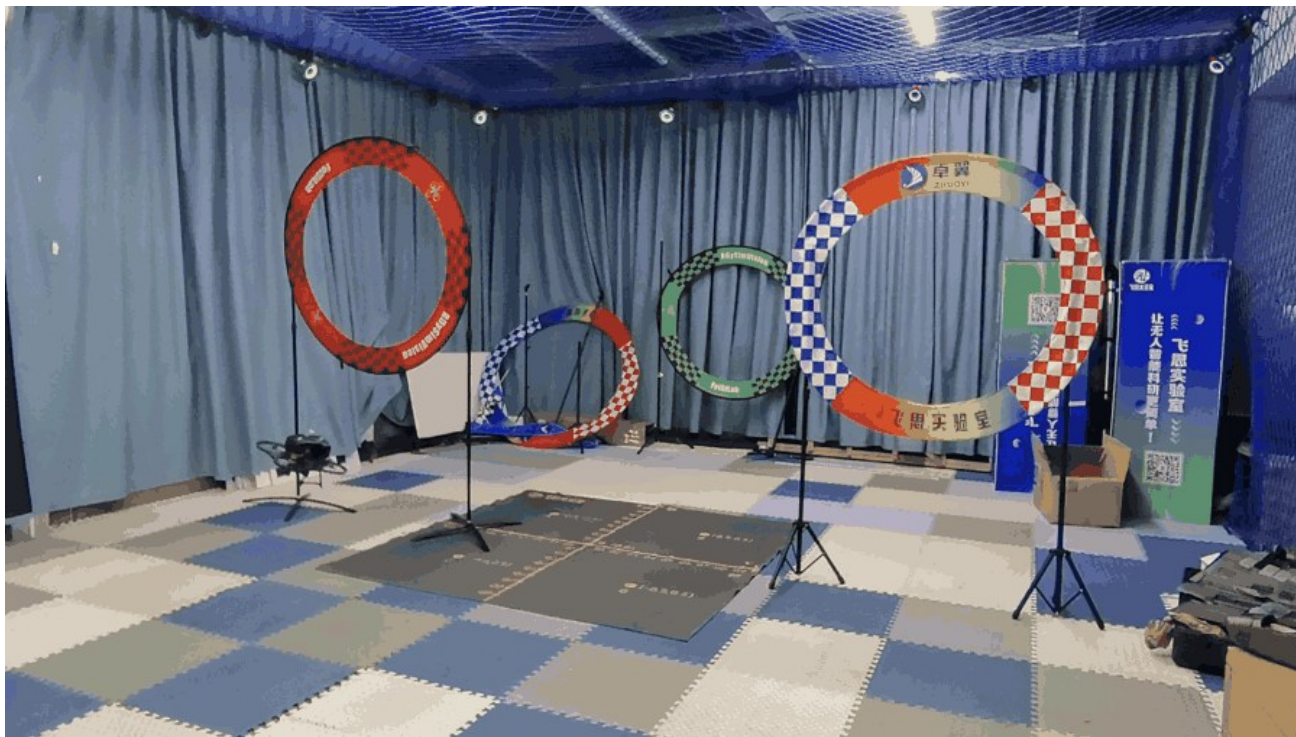
环境交互

- **感知与运动**：穿环与SLAM，比较观测与轨迹执行。
- **协同任务**：降落、吊运与编队，比较相对运动与协作。
- **故障与扰动**：电机失效与阵风，比较偏差与恢复过程。
- **跨载具**：尾座、四足与水下，适配受力模型、观测与接口。

