本章目录

# UE场景：从对象状态到画面与交互


**第三章 三维环境建模与仿真**

3.1 三维仿真基础与工具选型

**3.2 UE场景运行渲染与交互**

3.3 多模态传感器数据生成

3.4 分布式仿真架构与数据接口

3.5 场景与载具资源开发

3.6 例程体系与综合实践

3.7 习题案例分析与课程设计


**本节 5 个教学单元**

**3.2.1 框架与渲染流程**
教材对应：第3.1.4.1节

**3.2.2 三维资产管理**
教材对应：第3.1.4.2节

**3.2.3 光照渲染系统**
教材对应：第3.1.4.3节

**3.2.4 物理与动画系统**
教材对应：第3.1.4.4节

**3.2.5 仿真交互框架**
教材对应：第3.1.4.5节

### 3.2.1 框架与渲染流程：三层结构

# UE用三层结构把对象状态变成屏幕图像

**仿真交互框架：**用Actor、控制器、事件与Tick决定这一帧各对象的状态。

**底层引擎模块：**虚幻引擎（UE）管理模型、材质、动画与物理资源，并用渲染管线把三维场景实时转换为二维图像。

**平台适配接口：**渲染硬件接口（RHI）把同一套渲染命令转换为DirectX、Vulkan、Metal等图形应用程序接口（API）的调用。

**交互框架先定状态，引擎据此渲染，RHI再把命令交给显卡。**

### 3.2.1 框架与渲染流程：场景对象

# 先认识关卡、Actor和组件

**关卡（Level）：**组织一组场景对象及其摆放，例如地面、建筑、灯光和盒体。

**实体（Actor）：**可放入关卡的对象实例。盒体Actor可以移动和旋转，也可以执行自己的逻辑。

**组件（Component）：**Actor拥有的功能模块，例如静态网格、相机或碰撞形状；各组件职责不同。

**本例对应：**盒体Actor通过StaticMesh组件引用Cube网格资产；改变实例位置，不会改写网格文件。

**关卡组织实体，Actor组合组件，组件提供具体能力。**

### 3.2.1 框架与渲染流程：组件拥有与依附

# 根组件提供Actor的空间变换

**盒体Actor：拥有组件**

**Root：SceneComponent**

依附

StaticMesh组件
引用Cube网格

**根组件：**SceneComponent提供位置、旋转和尺度；Actor的变换取自根组件。

**子组件：**相对父组件保存变换；父组件移动时，子组件随依附关系更新。

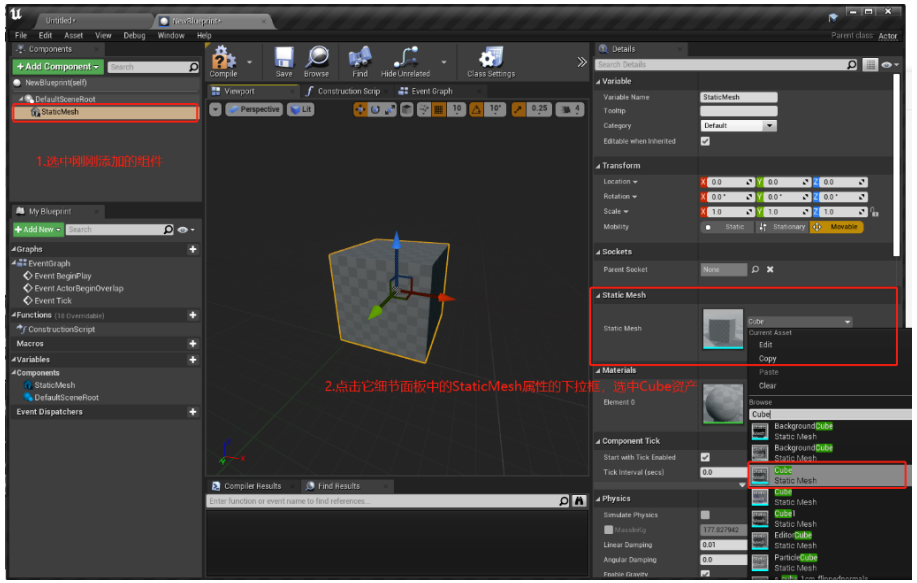
**一般组件：**ActorComponent也可只保存逻辑，例如状态管理，不必有空间位置。

**有空间变换的组件可建立父子关系；逻辑组件可以没有位置。**

### 3.2.1 框架与渲染流程：编辑器中的对象

# 真实盒体：组件引用Cube网格资产

图：UE4.27.2中盒体蓝图的组件配置




**组件树：** DefaultSceneRoot→StaticMesh




**属性：** Static Mesh字段选择Cube；
Transform配置组件变换。

所选网格 →




**启动：** 编译保存蓝图，拖入关卡后点击Play，观察实例运行。

**选中组件改变实例配置，选择网格资产决定显示的形状。**

### 3.2.1 框架与渲染流程：对象与交换信息

# 用无人机区分对象与交换的信息

| 对象或信息 | 无人机示例 | 承担的作用 |
| --- | --- | --- |
| Level | 试飞场景 | 组织地形、建筑、光照和多个实体 |
| Actor | 一架无人机 | 作为可放置、可移动和可识别的场景实体 |
| Component | 网格、碰撞体、相机 | 分别提供外观、接触边界和观测入口 |
| 交互信息 | 位置、姿态、控制输入 | 让外部模型或蓝图读取、更新和验证实体行为 |

**位置、姿态和控制输入是信息，不是新的对象层级。**

### 3.2.1 框架与渲染流程：事件与Tick

# 事件写入状态，Tick按时间更新

**BeginPlay：**对象开始参与运行时进行初始化，例如设置初始角度和目标速度。

**输入事件：**收到新指令后更新速度变量；指令未变化时，无需每帧重复建立同一配置。

**Tick：**按启用状态和调度执行更新；DeltaSeconds表示本次更新使用的时间间隔，单位为秒。

**时间作用：**速度乘时间得到位移，角速度乘时间得到角增量；固定每帧增量则会随帧率改变速度。

**一步算例：**角速度$\omega = 90°/\mathrm{s}$、帧间隔$\Delta t = 1/60\ \mathrm{s}$时，本帧转$\Delta\theta = \omega\,\Delta t = 1.5°$；帧间隔加倍则每帧转3°，每秒仍是90°。

**触发时保存新的目标；持续变化时使用本次时间间隔。**

### 3.2.1 框架与渲染流程：渲染管线总图

## 每帧先由CPU准备，再由GPU生成图像

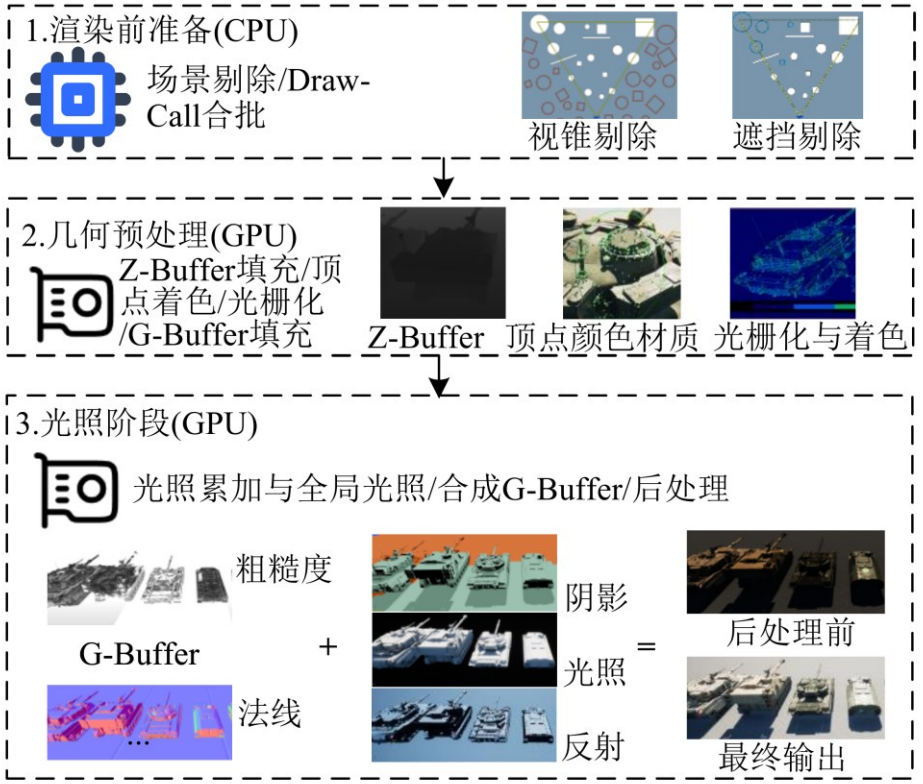



图3.4 渲染管线流程

**中央处理器（CPU）：**更新对象状态，筛选绘制内容，提交绘制任务。

**图形处理器（GPU）：**处理几何与表面，计算光照及后处理，输出图像。

**阅读顺序：**渲染前准备→几何预处理→光照阶段，后面逐段放大。

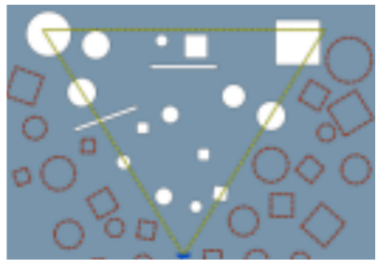
### 3.2.1 框架与渲染流程：剔除

# 距离、视锥与遮挡测试减少不必绘制的对象

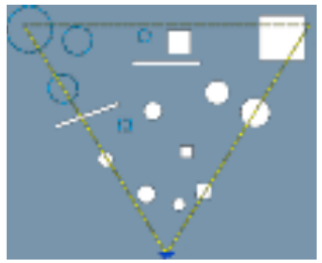
剔除：通过距离、视锥和遮挡测试，排除不必绘制的对象。

1.渲染前准备(CPU)

