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 RflySim工具链

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 RflySim工具链

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

运动模型 → 传感器观测 → 算法与控制 → 硬件与环境

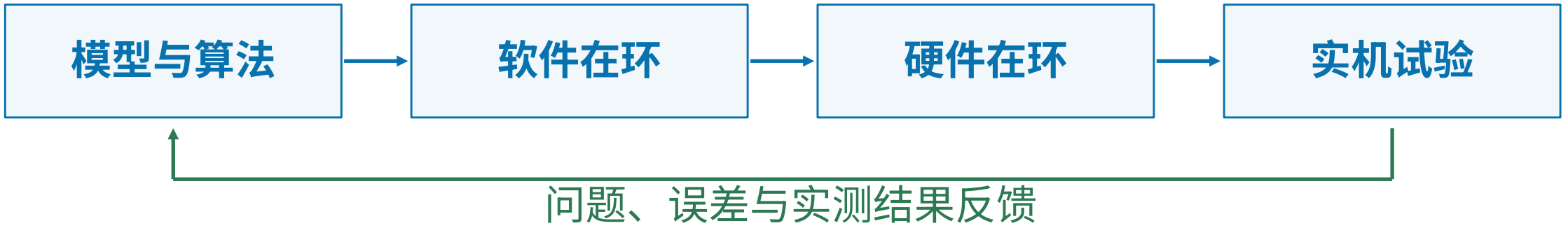
模型状态、观测数据与控制指令通过接口交换

- **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 RflySim工具链

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

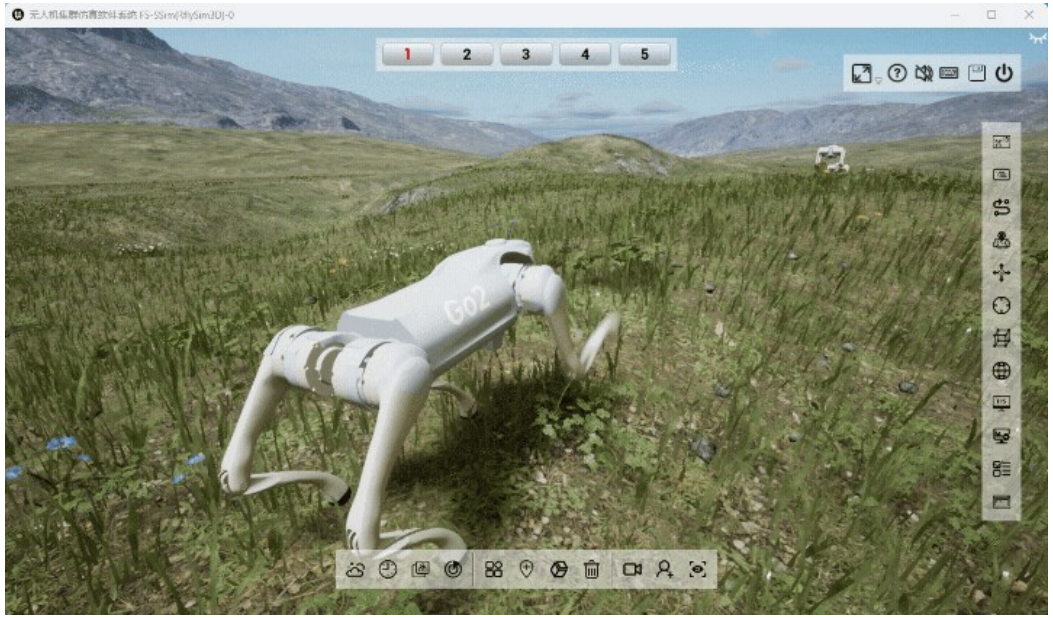
从飞行系统起步，RflySim将建模、仿真与验证方法扩展到多类载具。

1.6 RflySim工具链

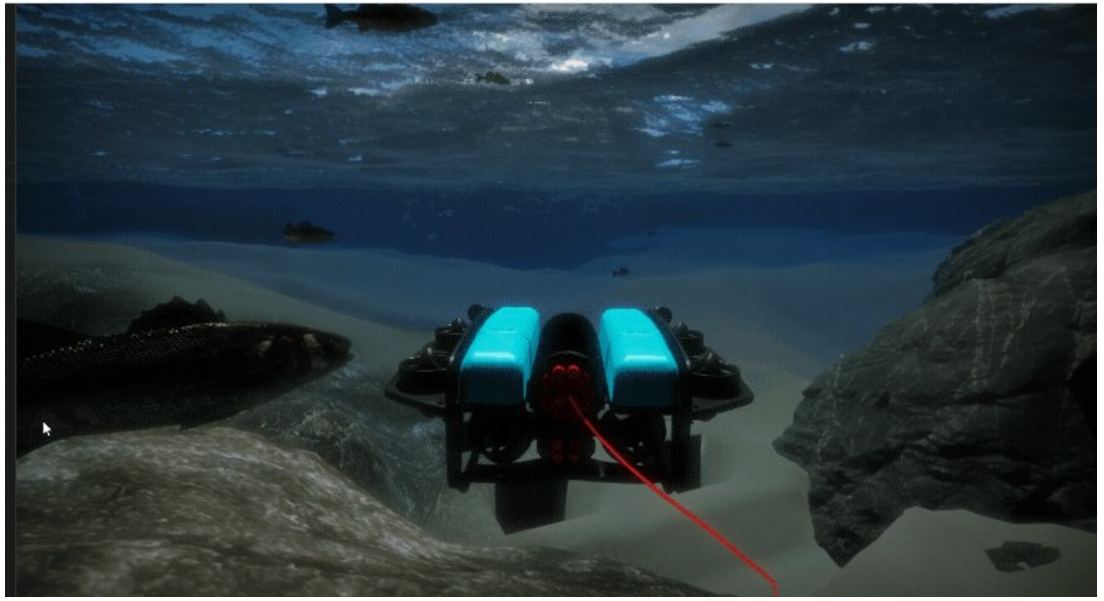
1.6.1 开发背景与平台定位：统一性·跨载具扩展