任务与载具会变化，观测、决策、行动和反馈的关系持续存在。

1.6.3 代表性案例：感知与运动耦合

高机动穿越需要感知、规划与控制协同



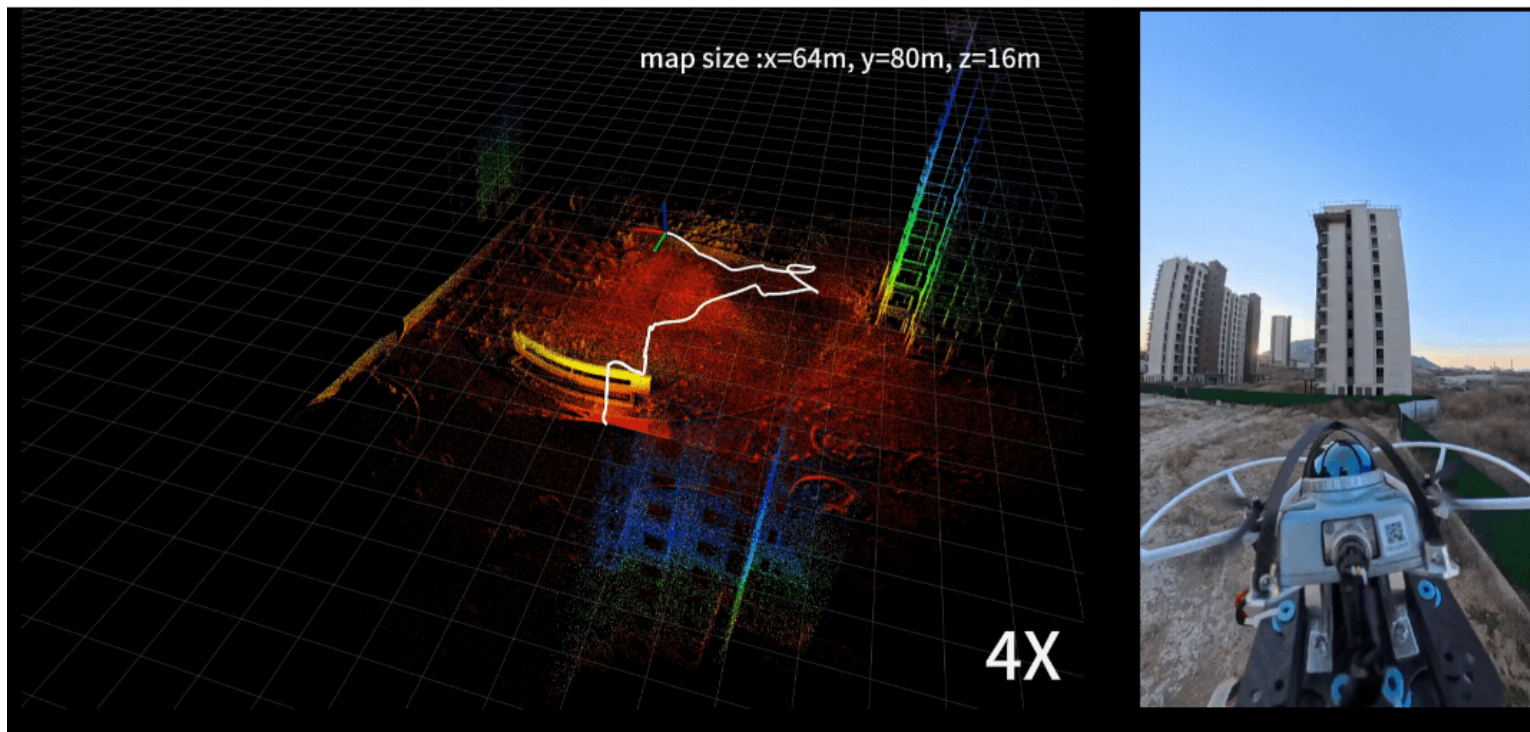
图：多旋翼实机连续穿越

连续穿越把环境观测、轨迹规划和运动控制放到同一任务中。

- **任务行为：**多旋翼连续通过圆环，运动方向和机体姿态随路径变化。
- **关键配合：**环境观测约束路径，控制跟踪路径并应对运动中的偏差。
- **仿真作用：**先比较不同路径、速度和扰动下的轨迹，再开展实机验证。

