



智能无人系统控制实践

第三章 三维环境建模与仿真

作者：戴训华 中南大学

主页：faculty.csu.edu.cn/daixunhua

邮箱：dai.xh@csu.edu.cn

平台官网：rflysim.com



ni 新型工业化·新制造·无人系统系列·RflySim系列

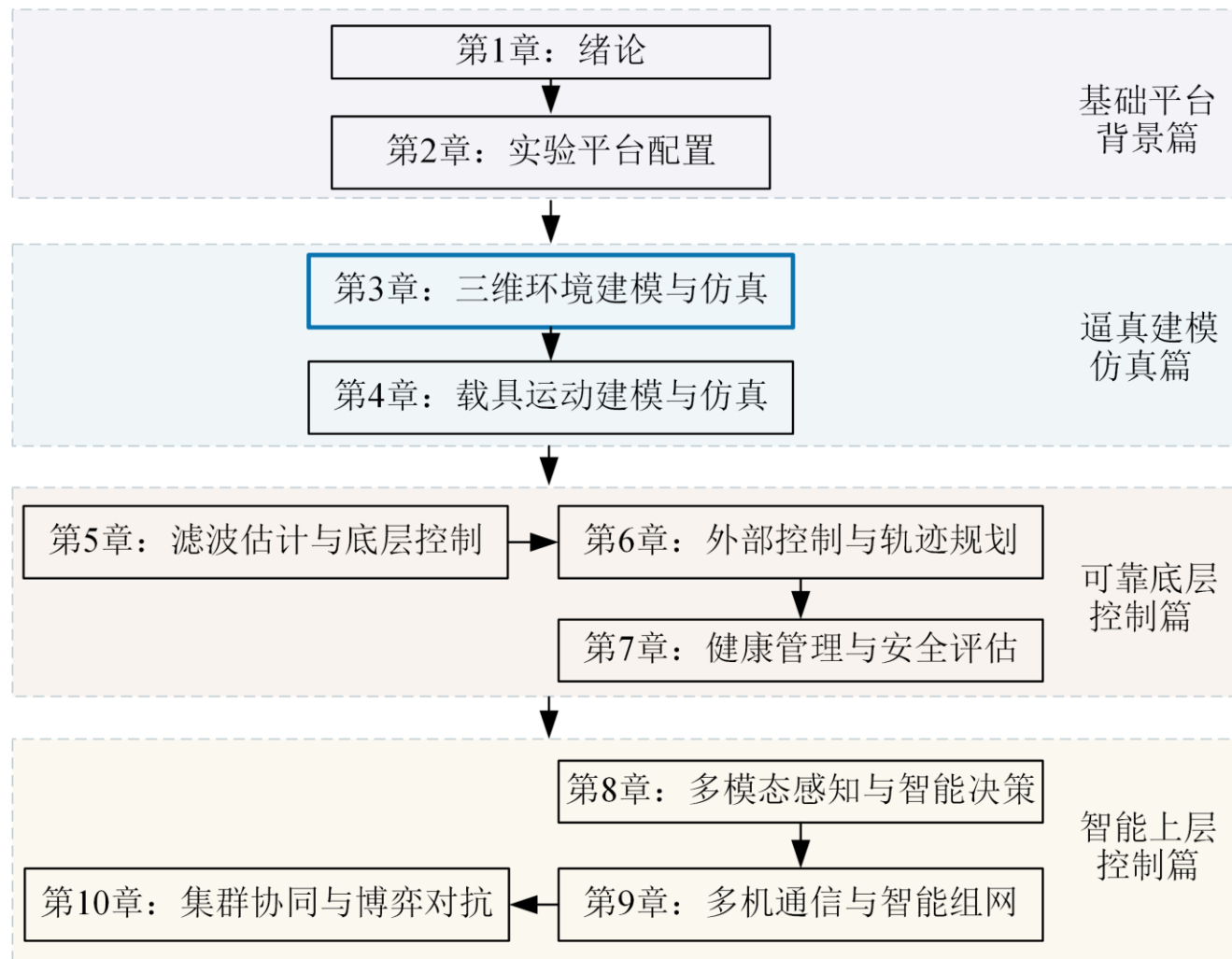
面向具身无人系统的建模、控制与仿真

智能无人系统 控制实践

戴训华/主编 全权 任雪峰/副主编



中国工信出版集团 电子工业出版社



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.