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

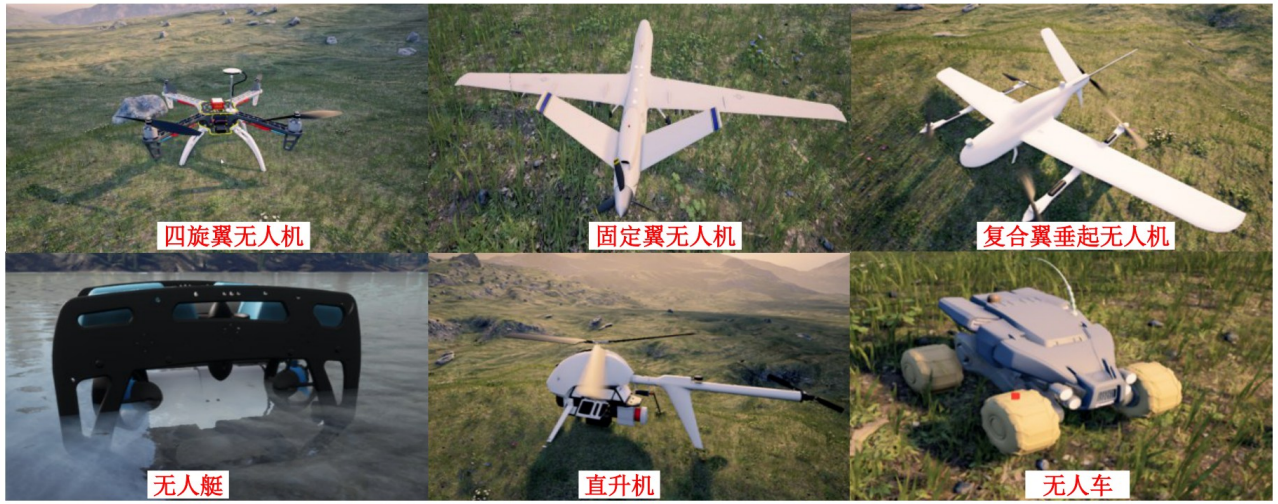


图1.17 多种载具三维仿真模型
上排：四旋翼、固定翼、复合翼垂起无人机
下排：无人艇、直升机、无人车

- **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 RflySim工具链

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



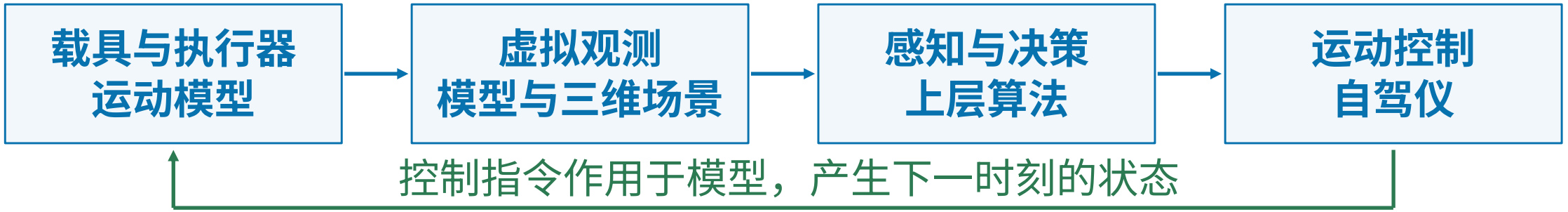
图：RflySim一次仿真的主要软件窗口

- **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

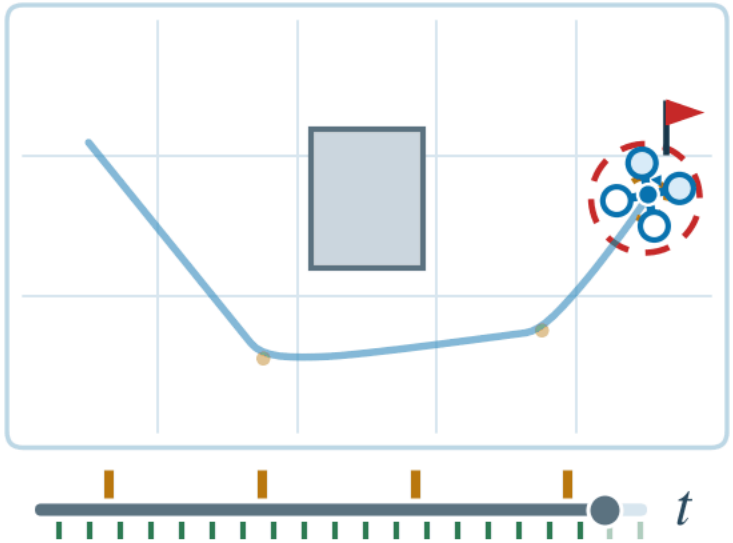


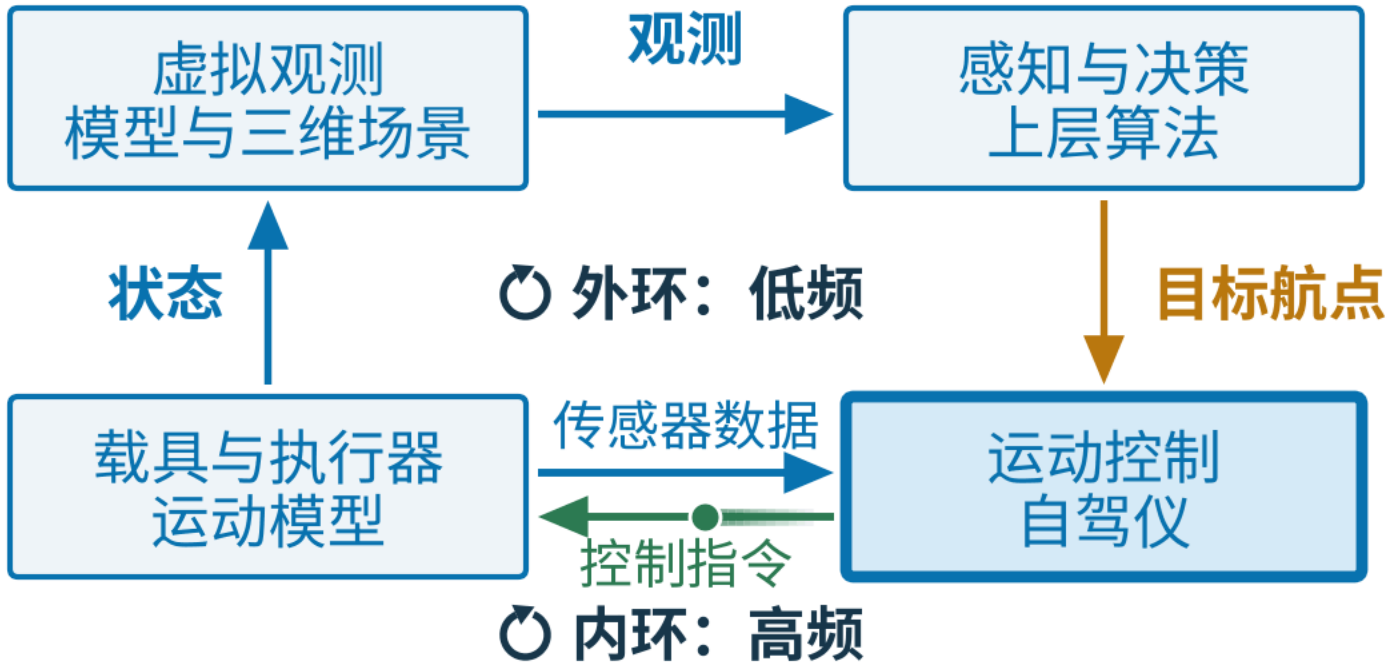
- **运动计算：**运动仿真软件CopterSim按控制输出更新位置、姿态和速度。
- **观测与决策：**三维显示软件RflySim3D生成图像、点云，导航算法据此规划路径。
- **指令与监控：**自驾仪把路径目标变为执行器输出；地面站配置任务并显示状态。