1.6.3 代表性案例：感知与运动耦合

定位建图把传感器观测变成地图



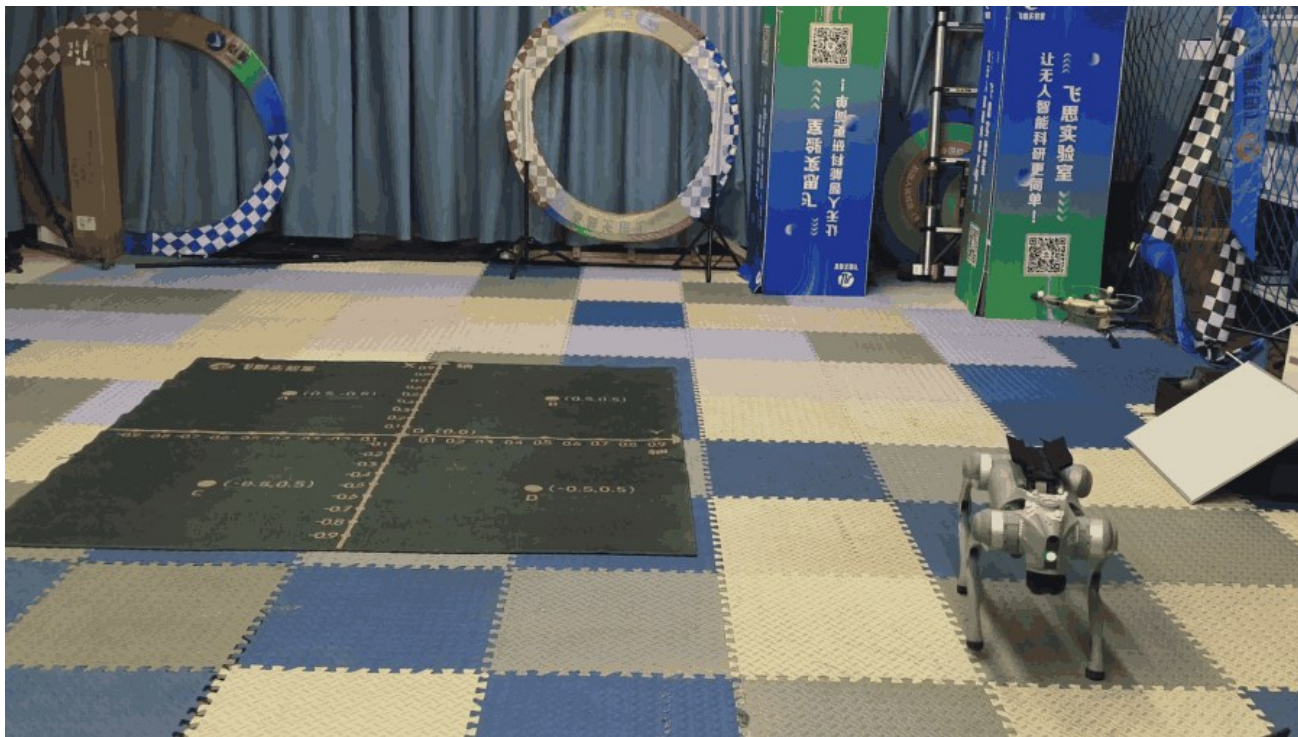
图：实景观测与定位建图（原片4倍速）

位置估计与环境地图相互支撑，为自主运动提供依据。

- **观测积累：** 载具运动时不断获得新的环境观测，形成空间结构信息。
- **定位建图：** 同时定位与建图（SLAM）联合估计载具位置和环境地图。
- **验证条件：** 仿真能配置场景与观测，并用参考状态比较估计误差。