场景剔除/Draw-Call合批



视锥剔除



遮挡剔除

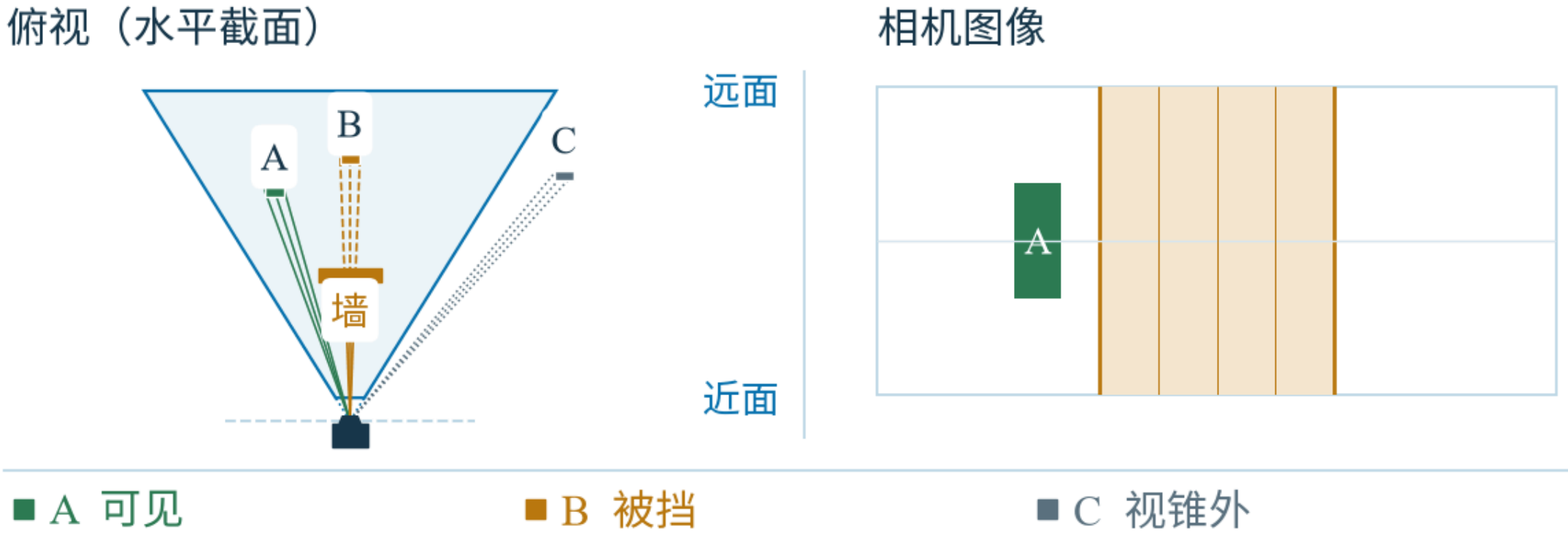
**遮挡测试：**依方法由CPU或GPU执行；视野外对象仍可更新运动状态。

图3.4（局部）可见性准备与对象筛选

**先排除不可见对象，绘制预算才能留给视野中的表面。**

### 3.2.1 框架与渲染流程：剔除

# 相机移动后，哪些物体进入画面？




图：左为视锥水平截面，右为同一相机图像；区分视锥外、被挡与可见

### 3.2.1 框架与渲染流程：绘制调用与合批

# 合批减少绘制调用，PSO减少状态切换开销

**绘制调用（Draw Call）：**CPU每提交一次绘制命令，都要交代顶点缓冲、索引缓冲和材质状态，调用越多CPU负担越重。

**合批与实例化：**网格和材质相同的对象合成一次提交。假设剔除后剩120个对象，只用到4种“网格＋材质”组合，理想情况下调用次数可从约120次降到约4次。

**管道状态对象（PSO）：**预先编译并缓存着色器绑定、输入装配、混合模式等整套状态，运行时直接取用，减少状态切换开销。

**合批条件：**材质不同或需逐个排序的透明物体难以合批，实际次数取决于场景组织。

**剔除减少要画的对象，合批和PSO减少提交与切换的开销。**

### 3.2.1 框架与渲染流程：光栅化与深度

## 几何处理得到像素对应的表面信息

**光栅化：**把投影后的三角形铺到像素上，并插值出各像素的法线与纹理坐标。




图3.4（局部）几何预处理（GPU）

深度缓冲（Z-Buffer）：存每个像素最近表面的深度编码，用于判断遮挡。

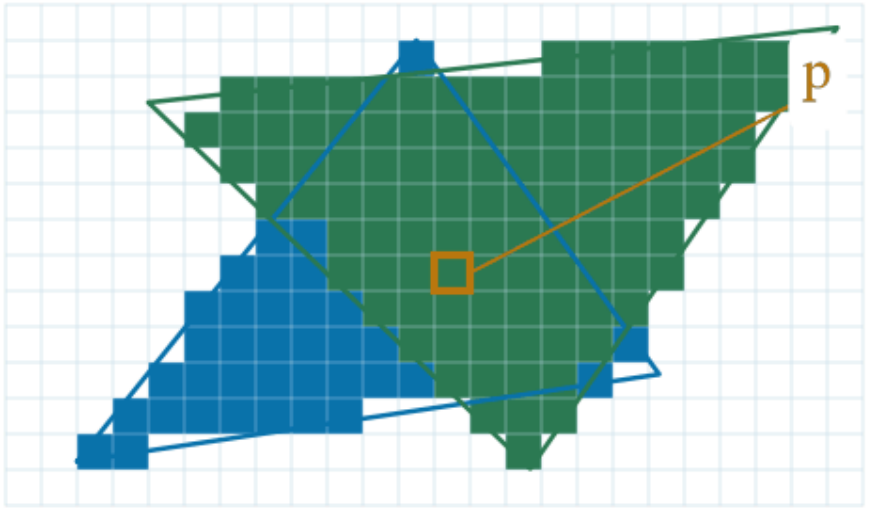
**提前深度测试（Early-Z）：**着色前先比深度，更远的表面直接丢弃，不算材质。