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



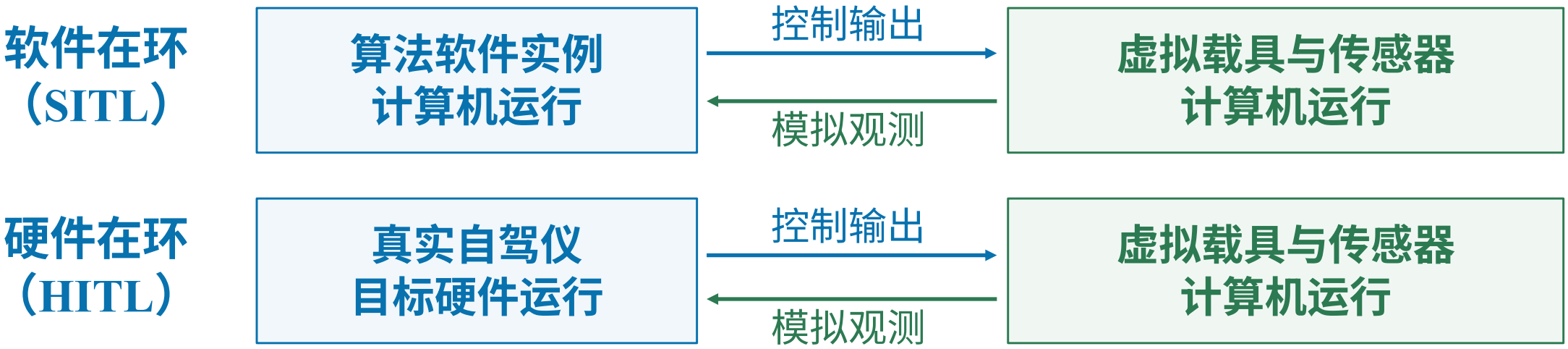


图：多速率闭环教学仿真，示例周期比为5：1

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。

1.6.2 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

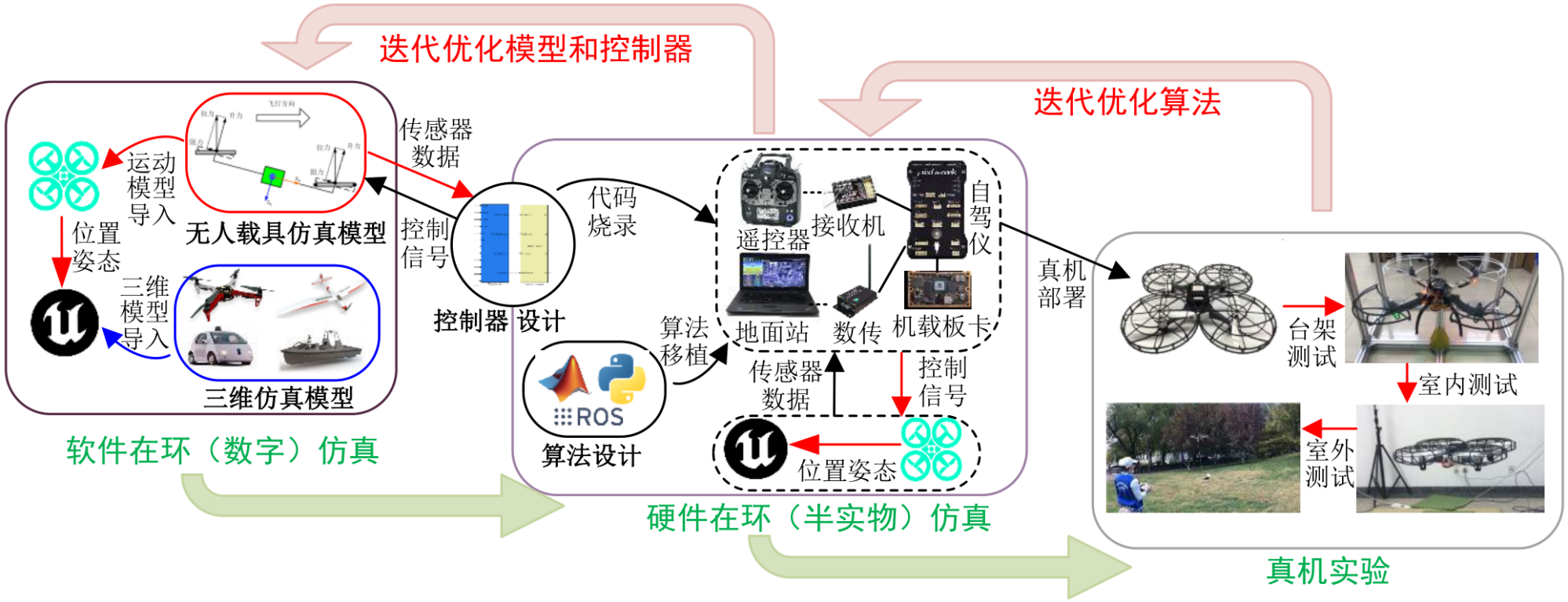


图1.18 RflySim高效开发与测试框架

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

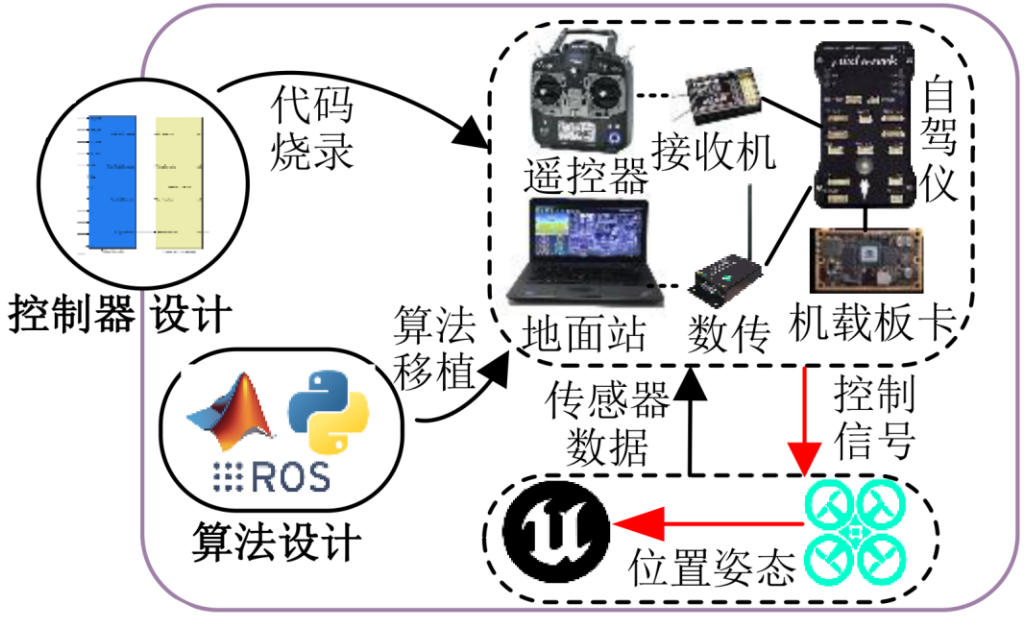


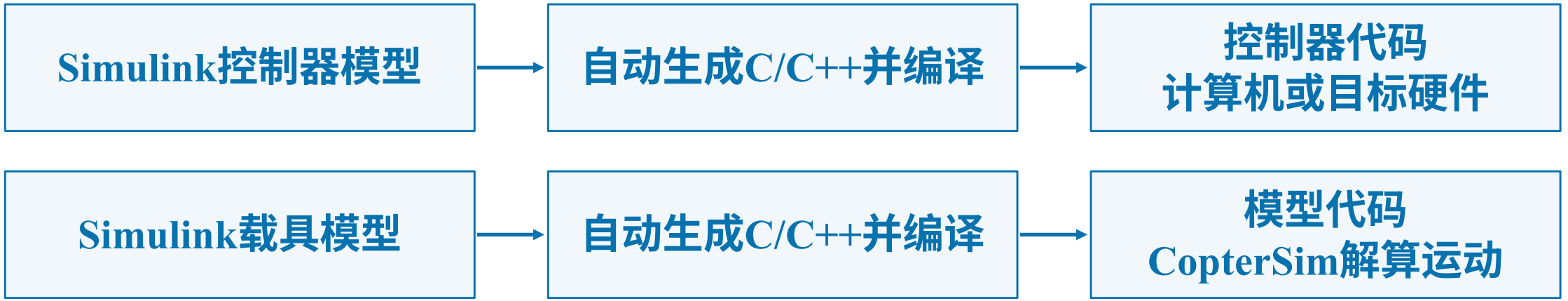
图1.18（局部）硬件在环（半实物）仿真

- **真实设备：** 自驾仪、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，烧录进自驾仪运行。
- **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

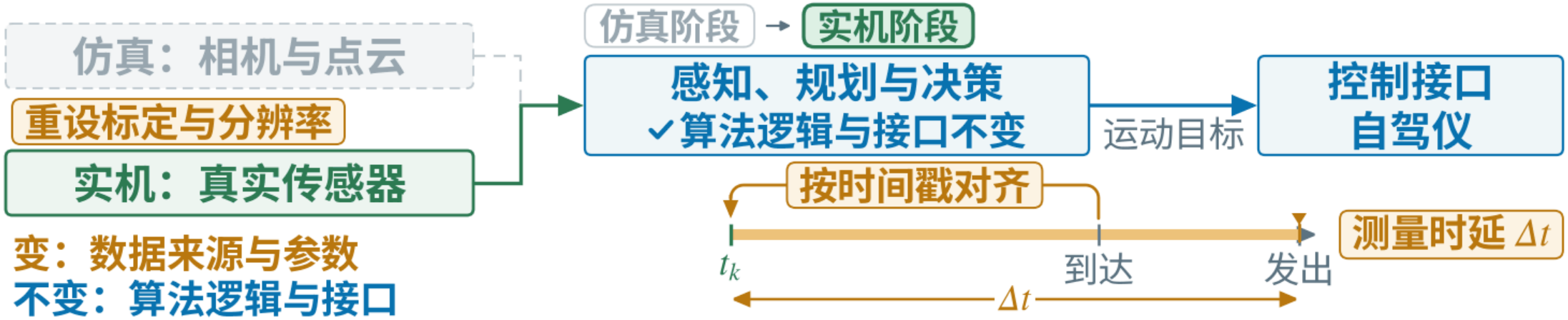


- **控制器代码：**Simulink框图自动生成C/C++代码，编译后在计算机或自驾仪运行。
- **载具模型代码：**Simulink载具模型生成代码，由CopterSim据推力和力矩计算运动。
- **迭代比较：**修改模型后重新生成、编译，在原工况下比较误差与运行时序。