1.6.3 代表性案例：跨平台与载荷耦合

空地协同需要控制平台间的相对运动



图：多旋翼降落到移动四足平台（实机）

地面平台持续移动，使协同控制的目标随时间变化。

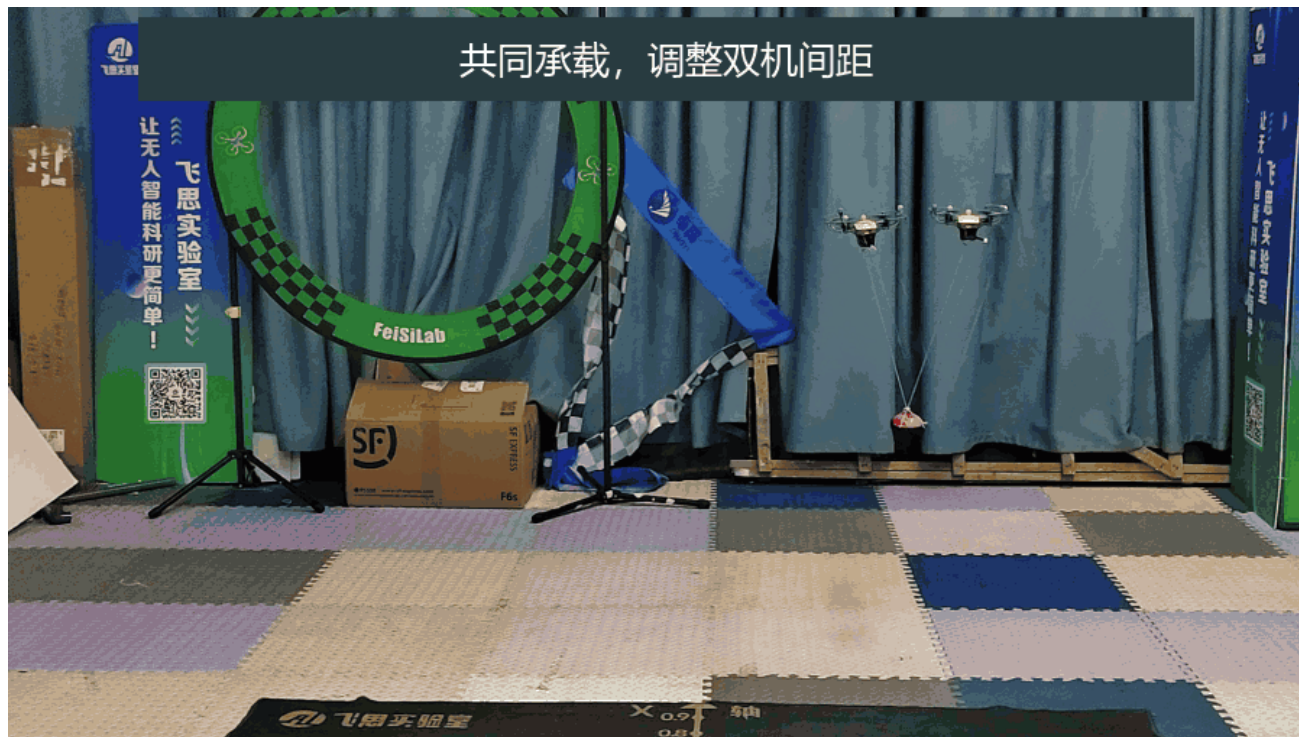
- **平台组合：**飞行器与地面机器人组成空地系统，分别提供空中和地面运动能力。

- **相对状态：**两平台之间的位置、速度和朝向共同影响接近与降落过程。

- **共同验证：**在共享场景中改变平台运动，比较跟踪和协同控制的响应。

1.6.3 代表性案例：跨平台与载荷耦合

双机协同吊运需要协调共同载荷



共同承载，调整双机间距

- **共同载荷：**双机通过吊绳连接同一载荷，运动相互影响。

- **协同目标：**保持各机受控，并调整载荷位置、姿态与摆动。

- **建模价值：**多刚体与约束模型描述绳索、载荷和飞机之间的作用。

图：双机协同吊运与载荷调整（实机）

共同载荷把两机运动耦合起来，协同目标包括载荷的姿态。

1.6.3 代表性案例：故障与新构型

电机失效与阵风展示不同的异常响应



图：单电机失效与阵风工况仿真

- **两类工况：**先展示单电机失效，再展示阵风作用下的运动。
- **作用差异：**电机失效改变执行器能力，阵风引入外部扰动。
- **重复测试：**配置故障或扰动条件，记录姿态、轨迹与控制响应。