**深度用于可见性判断，法线和材质参数供光照计算。**

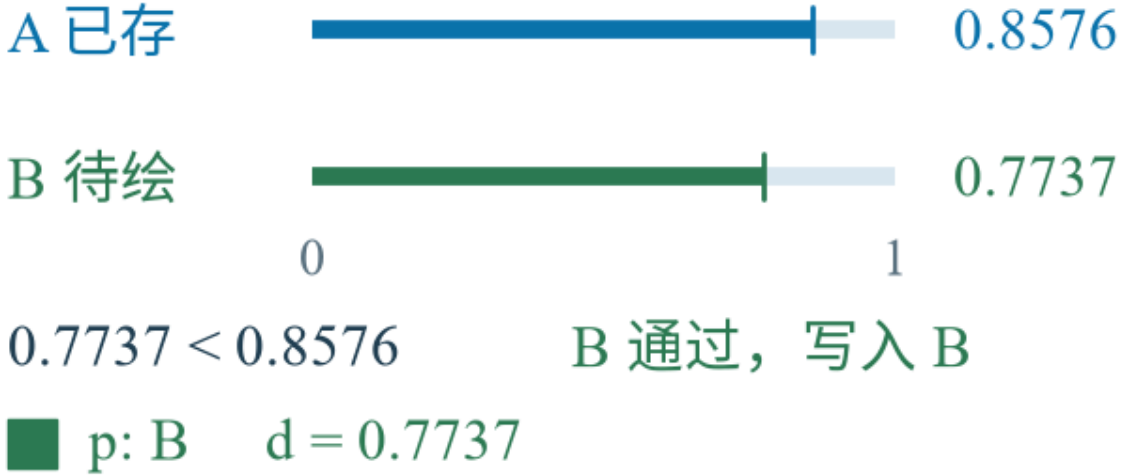
### 3.2.1 框架与渲染流程：光栅化与深度

# 投到同一像素的表面，谁挡住谁？

逐像素绘制结果




像素 p：先 A，后 B




A　　B

不透明；深度 d：近 0，远 1

图：不透明表面逐像素比较深度，保留更近表面的颜色

### 3.2.1 框架与渲染流程：延迟渲染

# 延迟渲染先存表面，再计算受光

几何与材质
确定可见表面 ➡ G-Buffer
暂存表面属性 ➡ 光照计算
组合表面与光源

**几何缓冲（G-Buffer）：**延迟渲染保存法线、基础颜色、粗糙度等属性的一组缓冲；深度通常另有缓冲。

**延迟的好处：**光照只对屏幕上的可见像素逐个光源计算，多光源场景仍高效；前向渲染则在绘制每个表面时直接计算光照。

**表面缓冲保存中间量；最终颜色还取决于光照与后处理。**

### 3.2.1 框架与渲染流程：光照与后处理

# 光照合成后，后处理改变最终像素

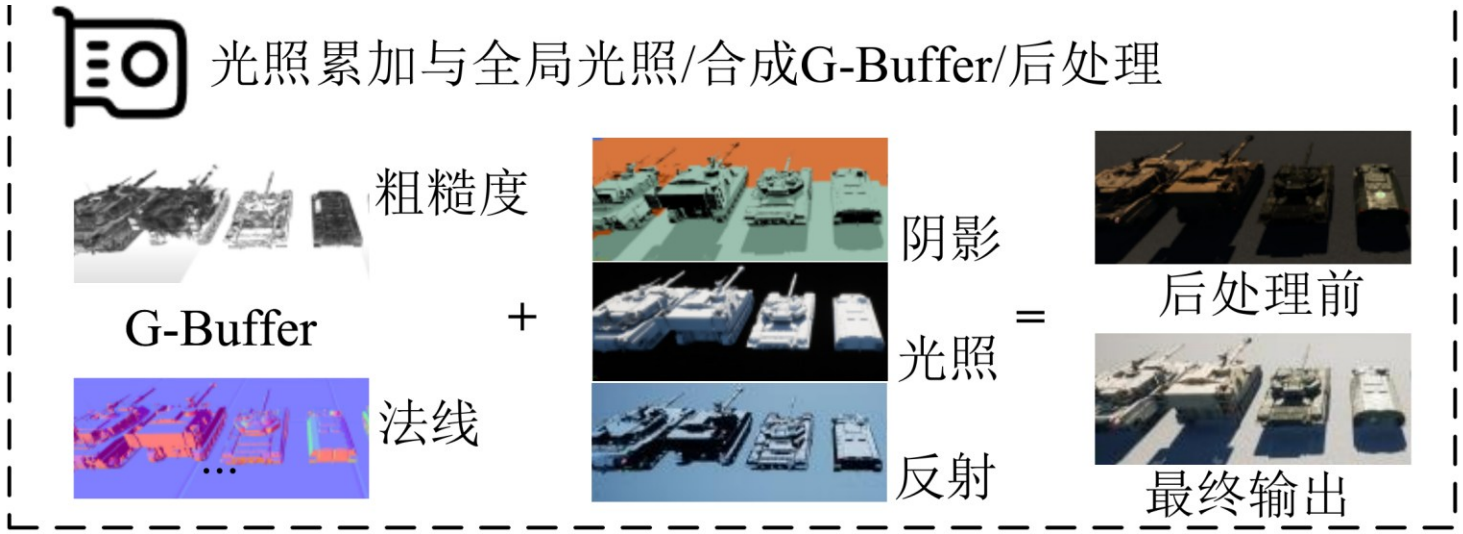



图3.4（局部）光照阶段（GPU）

**表面数据：**G-Buffer提供粗糙度、法线等属性。

**光照合成：**依据表面属性、光源和阴影计算光照，再累加光照与反射结果。

**后处理：**曝光、色调映射等改变最终像素，几何位置不变。

**固定几何仍可改变亮暗；曝光和后处理也会改变图像。**

### 3.2.1 框架与渲染流程：帧耗时算例

# 用每帧耗时定位优化方向

**帧率与帧时：**帧率$f$指每秒帧数（FPS），每帧可用时间$T = 1000/f$ ms；30FPS约33.3 ms，60FPS约16.7 ms。

**读取指标：**在UE编辑器中运行关卡后按~键打开控制台，输入stat unit，读取Frame（整帧）、Game（游戏线程）、Draw（渲染线程）和GPU的毫秒数。

**题设算例：**Game约9 ms、Draw约6 ms、GPU约28 ms。三段在流水线中处理不同的帧，整帧不是43 ms，而是接近最慢的GPU（约28 ms，约36FPS），应先查GPU工作。

**帧率上限：**t.MaxFPS 30只把上限设为30FPS，算不完时仍会更低；它也不规定相机采样或控制频率。

**CPU与GPU可流水并行，帧耗时不能简单相加。**

### 3.2.1 框架与渲染流程：定位瓶颈

# 耗时变长时，先找到具体工作

**Game偏高：**检查Actor的定期更新（Tick）、重复逻辑或通信处理；一次性工作放入对应事件。

**Draw偏高：**检查绘制请求与对象组织；合批或实例化需要兼容的资源与材质条件。

**GPU偏高：**检查像素数量、材质、阴影与后处理；细节层级（LOD）可减少渲染几何成本。

**对照：**固定相机和场景，再改变一个设置；同时记录Frame耗时与目标边缘是否仍清楚。

**一次只改变一个主要条件，用帧时和画面解释收益。**

本章目录

# UE场景：从对象状态到画面与交互


**第三章 三维环境建模与仿真**

3.1 三维仿真基础与工具选型

**3.2 UE场景运行渲染与交互**

3.3 多模态传感器数据生成

3.4 分布式仿真架构与数据接口

3.5 场景与载具资源开发

3.6 例程体系与综合实践

3.7 习题案例分析与课程设计


**本节 5 个教学单元**


**3.2.1 框架与渲染流程**
教材对应：第3.1.4.1节

**3.2.2 三维资产管理**
教材对应：第3.1.4.2节

**3.2.3 光照渲染系统**
教材对应：第3.1.4.3节

**3.2.4 物理与动画系统**
教材对应：第3.1.4.4节

**3.2.5 仿真交互框架**
教材对应：第3.1.4.5节

### 3.2.2 三维资产管理：导入管线

# 外部模型经导入成为UE资产，再被组件引用

**数字内容创作（DCC）工具：**在Blender、Maya、3ds Max等软件中建模、展开纹理坐标并制作骨骼动画。

**导入保留：**取决于格式与导入器；材质、贴图连接与动画需逐项核验。

**资产与实例：**导入后成为.uasset资产，由内容浏览器管理；组件引用资产，同一资产可放出多个实例。

**外部模型导入后成为资产，关卡里的实例只引用资产、不复制它。**

### 3.2.2 三维资产管理：几何细节

# LOD与Nanite按屏幕占用决定几何细节

**LOD：**为同一模型准备由精到粗的几套网格，按它在屏幕上占多大切换，远处用更少三角形。

**一步算例：**画面高度约与距离$d$成反比、像素数约与$d^2$成反比；$d$从10 m增到100 m，像素约为原来的1/100。

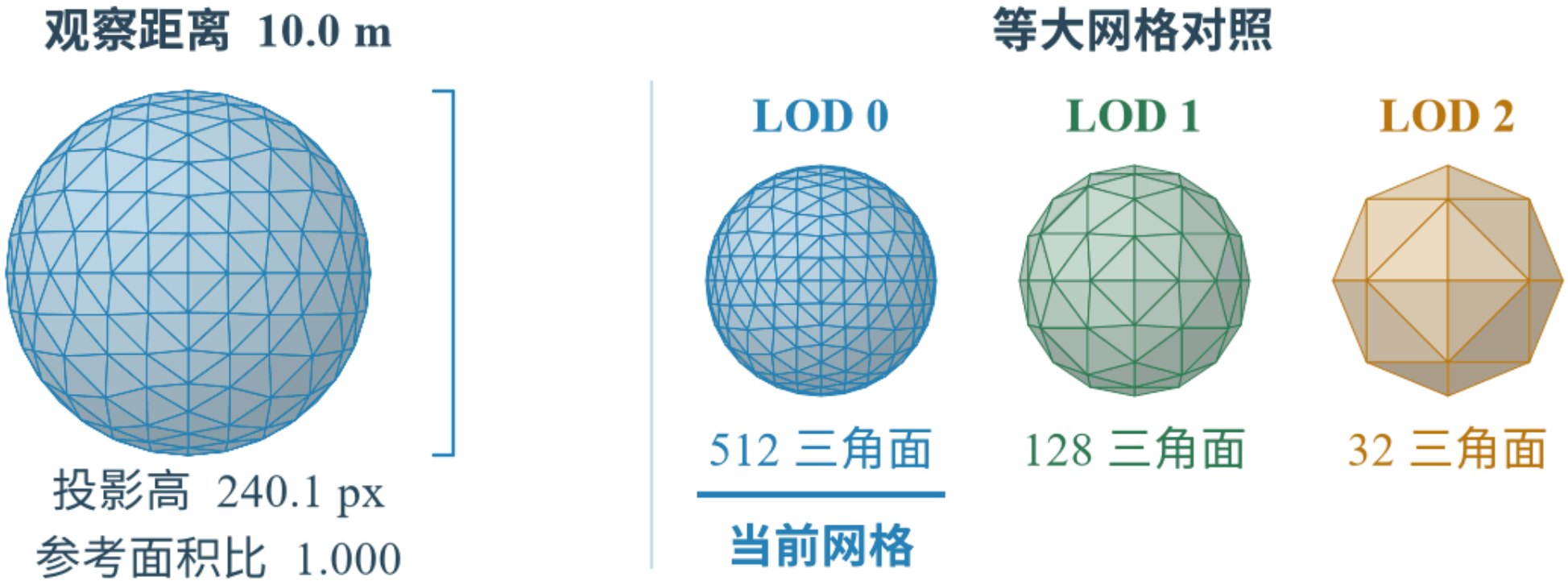
**Nanite（虚拟几何体）：**UE5按屏幕像素需求自动筛选细节，可减少手工制作LOD的工作，适合高细节扫描模型。