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



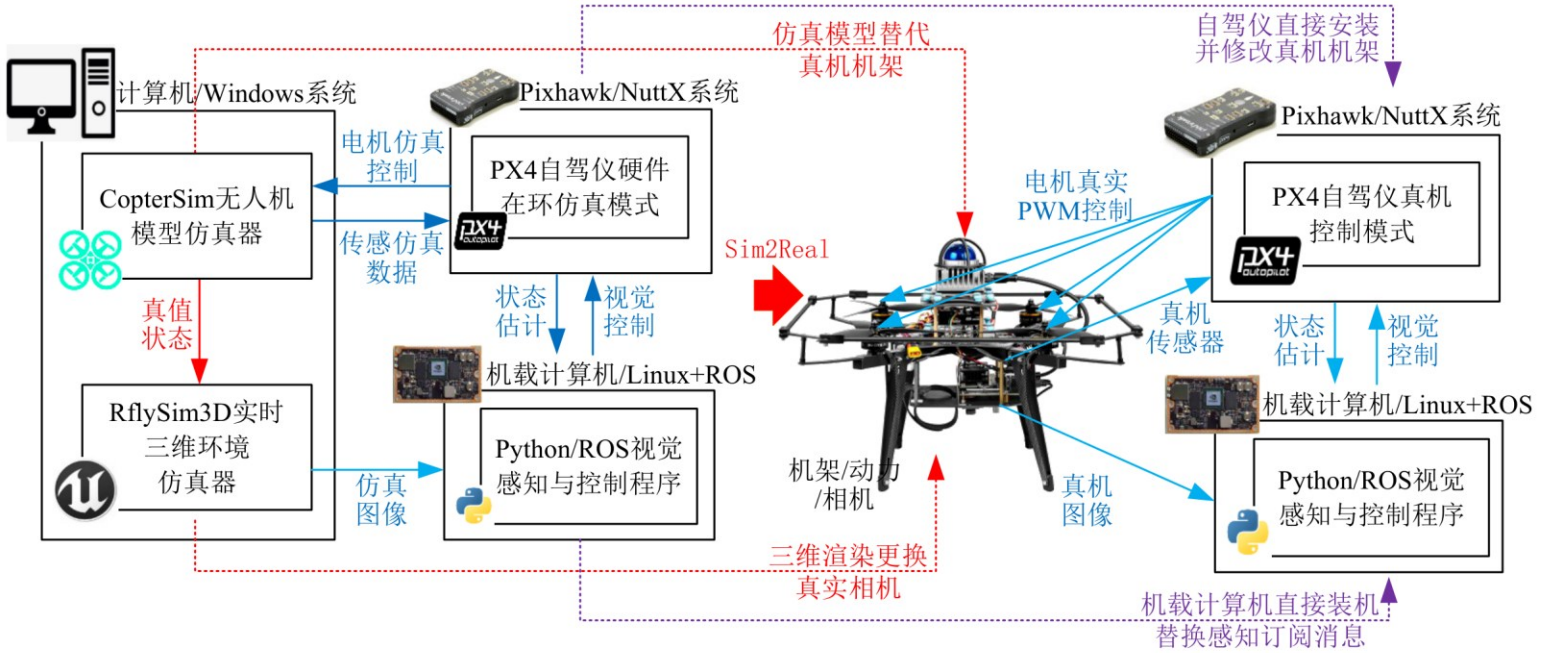
图：仿真到实机的观测源替换与时延对照（示意）

- **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。

1.6.2 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+自驾仪+机载计算机”硬件在环仿真　　(b) “机架+自驾仪+机载计算机”真机实验

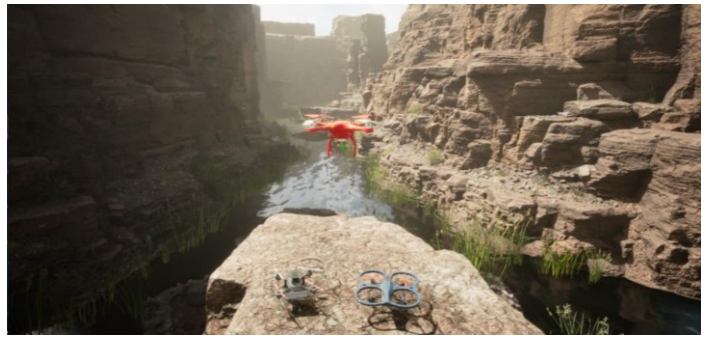
图1.20 上层感知决策算法从仿真到真机快速迁移

- **图(a) 硬件在环：**
  CopterSim算运动，
  RflySim3D出图像。
- **红色虚线：**
  模型换成真实机架，
  渲染换成真实相机。
- **紫色虚线：**
  自驾仪和机载计算机
  直接装机。