执行器失效改变动力能力，外部扰动改变受力，两者可分别重复测试。

1.6.3 代表性案例：跨载具

尾座式构型的仿真与系留试验

仿真 垂直起飞



实机 室内系留



- **构型特点：**机头向上进行垂直起降，前向飞行时机体改变姿态。

- **仿真起飞：**虚拟机体离地上升，用于观察垂直阶段的运动与控制。

- **系留试验：**实机在吊索约束下运动，检查实际系统在此条件下的响应。

图：尾座式仿真起飞与室内系留试验

仿真计算飞行响应，系留试验观察实机在约束下的运动。

1.6.3 代表性案例：跨载具与多机扩展

四足机器人把移动与机械臂操作结合起来



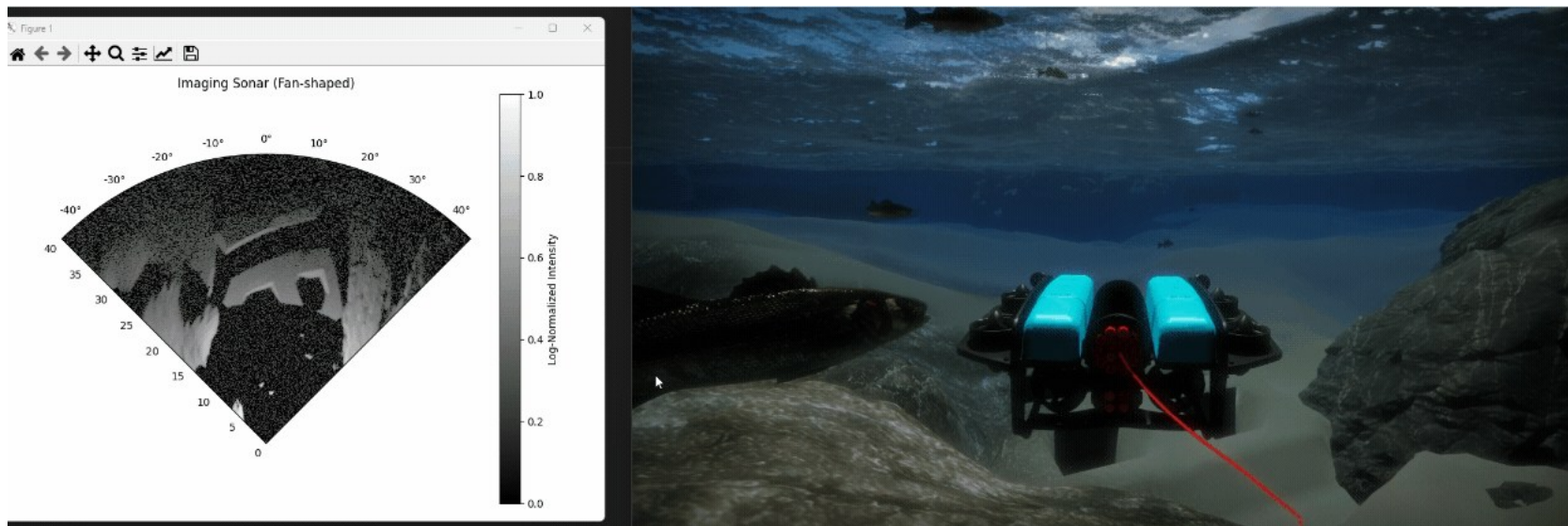
图：四足移动操作（实机）

- **系统组成：**四足底盘提供移动与支撑，机械臂调整末端相对于环境的位置和姿态。
- **动作过程：**接近操作板、站立抬臂、回收机械臂，构成移动与操作的连续环节。
- **运动关系：**机体位置与姿态改变后，机械臂的可达范围和接触位置也随之变化。
- **通用方法：**模型、观测、控制与环境交互继续组成开发与验证框架。

具身系统把环境观测、移动与操作组织为完整的任务行为。

1.6.3 代表性案例：跨载具与多机扩展

水下载具同样需要感知与运动验证



图：成像声呐扇形图（左）与水下场景（右）仿真

- **声呐读图：**扇形左右方向为方位角，约 $\pm 40^\circ$ ；半径为距离，亮度表示回波强度。
- **差异与复用：**浮力、水动力和观测条件要重新建模，框架、接口与测试流程可复用。

跨载具复用开发框架，具体运动和观测模型按环境重新配置。

1.6.3 代表性案例：协同任务

多机编队把单机控制扩展为协调任务



图：多机实飞编队

- **单机基础：**每架飞机保持自身运动受控，才能进一步完成共同任务。
- **群体关系：**队形、相对位置和任务分配增加了载具之间的协调需求。
- **扩展验证：**分布式仿真可先比较节点与通信变化，再安排实机编队试验。