**检查方法：**固定相机路径观察LOD切换时门窗边缘，再比较帧耗时；看得清与算得省要分开判断。

**LOD与UE5的Nanite按屏幕需求控制几何细节和绘制负担。**

### 3.2.2 三维资产管理：几何细节

# 物体退远时，屏幕上的细节需求随之减少




图：固定视场下按投影尺度切换网格；右侧等大对照便于观察网格结构

### 3.2.2 三维资产管理：纹理坐标与多级纹理

# UV把贴图贴准，Mipmap让远处纹理不闪烁

**纹理坐标（UV）：**用二维坐标对应表面与贴图，U为横轴、V为纵轴；本例一个纹理单元为0到1，普通UV可超界平铺。

**一步算例：**1024×1024贴图上$(u, v) = (0.25, 0.5)$的点，对应像素$(uW, vH) = (256, 512)$。

**多级纹理（Mipmap）：**纹理预先逐级缩小；1024纹理单次覆盖128屏幕像素时，估计取第$\log_2(1024/128) = 3$级。

**纹理过滤：**三线性过滤在相邻两级之间插值，各向异性过滤让斜看的地面和跑道保持清晰。

**纹理采样要随观察尺度调整，远处与斜视表面才不易闪烁。**

### 3.2.2 三维资产管理：材质输入

# 材质参数怎样改变表面受光

**节点式材质编辑器：**把纹理采样值和常数接到基础颜色、金属度、高光度、粗糙度、环境光遮蔽和法线等输入。

**反射分布：**粗糙度越高，高光越宽、反射越分散；金属度改变反射的组成。

**高光度与环境光遮蔽：**高光度（Specular）默认0.5，约为4%镜面反射；环境光遮蔽（AO）让缝隙和角落更暗。

**法线贴图：**改变着色用的局部法线，显出细小凹凸，网格轮廓与碰撞边界不变。

**运行时：**材质实例可在运行中改参数，虚拟纹理按需加载大贴图。

**材质参数改变表面反射，几何与碰撞边界由对应模型决定。**

### 3.2.2 三维资产管理：PBR参数

# PBR参数各自改变哪种受光特征

**基于物理的渲染（PBR）：**用材质参数描述表面受光。

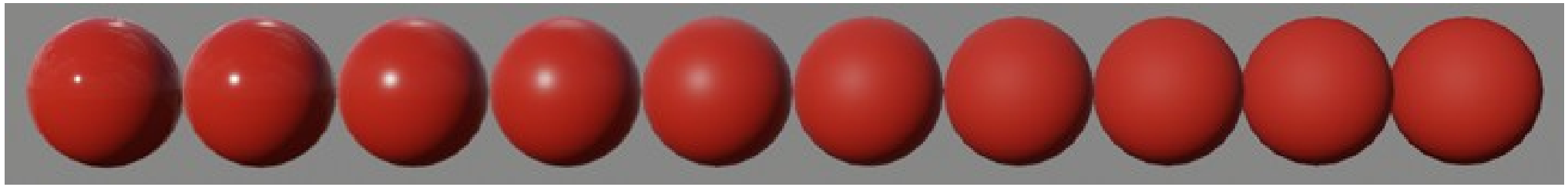
| 参数 | 改变什么 | 观察时关注什么 |
| --- | --- | --- |
| Base Color | 表面的基础颜色 | 同一光照下的整体明暗与色彩 |
| Metallic | 表面是否按金属方式反射 | 高光和环境反射的特征 |
| Roughness | 反射是否集中或分散 | 镜面高光边缘是否清晰 |
| Normal | 不改网格轮廓的局部起伏 | 细小纹理会怎样改变受光细节 |

### 3.2.2 三维资产管理：粗糙度对照

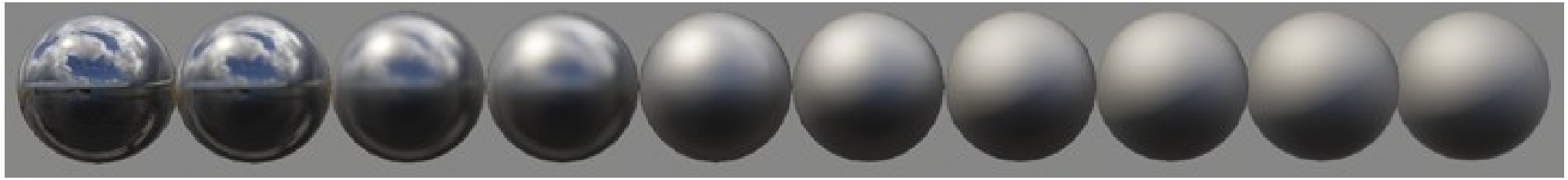
# 官方对照：粗糙度改变反射的集中程度

**每一行从左到右：Roughness由0增加到1**

非金属



金属



图：Epic官方材质样图；比较各行内部的高光和环境反射。

**几何轮廓保持相同，粗糙度升高使高光与反射更分散。**

### 3.2.2 三维资产管理：地形

# Landscape用灰度高程图生成可编辑地形

**地形系统（Landscape）：**读入灰度高程图生成三维地形，可叠加材质图层、绘制道路河流，并按视距自动调整细节。

**高程图：**每个像素是一个16位高度值（0～65535），32768对应零高度；Z缩放为100时高度范围约为−256 m～+256 m。

$$h = \frac{v - 32768}{128} \cdot \frac{s_z}{100}\ \text{m}$$

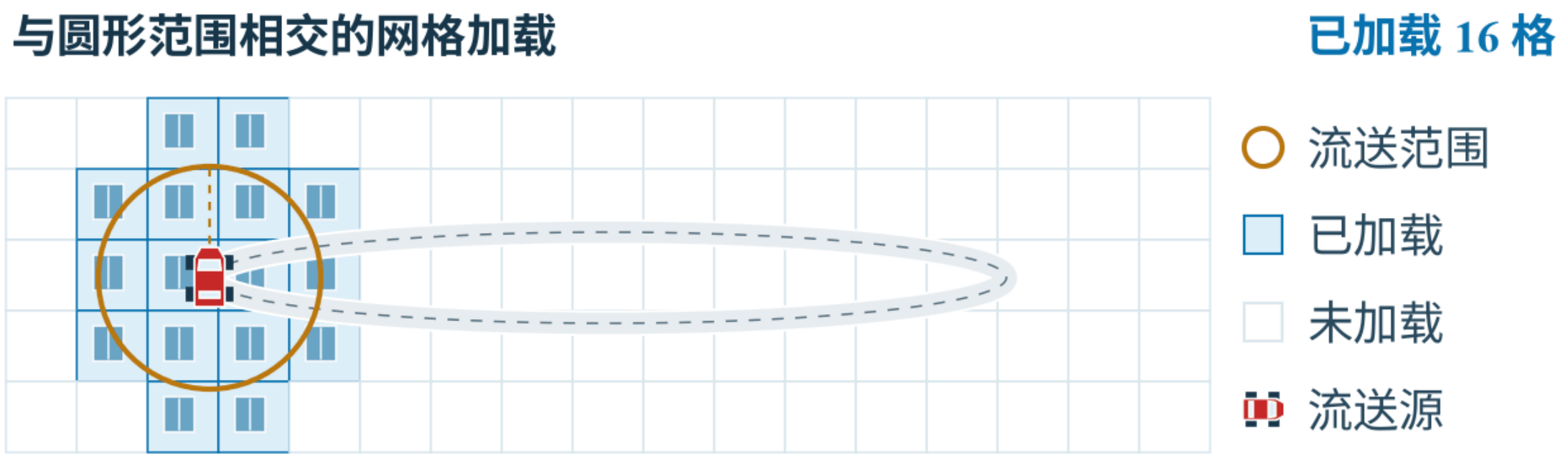
**一步算例：** $v = 40960,\ s_z = 100 \Rightarrow h = (40960 - 32768)/128 = 64\ \text{m}$