迁移时换上真实机架与相机，自驾仪切到真机模式，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

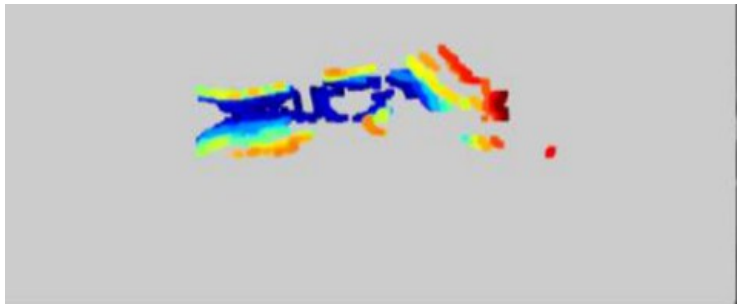
实景纹理与多模态传感器仿真



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

- **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。

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。

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

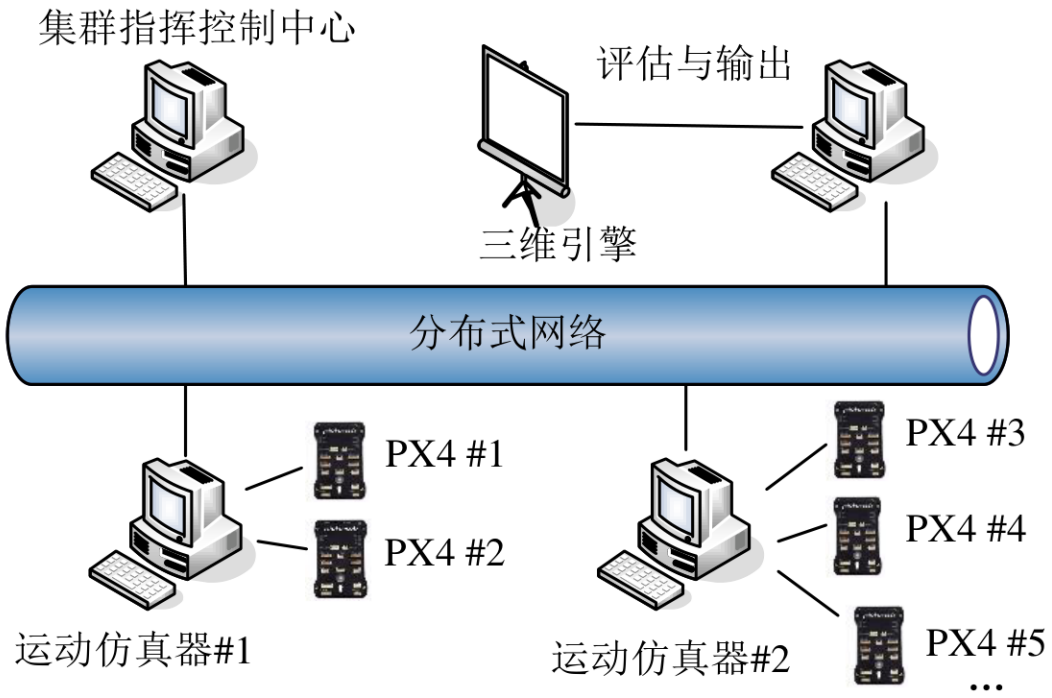


图1.21 多电脑分布式仿真拓扑图

- **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

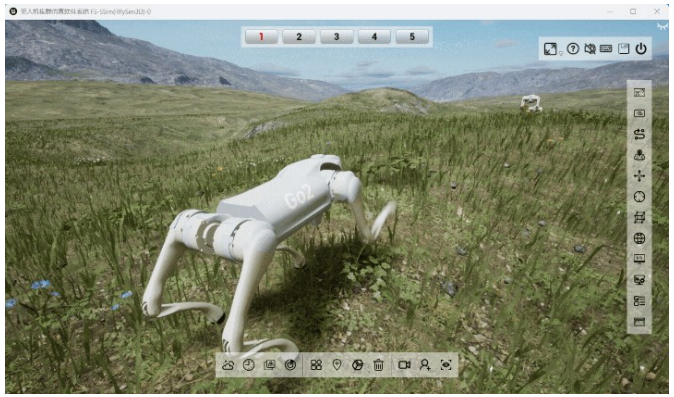
1.6.4 教学科研与学习入口
系列教材、文档、案例与论文入口