3.1 三维仿真基础与工具选型



本章学习目标

学完第三章能够完成什么

- 1 解释几何、材质、场景与传感器观测的关系
- 2 按资源来源选择建模、处理与场景制作工具
- 3 配置对象与接口，获取有坐标和时间含义的数据
- 4 复现配套例程，保存场景并解释一次改动的结果

三维仿真的价值，在于可重复地改变环境并观察算法的反应。



3.1 三维仿真基础与工具选型



本章目录

三维仿真基础与工具选型

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

3.1.1 背景知识与三维仿真流程

教材对应：第3.1.1—3.1.2节

3.1.2 三维仿真流程·模型建立与编辑

教材对应：第3.1.2节·模型建立与编辑

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作

教材对应：第3.1.3.1、3.1.3.3节

3.1.4 三维仿真工具·其他辅助工具

教材对应：第3.1.3.3节；采集见3.1.2

3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型

教材对应：第3.1.3.1—3.1.3.2节



3.1.1 背景知识与三维仿真流程：三维仿真的资源与观测 资源、场景、状态与观测

- **三维资源**：网格、材质、纹理或机器人结构等数据，可在不同场景中复用。
- **场景**：把地形、建筑、载具、光源和传感器组织到同一空间中。
- **运行状态**：记录对象的位置、姿态与部件运动；由运动模型或脚本持续更新。
- **传感器观测**：在指定状态与配置下生成图像、深度、点云等算法输入。
- **任务例子**：同一小屋模型在路边放两次形成场景；载具前进改变状态，相机随之看到不同遮挡。

资源描述对象，场景组织对象，状态与传感器共同决定观测。

3.1.1 背景知识与三维仿真流程：任务环境与观测条件 环境差异怎样进入无人系统任务



- **空间条件：**地面起伏、建筑间距和障碍位置决定可行路径。
- **观测条件：**纹理、反光和阴影影响目标识别与定位。
- **任务条件：**同一场景可服务空中、地面等不同载具。

图：不同环境中的三维场景

地形与遮挡影响通行，表面与光照影响视觉线索。

3.1.1 背景知识与三维仿真流程：仿真与AI控制闭环 三维环境与感知控制闭环

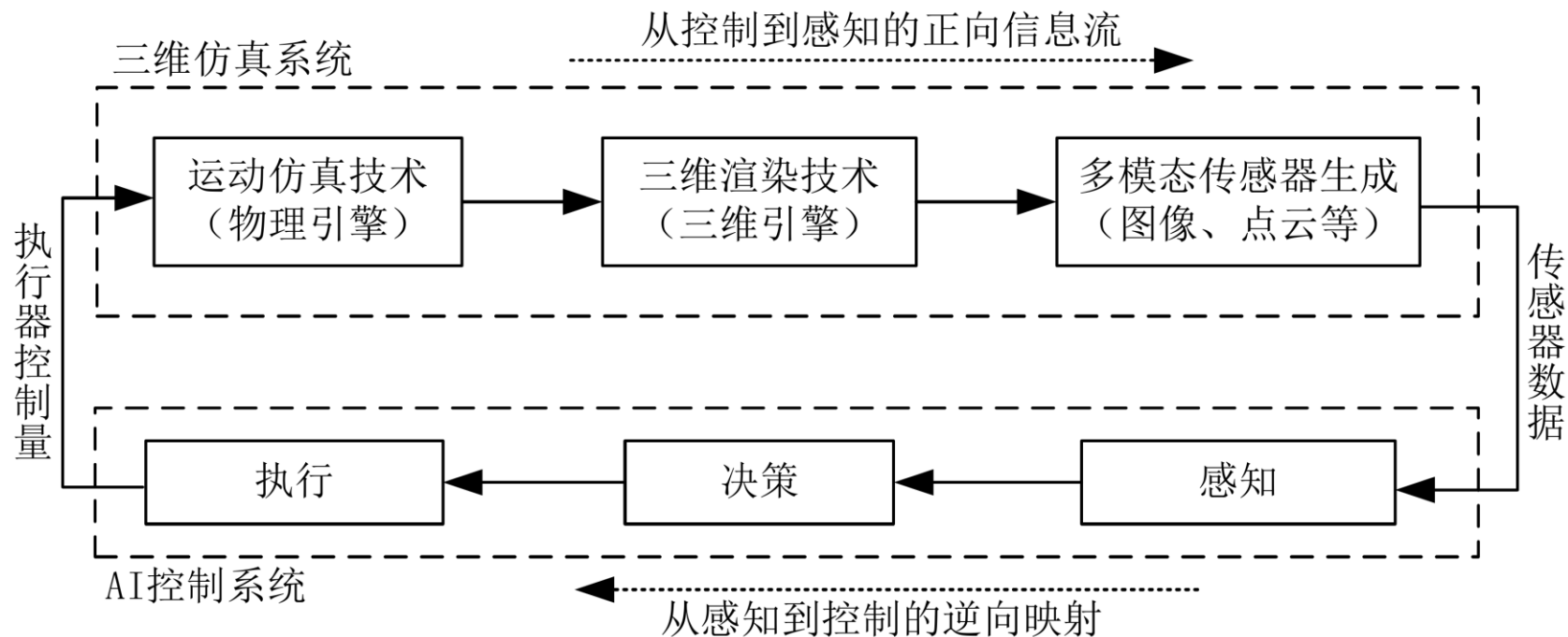


图3.1 三维仿真与AI控制系统关系

状态进入场景，场景形成观测，观测参与感知、决策与控制。



3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.1 背景知识与三维仿真流程：任务作用

同一场景怎样支撑感知、规划与训练

- **感知与融合**：固定相机和激光雷达配置，比较遮挡变化后的观测。
- **规划与协同**：重放同一障碍布局，比较路线和多载具避碰结果。
- **训练与评估**：只改变天气或光照，观察算法性能是否稳定。
- **人机交互**：显示状态与事件，让操作者检查、干预并复盘决策。