**数据来源：**数字高程模型（DEM）等地理高程数据可转成高程图导入。

**高程零点与Z缩放若不匹配，导入后的地形高差会整体失真。**

### 3.2.2 三维资产管理：大场景流送

# 世界分区按流送源位置加载周围的网格单元




图：流送源移动时的网格加载与卸载（教学示意）

**流送源附近网格加载，远处网格卸载；对象是否常驻还取决于自身设置。**

本章目录

# UE场景：从对象状态到画面与交互


**第三章 三维环境建模与仿真**

3.1 三维仿真基础与工具选型

**3.2 UE场景运行渲染与交互**

3.3 多模态传感器数据生成

3.4 分布式仿真架构与数据接口

3.5 场景与载具资源开发

3.6 例程体系与综合实践

3.7 习题案例分析与课程设计


**本节 5 个教学单元**

**3.2.1 框架与渲染流程**
教材对应：第3.1.4.1节

**3.2.2 三维资产管理**
教材对应：第3.1.4.2节

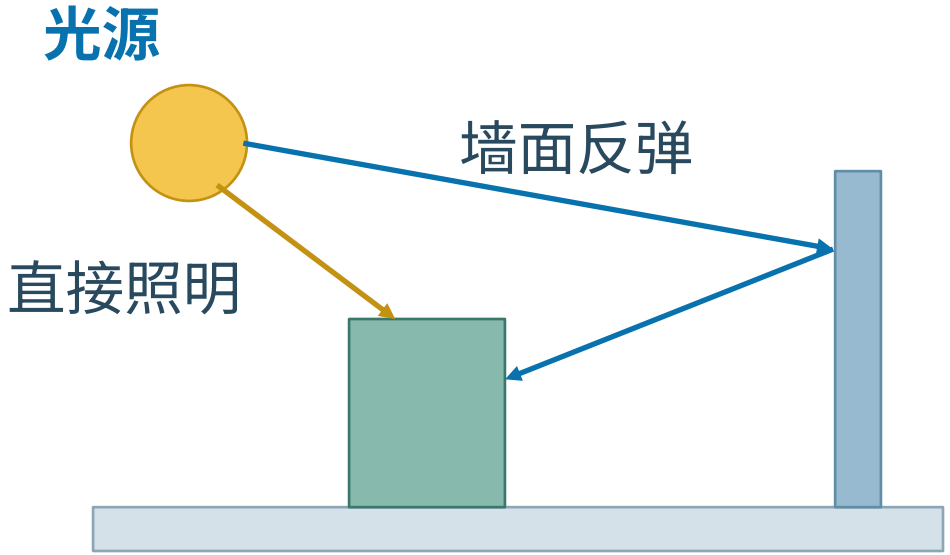
**3.2.3 光照渲染系统**
教材对应：第3.1.4.3节

**3.2.4 物理与动画系统**
教材对应：第3.1.4.4节

**3.2.5 仿真交互框架**
教材对应：第3.1.4.5节

### 3.2.3 光照渲染系统：直接光与间接光

# 直接光与反弹光走不同路径




图：直接光与反弹光路径（示意）

**直接光：**从光源到目标表面；中间有遮挡时，目标可能进入阴影。

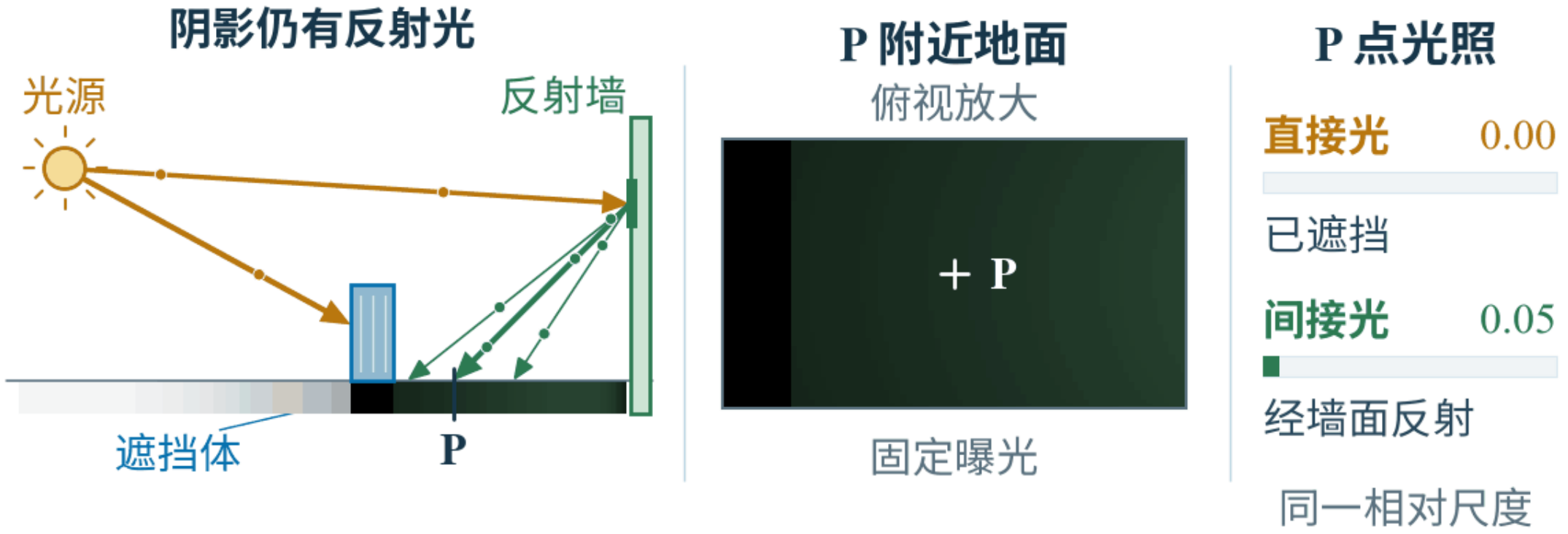
**间接光：**先照到其他表面，再反弹到目标；墙面颜色会影响反弹光。

间接光作用：照亮阴影区域，增加层次感；计算量大，常用预先烘焙的光照贴图或UE5的Lumen实时计算。

**光源、遮挡、材质和曝光共同改变相机的像素值。**

### 3.2.3 光照渲染系统：直接光与间接光

# 挡住直射光后，墙面反射仍能照亮物体




图：遮挡体运动改变直达光路；墙面一次反射仍可为P点提供照明

### 3.2.3 光照渲染系统：光源与可移动性

# 光源按运行时能否变化分为三类

**光源类型：**定向光模拟太阳，天光模拟天空，另有点光源、聚光灯和矩形灯光。

**选择依据：**固定场景用静态，只调亮度用静止，太阳要动或车灯随车就用可移动。

**静态（Static）：**完全不变；编辑时预计算，最快

**静止（Stationary）：**亮度、颜色可调；部分预计算，中等

**可移动（Movable）：**位置、方向都可变；全部实时，最贵

**光源越能在运行中变化，越依赖实时计算，渲染代价也越高。**

### 3.2.3 光照渲染系统：光照贴图

# Lightmap把静态光照预先算好存成纹理

**光照贴图（Lightmap）：**把静态光源照到物体上的结果编码成纹理，运行时直接读取，省去实时计算；光源或物体移动后不会自动更新。

**Lightmass：**UE中负责这一预计算的系统；每个静态网格要有一套不重叠的额外UV存放光照。

**一步算例：**4 m宽的墙铺满64×64光照贴图时，每个纹素（贴图像素）约400/64 = 6.25 cm，比它细的阴影边缘会被抹平。

**平台对照：**[安装目录]\RflySim3D\RflySim3D\Content中，Changsha.umap旁的Changsha_BuiltData保存该地图的构建数据，主要是光照。

**静态光照预先烘焙进纹理，运行最省，但光源和物体一动就不再准确。**

### 3.2.3 光照渲染系统：Lumen

# Lumen在UE5中实时计算间接光和反射

**Lumen：**UE5的实时全局光照系统，自动随场景变化计算光线反弹，无需烘焙光照贴图或手动放置反射球。

**追踪路径：**Lumen先利用屏幕信息，再按项目配置采用距离场软件光追或硬件光追，估计间接光与反射。

**反射：**随场景变化计算表面反射；玻璃反射与折射还取决于材质和渲染设置。

**后处理与回退：**可配合景深、色彩校正、辉光等后处理；性能受限时关闭Lumen，改用光照贴图。

**场景和光源常变用Lumen，场景固定、追求帧率用光照贴图。**

### 3.2.3 光照渲染系统：阴影

# 级联阴影贴图让近处阴影清晰、远处节省资源

**阴影的作用：**没有阴影的物体像漂浮在场景中，阴影交代物体与地面的空间关系。

**级联阴影贴图：**按离相机的距离把阴影分成几层，近层用高分辨率，远层用低分辨率。

**一步算例：**同为2048像素的阴影贴图，近层覆盖20 m、每像素约 $20/2048\ \text{m} \approx 0.98\ \text{cm}$ ；远层覆盖200 m，每像素约9.8 cm。