多机任务同时依赖单机运动控制与载具之间的协调。

1.6.3 代表性案例：结果比较

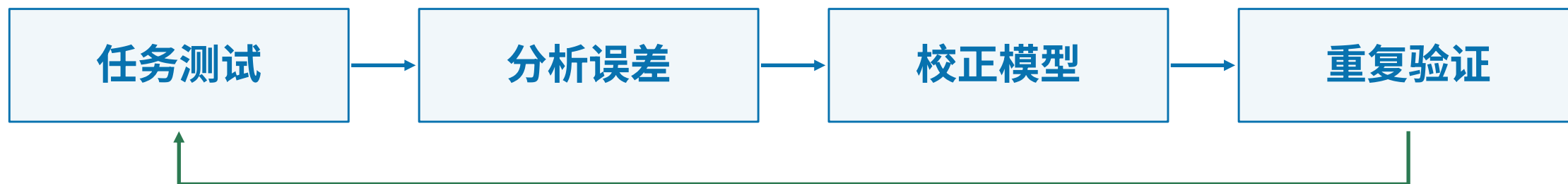
任务结果可以用明确指标比较

- **连续穿越：** 轨迹误差、最小避障距离和任务通过率反映路径执行效果。
- **空地协同：** 相对位置与速度误差反映跟踪和接近过程的质量。
- **协同吊运：** 载荷位置误差、姿态偏差与摆动幅度反映共同作业效果。
- **故障响应：** 姿态偏差、恢复时间和轨迹变化反映电机失效或阵风后的运动响应。

指标把任务行为转成可比较的结果，支撑算法的迭代改进。

1.6.3 代表性案例：可信验证

模型与实测数据共同支撑验证结论



实测数据与算法输出共同参与比较

- **实现一致：** 连续的代码与接口减少不同实现造成的差异，便于沿用已有测试。
- **模型校正：** 根据运动、传感器和执行器的实测结果调整模型参数与误差描述。
- **工况覆盖：** 在明确的速度、载荷和环境范围内测试，并检查关键异常条件。

用实测差异校正模型，再重复测试，逐步提高结论的适用性。



本章目录

RflySim：从算法开发到实机验证

第一章 绪论

- 1.1 概念分类与应用
- 1.2 发展历程与趋势
- 1.3 组成与架构
- 1.4 坐标系与控制原理
- 1.5 装配与调试
- 1.6 RflySim工具链**
- 1.7 学习路线与实验案例
- 1.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

1.6.1 开发背景与平台定位

教材对应：第 1.4 节

1.6.2 设计理念与特点

教材对应：第 1.4.2 节

1.6.3 代表性案例

感知、协同、抗扰与跨载具验证

1.6.4 教学科研与学习入口

系列教材、文档、案例与论文入口



1.6.4 教学科研与学习入口：系列教材

系列教材连接飞行器原理与无人系统实践



设计与控制基础



多旋翼控制实践



固定翼飞控实践



无人系统综合实践

从任务出发，在载具原理、控制方法与仿真实践之间反复求证。

1.6.4 教学科研与学习入口：官方入口

官方文档、案例视频与论文入口

工具链文档

查框架、快速入门、手册与开发接口。

<https://rflysim.com/doc/zh/index.html>

案例视频

看任务的仿真、硬件在环或实机表现。

<https://rflysim.com/doc/zh/0.Show/videos.html>

生态论文

读问题、方法、实验条件与结果。

<https://rflysim.com/doc/zh/0.Show/papers.html>



图：RflySim统一入口首页

本节小结

可重复验证贯穿无人系统开发

- **开发初衷：**降低实验平台搭建与试错门槛，让更多时间投入算法研究和系统理解。
- **核心机制：**模型、观测、算法、接口和硬件连续衔接，支持分阶段验证与反馈修改。
- **实际任务：**从穿越、建图到协同作业和具身系统，研究对象变化而验证方法可以复用。
- **学习承接：**1.7将结合知识基础与研究目标，安排学习路线和配套实验。

把问题尽早带入可重复实验，再逐步走向实际系统验证。