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

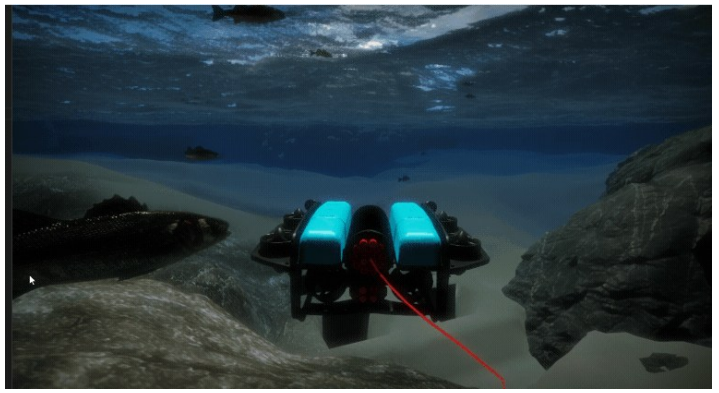


飞行器实机



四足仿真

潜航器仿真



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



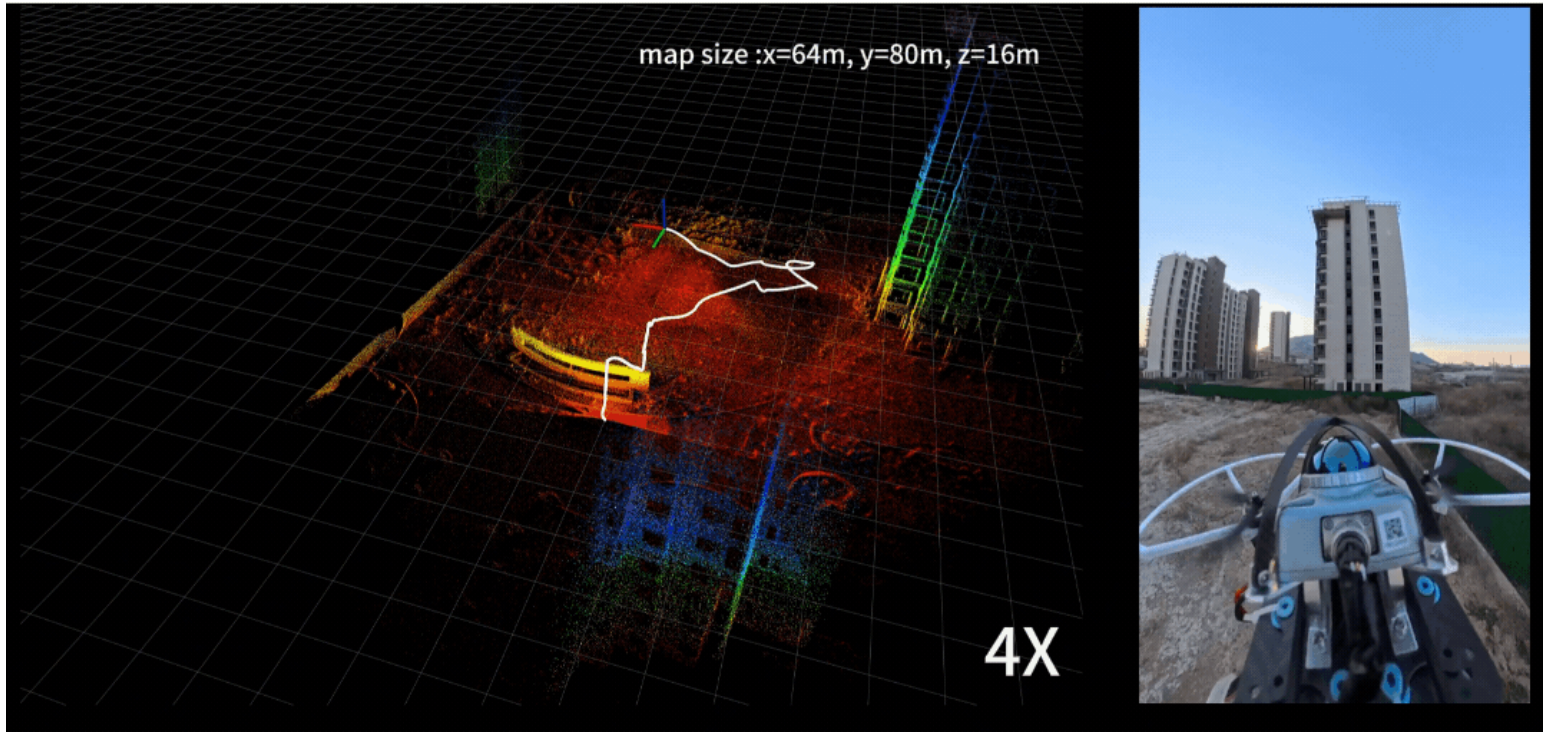
图：多旋翼实机连续穿越

- **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。

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。

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



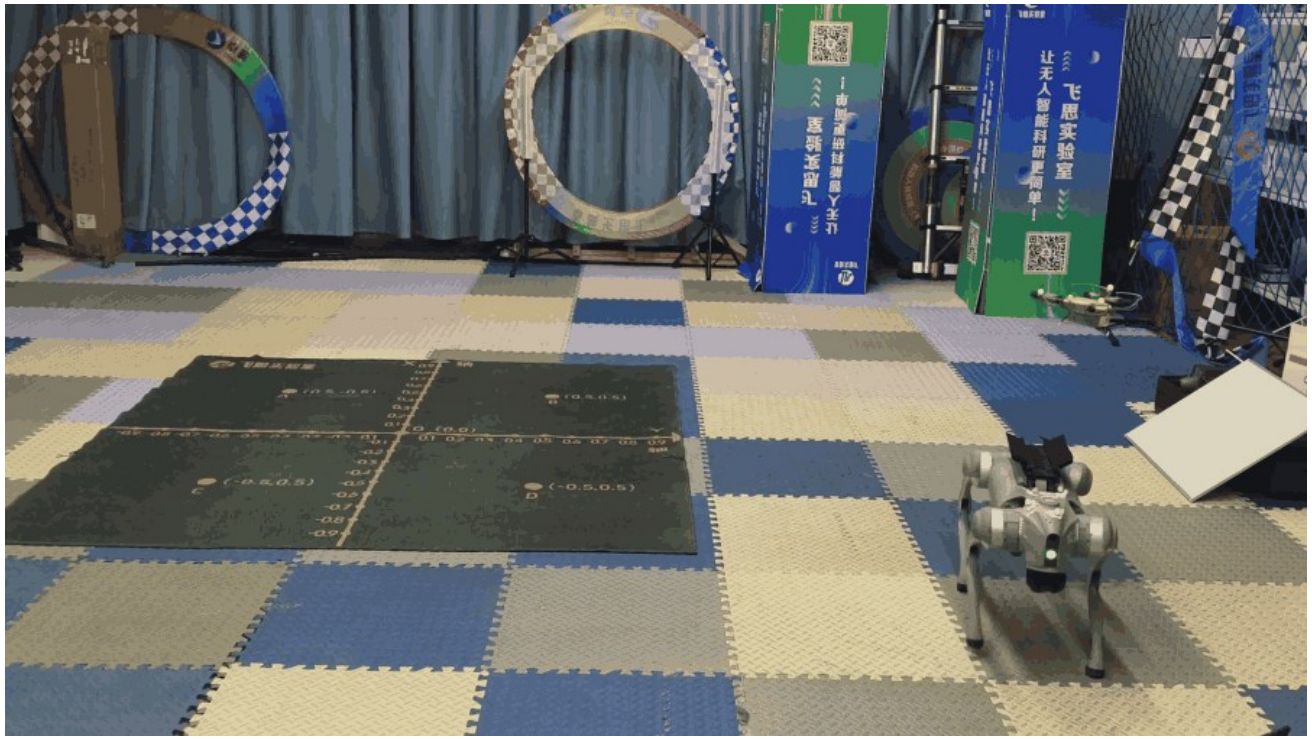
图：实景观测与定位建图（原片4倍速）

- **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。

位置估计与环境地图相互支撑，为自主运动提供依据。