**调参入口：**定向光的动态阴影距离和级联数量决定各层覆盖范围与精度。

**取舍：**远处阴影变粗但不易察觉；无人机下视相机近地飞行时，近层清晰度最重要。

**近层阴影用高分辨率保细节，远层降低分辨率省资源。**

### 3.2.3 光照渲染系统：反射

# 反射效果按场景动态程度和平台选择实现方式

**反射：**光滑表面可映出环境；粗糙水泥墙仍反射光，但通常没有清晰倒影。

**Lumen反射：**随场景实时计算反射；动态场景，UE5

**屏幕空间反射：**只用当前画面中已有的像素；动态，画面外物体映不出

**反射捕捉器：**预先拍下所在位置的环境；场景较静态

**光线追踪：**沿反射方向追踪虚拟光线路径；质量和开销取决于实现与采样

**反射方案要按场景变化、画面外信息与可用算力选择。**

本章目录

# UE场景：从对象状态到画面与交互


**第三章 三维环境建模与仿真**

3.1 三维仿真基础与工具选型

**3.2 UE场景运行渲染与交互**

3.3 多模态传感器数据生成

3.4 分布式仿真架构与数据接口

3.5 场景与载具资源开发

3.6 例程体系与综合实践

3.7 习题案例分析与课程设计


**本节 5 个教学单元**

**3.2.1 框架与渲染流程**
教材对应：第3.1.4.1节

**3.2.2 三维资产管理**
教材对应：第3.1.4.2节

**3.2.3 光照渲染系统**
教材对应：第3.1.4.3节

**3.2.4 物理与动画系统**
教材对应：第3.1.4.4节

**3.2.5 仿真交互框架**
教材对应：第3.1.4.5节

### 3.2.4 物理与动画系统：运动来源

# 运动求解、碰撞查询与动画分工

**物理求解：**启用相应物理行为后，质量、力、约束和碰撞形状参与UE中的运动与接触计算。

**碰撞查询：**按形状和通道检查命中或重叠，可以只返回查询结果，不必驱动刚体运动。

**部件动画：**更新旋翼或起落架的变换，产生连续可见动作；动作规则来自蓝图或动画系统。

**课程平台路线：**CopterSim可计算载具运动并向三维端发送状态；旋翼显示转动本身没有计算推力。

**动画改变显示部件；动力学由选定的运动模型计算。**

### 3.2.4 物理与动画系统：动画系统

# 骨骼、动画蓝图与Control Rig逐层驱动动作

**骨骼（Skeleton）：**定义角色或机械载具的关节层级和位置，是动画变形的基础。

**动画蓝图（Animation Blueprint）：**可视化状态机，按速度、方向、状态等参数混合与切换动画序列。

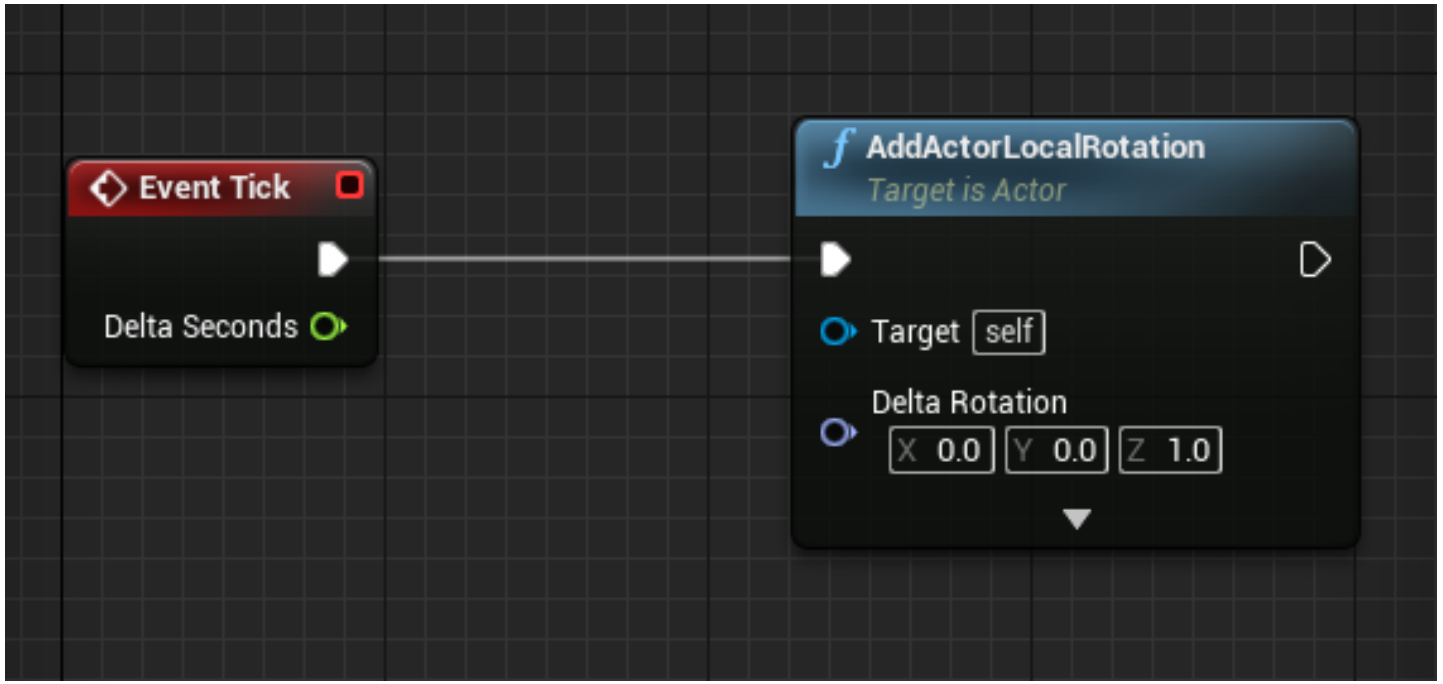
**控制绑定（Control Rig）：**在编辑器和运行时生成或修改动作，可加约束与逆运动学（由末端位置反推关节角度）求解。

**起落架状态机：**离地高于2 m切到“收起”，降到1 m以下切回“放下”；两个阈值不同可防止临界处来回抖动。

**关节层级与状态切换分开设计，复杂动作才便于修改。**

### 3.2.4 物理与动画系统：固定逐帧增量

# 盒体原例：每次Tick增加1度




图：盒体Tick与局部旋转节点

**执行线：** Event Tick调用AddActorLocalRotation，Target为自身。

**角增量：**

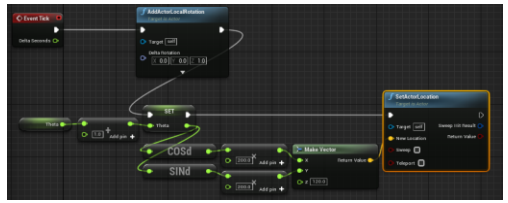
Delta Rotation的Z为1，绕局部Z轴增加1度。

**时间输入：**

DeltaSeconds未接入；
30FPS约30度/秒；
60FPS约60度/秒。

### 3.2.4 物理与动画系统：正余弦与位置

# 盒体原例：角度同时驱动圆周位置



图：总图与位置局部

**状态：** Theta每次加1；COSd/SINd按角度制。

**位置：** $X = 200\cos\theta$ , $Y = 200\sin\theta$ , $Z = 120$，$\theta$为变量Theta。

**几何：** 单位cm；$\theta = 90°$时位置为(0, 200, 120)。



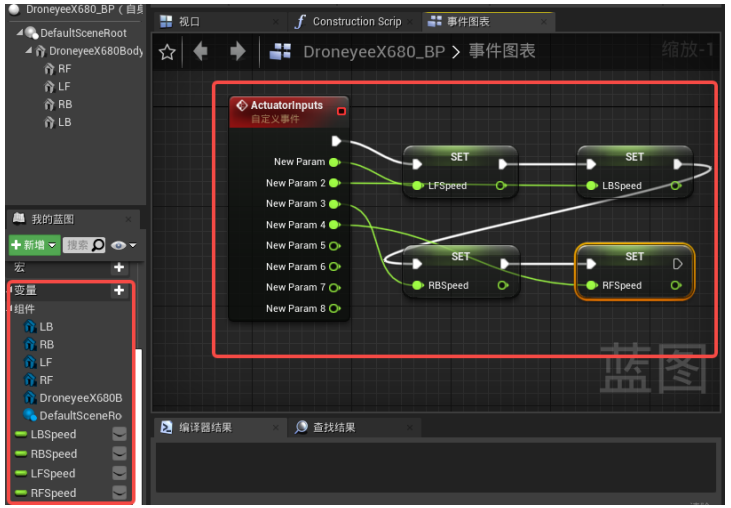

**每帧更新Theta，再由正余弦计算世界位置。**

### 3.2.4 物理与动画系统：事件到变量

# X680输入事件先保存四个旋翼速度

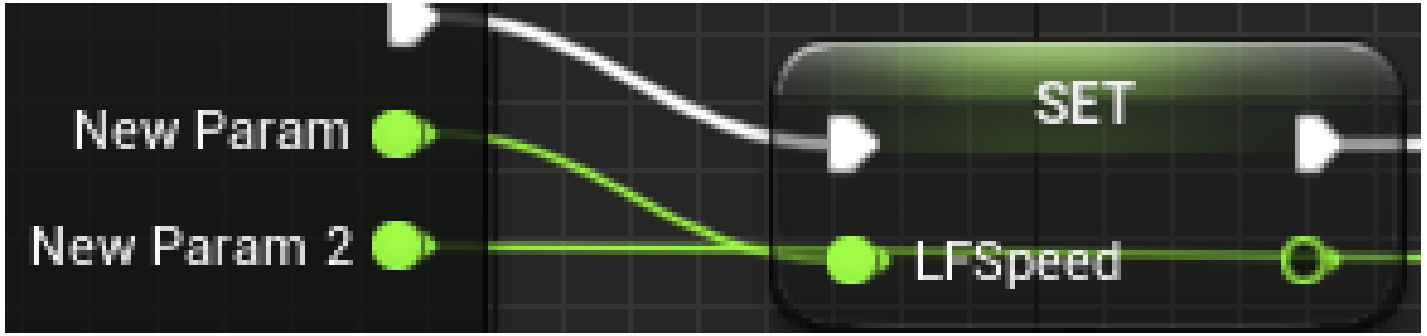
**事件约定：**ActuatorInputs接收8个float参数；本例前4路只保存速度。