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



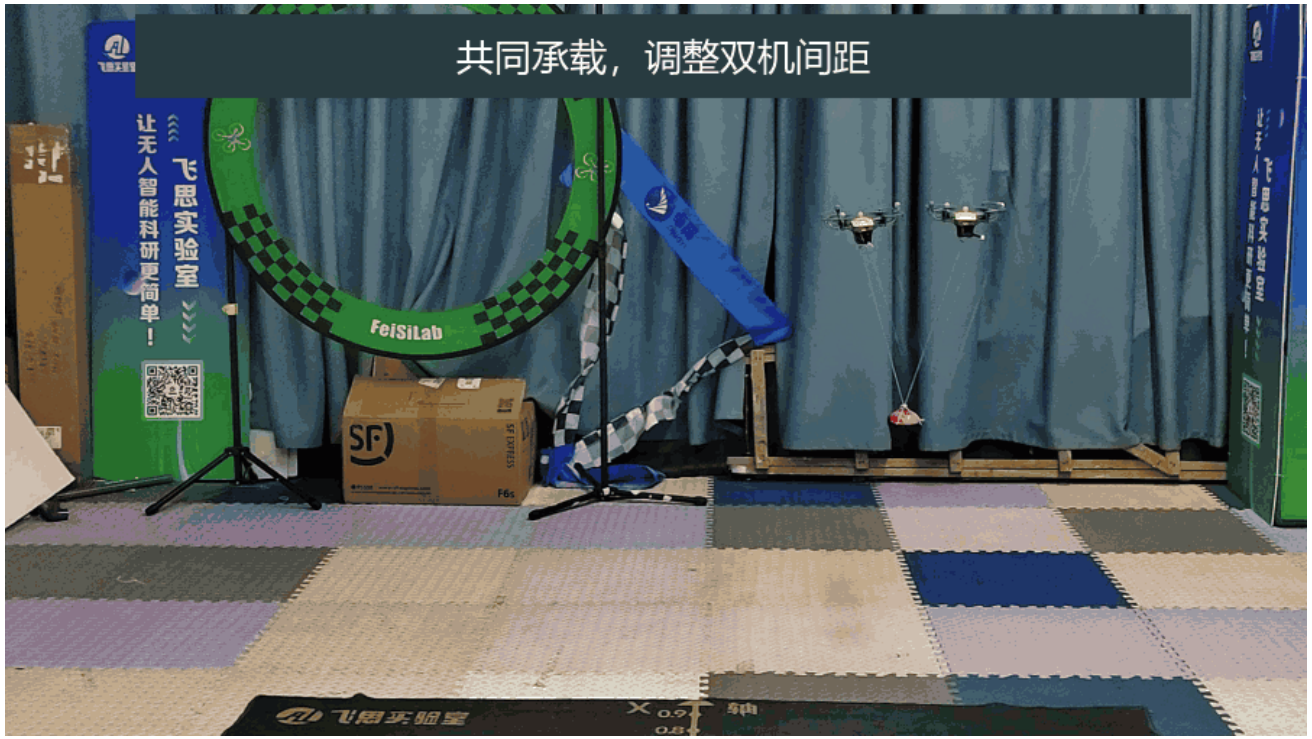
图：多旋翼降落到移动四足平台（实机）

- **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。

地面平台持续移动，使协同控制的目标随时间变化。

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



图：双机协同吊运与载荷调整（实机）

- **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。

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

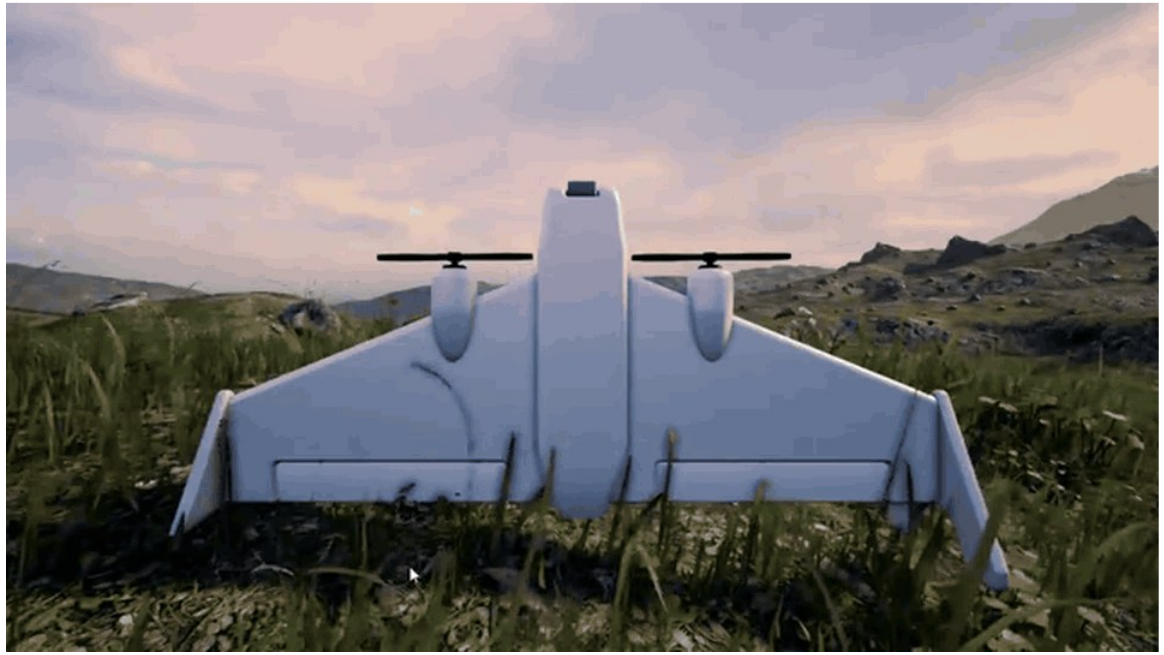
- **两类工况：**先展示单电机失效，再展示阵风作用下的运动。
- **作用差异：**电机失效改变执行器能力，阵风引入外部扰动。
- **重复测试：**配置故障或扰动条件，记录姿态、轨迹与控制响应。