**目标：**四个旋翼依附机身。




图：组件树与事件总图

局部：第1路输入 → LFSpeed




1→LFSpeed / LF左前　2→LBSpeed / LB左后

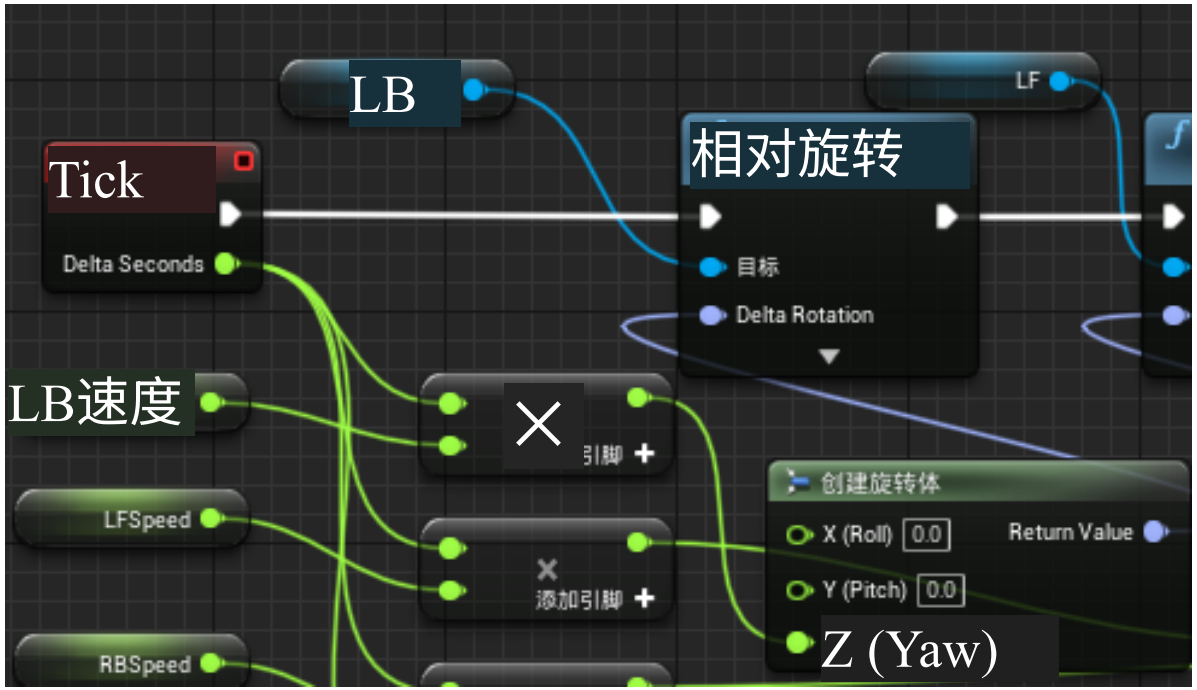
3→RBSpeed / RB右后　4→RFSpeed / RF右前

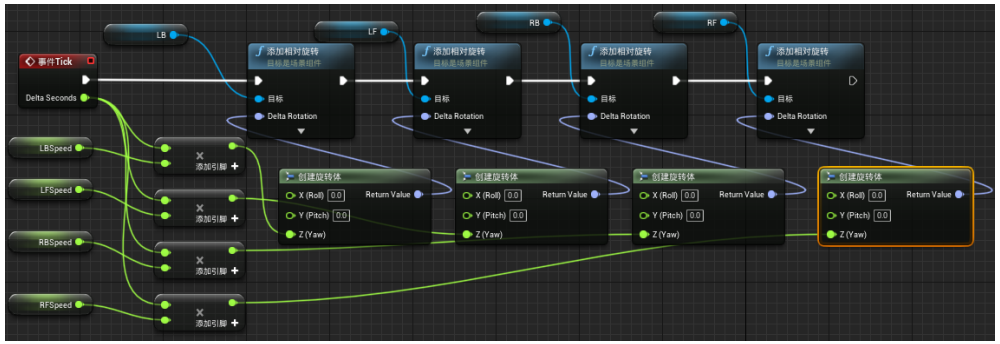
**ActuatorInputs接收参数，速度变量供后续Tick读取。**

### 3.2.4 物理与动画系统：时间到部件旋转

# X680每帧用速度乘时间计算角增量

图：LB单路放大；右为四路总图



LBSpeed × DeltaSeconds
→ Make Rotator的Yaw
→ LB：AddRelativeRotation

**Yaw角增量：** $\Delta\psi = \omega\,\Delta t$，$\omega$为度/秒，$\Delta t$为秒。

**本帧角增量由角速度乘DeltaSeconds得到，再加到对应旋翼上。**

### 3.2.4 物理与动画系统：帧率对照算例

# 同样转一秒，两种更新规则结果不同

教学题设：Tick逐帧执行，分别取30FPS与60FPS；非性能实测。

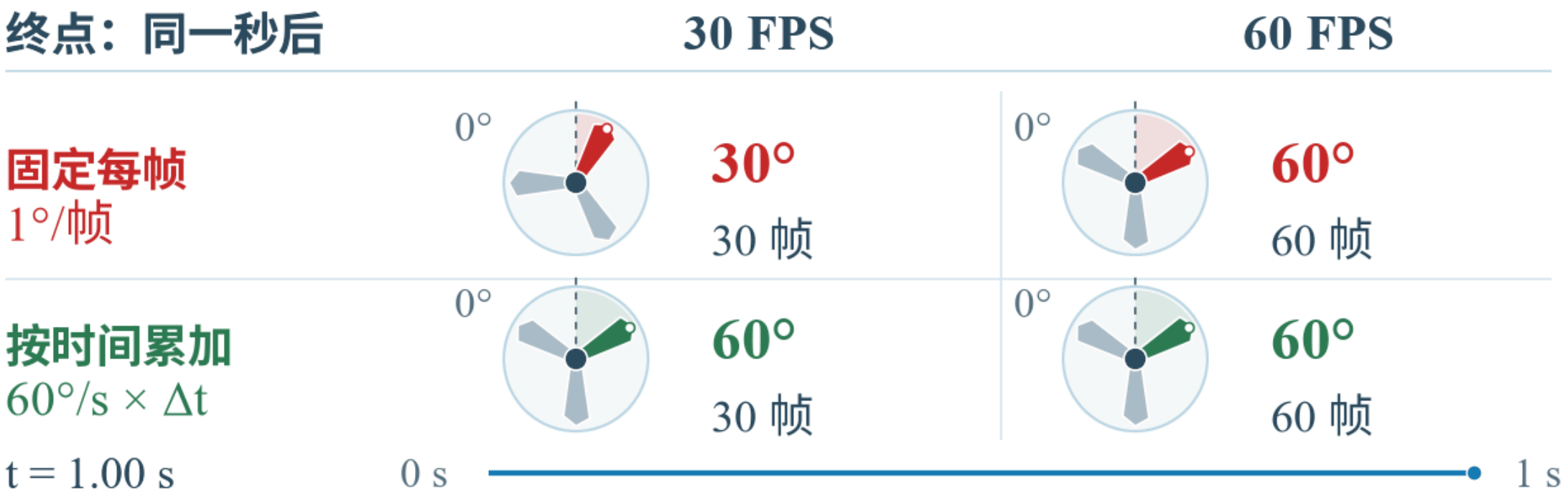
| 更新规则 | 30FPS | 60FPS |
| --- | --- | --- |
| 固定1度/帧 | 30度/秒 | 60度/秒 |
| 指定60度/秒 | 每帧增加2度 | 每帧增加1度 |
| 按时间累计一秒 | 60度 | 60度 |

**计算：** $60^\circ/\mathrm{s} \times \frac{1}{30}\ \mathrm{s} = 2^\circ$；$60^\circ/\mathrm{s} \times \frac{1}{60}\ \mathrm{s} = 1^\circ$。