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



图：尾座式仿真起飞与室内系留试验

- **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。

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



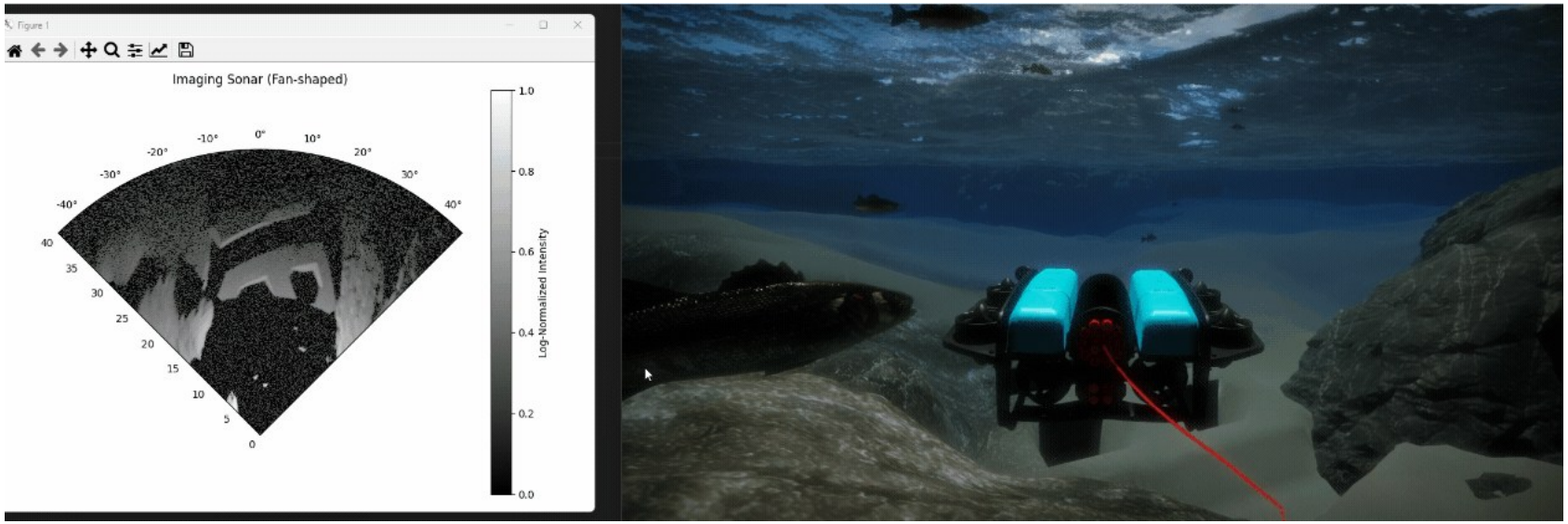
图：四足移动操作（实机）

- **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±40°；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

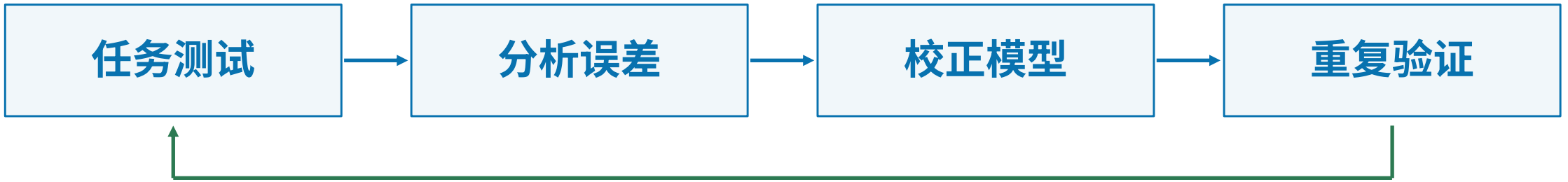
任务结果可以用明确指标比较

- **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

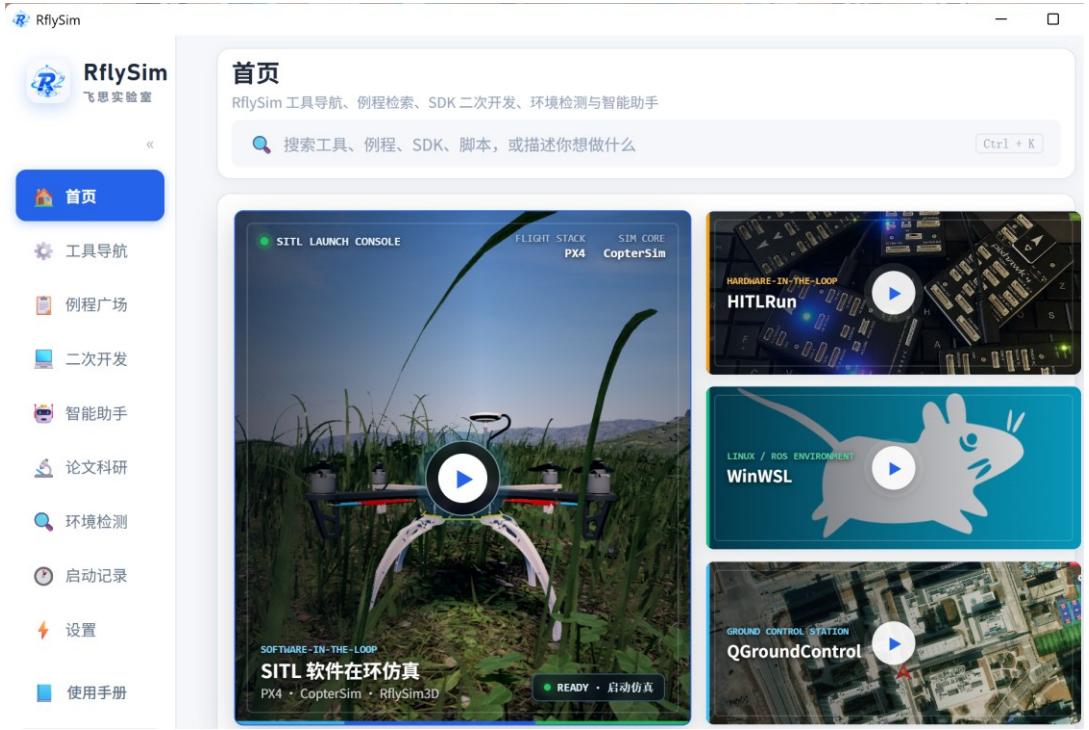
看任务的仿真、硬件在环或实机表现。

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。