**固定每帧角度随帧率变速；速度乘时间保持约定角速度。**

### 3.2.4 物理与动画系统：逐帧规则对照

# 同一秒内，固定增量随帧率变化，按时间累加不变




图：相同模型时间内，两种Tick规则产生的转动差异

**固定每帧加1°会随帧率变速；角速度乘帧间隔仍保持每秒60°。**

### 3.2.4 物理与动画系统：蓝图与C++协作

# 蓝图调用能力由项目实际暴露的接口决定

**本例蓝图：** ActuatorInputs保存速度，Tick计算角增量，AddRelativeRotation更新指定旋翼组件。

**C++扩展：** 可实现协议接收、设备访问或可复用计算，再按项目需要暴露为蓝图可调用能力。

**接口条件：** 空白UE工程不会自动拥有RflySim约定事件；需要匹配的插件、模型和资源注册路线。

**资源烘焙（Cook）：** 把编辑器资产转换为运行资源；课件3.5再讲按平台UE版本烘焙与注册。

**蓝图组织事件与状态，底层接口把具体能力接入节点。**

### 3.2.4 物理与动画系统：碰撞检测

# 碰撞检测先粗筛候选对，再精确计算接触

**宽相检测（Broad Phase）：**用轴对齐包围盒（AABB）或包围球快速排除不可能相碰的物体对。

**窄相检测（Narrow Phase）：**按候选对的碰撞形状精确计算接触，得到接触点、法线方向和穿透深度。

**一步算例：**AABB相交要求三轴都满足$a_{\min} \le b_{\max}$且$b_{\min} \le a_{\max}$；x轴[0, 2]与[1.5, 3]重叠，y轴[0, 2]与[2.5, 4]不重叠，直接排除。

**分两步的原因：**1000个物体有$n(n-1)/2 = 499500$对，逐对精算太慢；层次包围盒（BVH）或八叉树按空间分层，只比较相近的对。

**宽相用包围盒快速排除，窄相只对候选对精确求接触。**

### 3.2.4 物理与动画系统：碰撞设置

## 碰撞设置决定物体参与查询、物理还是两者

**碰撞通道：**WorldStatic对应静止物体，WorldDynamic对应靠代码或动画移动的物体。

**无碰撞：**不参与查询，也不参与物理；纯装饰物、远景

**仅查询：**响应射线、扫掠和重叠检测；触发区、测距射线

**仅物理：**只参与刚体与约束模拟；只需模拟运动的碎片

**查询与物理：**两者都参与；会被撞、也要被检测的物体

**只需回答“碰到了吗”时用仅查询，需要被撞动时才启用物理。**

### 3.2.4 物理与动画系统：碰撞响应

# 两个物体的碰撞响应共同决定阻挡、重叠或忽略

**响应：**每个物体对每个通道设为阻挡（Block）、重叠（Overlap）或忽略（Ignore）。

**A、B**分别表示两个物体对对方通道的响应。

**A阻挡+B阻挡：**互相阻挡，可产生命中事件

**A阻挡+B重叠：**仅重叠，不阻挡

**A重叠+B重叠：**重叠；双方需开启重叠事件

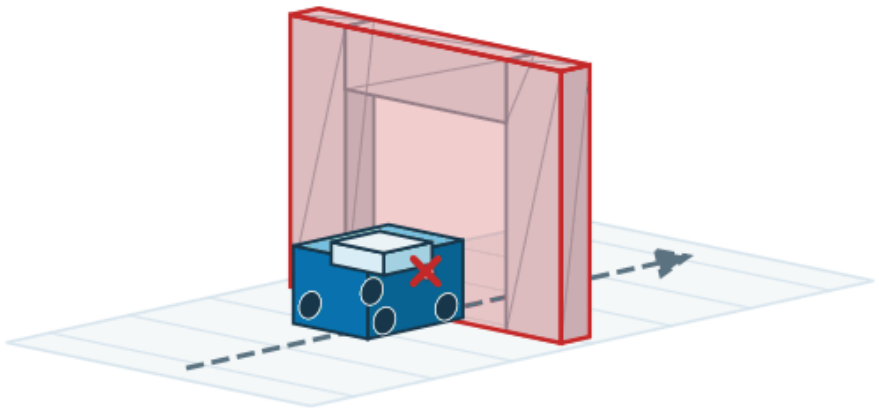
**任一方忽略：**不阻挡，也不触发重叠

**双方都设阻挡才会挡住；任一方忽略，就不发生交互。**

### 3.2.4 物理与动画系统：渲染与碰撞分离

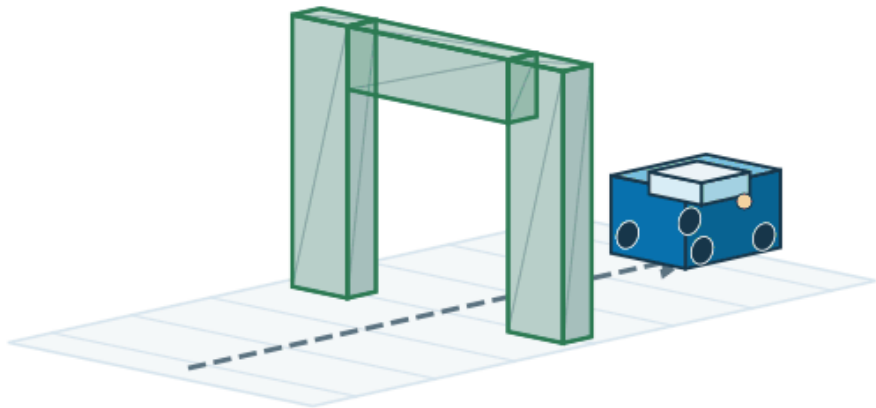
# 看得见门洞，也可能被碰撞形状挡住

**整块碰撞盒：挡住门洞**



**查询命中：停止**

**门框碰撞形状：保留门洞**



**查询无命中：通过**

渲染网格　碰撞形状

路径查询，不计算碰撞力

图：外观相同，碰撞形状不同，通行查询结果不同

**渲染网格、LOD与碰撞形状分别配置，通行结果由碰撞查询决定。**

本章目录

# UE场景：从对象状态到画面与交互


**第三章 三维环境建模与仿真**

3.1 三维仿真基础与工具选型

**3.2 UE场景运行渲染与交互**

3.3 多模态传感器数据生成

3.4 分布式仿真架构与数据接口

3.5 场景与载具资源开发

3.6 例程体系与综合实践

3.7 习题案例分析与课程设计


**本节 5 个教学单元**

**3.2.1 框架与渲染流程**
教材对应：第3.1.4.1节

**3.2.2 三维资产管理**
教材对应：第3.1.4.2节

**3.2.3 光照渲染系统**
教材对应：第3.1.4.3节

**3.2.4 物理与动画系统**
教材对应：第3.1.4.4节

**3.2.5 仿真交互框架**
教材对应：第3.1.4.5节

### 3.2.5 仿真交互框架：输入系统

# 输入系统把设备信号映射成控制器能处理的动作

**输入映射（Input Mapping）：**把不同设备的按键和摇杆统一映射为游戏内的事件或命令，屏蔽硬件差异。

**事件驱动：**按下、松开等变化触发事件；摇杆等连续量按帧读取当前状态。

**平台实例：**RflySim3D中按F1弹出帮助，按B切换跟随的飞机，按V切换机载相机，双击地面显示击中点信息。

**设备差异由输入映射处理，控制逻辑接收统一的动作意图。**

### 3.2.5 仿真交互框架：控制关系

## 控制器通过占有关系连接受控实体

**受控实体（Pawn）：**教材称棋子或角色体，是能被控制器占有的Actor。

**角色（Character）：**带常用角色运动能力的Pawn子类，适合行走、跳跃等角色行为。

**控制器（Controller）：**玩家控制器处理键盘、手柄等输入；
AI控制器按规则决策。控制器自身不显示网格。

**占有关系（Possess）：**建立Controller对Pawn的控制；
Unpossess解除；默认一对一，换对象先解除再占有。
运动仍由实体及组件实现。

**控制器处理意图，受控实体及其组件实现运动。**

### 3.2.5 仿真交互框架：规则与全局状态

## 游戏模式定规则，游戏状态存全局，HUD显示反馈

**戏剧模型：** Actor像演员，Pawn像被操纵的角色，游戏模式像统一的剧本。

**界面搭建：** 虚幻运动图形（UMG）用控件拼出菜单、仪表等交互界面。

**游戏模式（Game Mode）：** 定义规则与流程；起飞条件与任务结束

**游戏状态（Game State）：** 记录全局状态；任务进度与得分

**平视显示器（HUD）：** 显示关键实时信息；高度、速度与告警

**游戏模式定规则，游戏状态记进度，HUD和UMG把信息显示给人。**

### 3.2.5 仿真交互框架：输入与反馈

# 从控制意图追踪到场景状态




**正向：**控制意图交给Pawn与运动组件，计算位移并更新场景状态。

**反馈：**相机或状态接口读回结果，控制逻辑据此更新下一次输入。

**控制意图改变状态，相机或状态观测再返回控制逻辑。**

### 3.2.5 仿真交互框架：AI行为逻辑

# 行为树、黑板与感知组成智能体的决策回路

**行为树：**可视化决策流程图，由选择、序列和任务节点组成，按条件依次执行移动、搜索等动作。

**黑板：**行为树的数据中心，保存目标位置、目标是否可见等信息，供条件判断读取。

**感知系统：**提供视觉、听觉；项目处理器把目标写入黑板，驱动行为切换。

**导航网格（NavMesh）：**根据场景自动生成可通行区域，用于路径规划和避障，可动态更新。

**大规模实体（Mass Entity）：**UE5的轻量架构，可同时控制上千个智能体，用于人群、交通和编队仿真。

**感知处理器写黑板，行为树读黑板做决策，导航网格负责走到目标。**

### 3.2.5 仿真交互框架：网络与多智能体

## 服务器权威、属性复制和RPC保持多机状态一致

**网络驱动（NetDriver）：**管理客户端与服务器的连接和数据传输，支持各参与方的状态同步。

**属性复制（Replicated）：**Actor已开启复制且满足相关性与复制条件时，服务器按调度向相关客户端同步最新状态。

**远程过程调用（RPC）：**本地调用、远端执行的函数，如客户端请求开始任务。

**一步推演：**服务器把2号无人机的位置改为(100, 0, 50) m，满足上述条件的客户端收到更新后显示该位置，并非同时到达或逐次变化都送达。

**Iris：**UE5新增的网络复制系统，面向上百客户端的大规模多智能体仿真。

**服务器保存权威状态，复制把变化推给客户端，RPC传递一次性请求。**

学习资源

# 对象学习：实体、组件与控制关系

**Actor：根组件、变换与实例生命周期**

https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/actors-in-unreal-engine

**Component：逻辑组件与空间依附关系**

https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/components-in-unreal-engine

**Controller：Possess与Pawn控制关系**

https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/controllers-in-unreal-engine

学习资源

# 节点实践：盒体到X680的时间更新

**Tick：时间间隔、更新分组与先后依赖**

https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/actor-ticking-in-unreal-engine

**盒体Readme：组件、每帧1度与圆周位置**

https://rflysim.com/doc/zh/px4psp/RflySimAPIs/3.RflySim3DUE/0.ApiExps/e0_DevToolsUsage/1.UEBlueprintUsage/Readme.pdf

**X680 Readme：ActuatorInputs与速度乘时间**

https://rflysim.com/doc/zh/px4psp/RflySimAPIs/3.RflySim3DUE/2.AdvExps/e2_BlueprintModel/1.BlueprintBuild/Readme.pdf

学习资源

# 成像学习：材质、光照与渲染路径

**PBR：颜色、金属度与粗糙度对照图**

https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/physically-based-materials-in-unreal-engine

**前向渲染：与延迟路径的能力取舍**

https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/forward-shading-renderer-in-unreal-engine

**Lumen：UE5动态间接光与反射的适用条件**

https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/lumen-global-illumination-and-reflections-in-unreal-engine

学习资源

# 性能与交互：读指标并解释碰撞

**Stat命令：Frame、Game、Draw与GPU指标**

https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/stat-commands-in-unreal-engine

**碰撞复杂度：简单形状与三角网格的使用条件**

https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/simple-versus-complex-collision-in-unreal-engine

**控制台变量：帧率上限与强制LOD设置**

https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/unreal-engine-console-variables-reference

课堂练习

# 用本节方法分析一架无人机的仿真画面与交互

**帧耗时：** Game 12 ms、Draw 8 ms、GPU 21 ms时整帧约多少？先优化哪一段？

**旋翼转角：** X680的RF旋翼命令值120°/s，帧率从60降到40FPS时每帧转多少？一秒共转多少？

**碰撞设置：** 门洞渲染网格有开口，碰撞却是整块盒子，无人机穿门时会怎样？应改哪一项设置？

**光照选择：** 模拟上午到傍晚的巡检，太阳应设哪种可移动性？代价是什么？

**地形换算：** 高程图像素值30720、Z缩放100时，该点高度是多少米？

**先写出依据的规则或公式，再代入数值，最后说明结果含义。**

参考要点

# 练习参考要点：先写规则，再代入数值

**帧耗时：**三段流水并行，整帧接近最慢的GPU，约21 ms、约48FPS；应先减少GPU工作。

**旋翼转角：**每帧 $120/40 = 3°$ （60FPS时为2°），一秒仍为120°，按时间累加与帧率无关。

**碰撞设置：**查询命中整块碰撞盒，无人机被挡住；应把碰撞改为贴合门框的形状或使用复杂碰撞。

**光照选择：**太阳用可移动光源，阴影随时间变化；代价是实时计算、帧耗时增加。

**地形换算：**$(30720 - 32768)/128 = -16$，高度为−16 m，即低于零高度16米。

**流水看最慢段，转角看角速度，碰撞看形状，光照看可移动性。**

本节小结

# 从对象状态到画面与交互的五条主线

**框架与渲染：**交互框架每帧更新状态，CPU剔除并提交，GPU完成顶点变换、光栅化、延迟光照和后处理。

**资产与光照：**资产被组件引用；LOD、Mipmap与世界分区控制细节和加载；光照在预计算与实时之间取舍。

**物理与交互：**动画只改显示，碰撞由查询与双方响应决定；输入经映射交给控制器，规则与全局状态由专门对象管理。

**易错点：**帧耗时不能相加；每帧固定增量会随帧率变速；看得见的开口不等于碰撞能通过；属性复制只从服务器发往客户端。

**每帧先定状态再成像，读懂耗时、光照与碰撞才能解释仿真结果。**