三维仿真为同一任务提供可重复的环境、观测和交互条件。





3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.1 背景知识与三维仿真流程：渲染、运动与传感器 渲染、物理与传感器的职责

环节	输入与产物	任务中的作用
渲染	场景、光照与相机 → 图像	提供可见外观
物理与运动	力、控制与约束 → 运动状态	计算运动与接触响应
传感器	场景与采样配置 → 观测数据	形成图像、距离等观测
交互与接口	按键、脚本与消息 → 运行操作	连接算法和实验条件

图像、运动响应与传感器数据来自不同计算环节。



3.1.1 背景知识与三维仿真流程：三维仿真流程 资源、场景与观测串起仿真流程

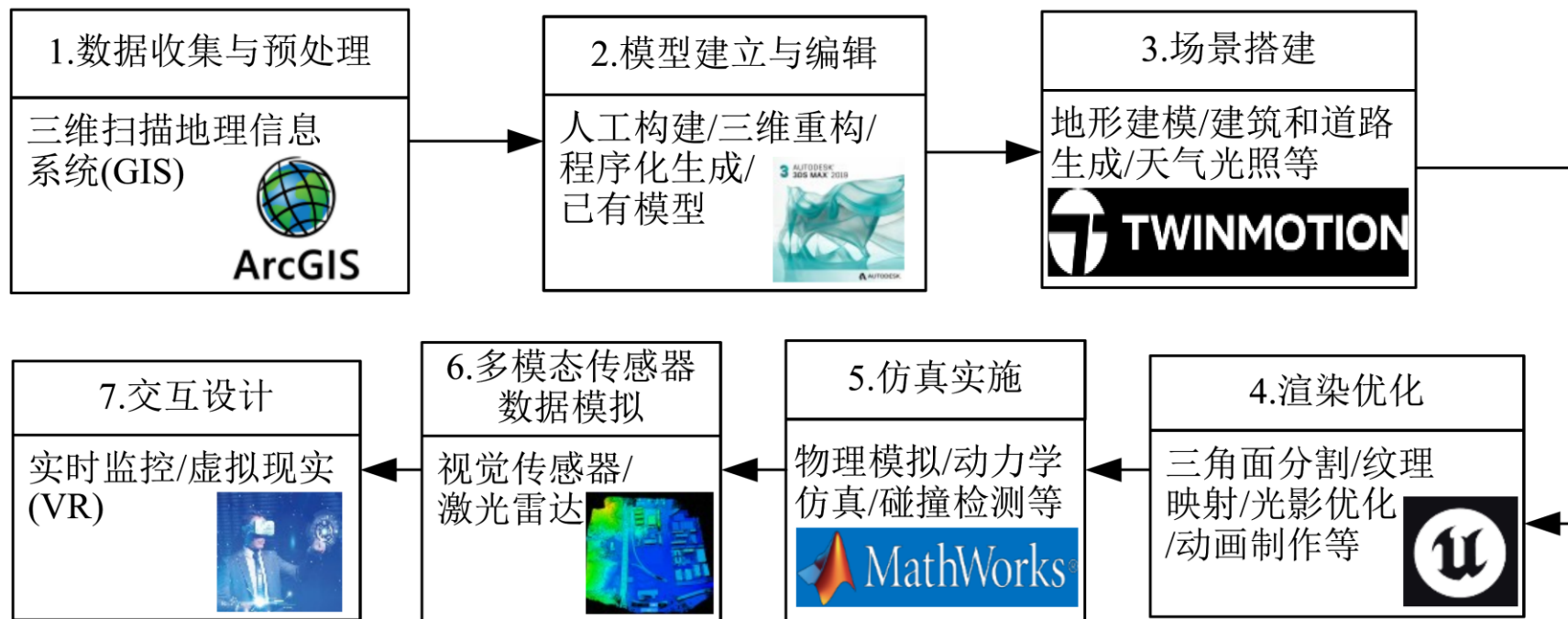


图3.2 三维仿真实现路线图

按已有输入进入相应阶段；静态背景可以跳过动作制作。



3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.1 背景知识与三维仿真流程：前三阶段 从现实数据到可运行场景

- **数据收集**：扫描、影像或地理数据进入清理与坐标核对。
- **模型建立**：把形状、外观和动作整理成可复用的对象资源。
- **场景搭建**：按尺度与坐标放置地形、建筑、载具、光源。
- **交付检查**：确认原点、单位和材质，再进入运行与观测环节。

每个阶段交付可检验的资源；已有资源时可跳过重新采集。





3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.1 背景知识与三维仿真流程：数据来源与资源复用 三种资源起点对应不同工作量

资源起点	新增工作	本章对应例程
已有模型或场景	导入、放置与参数配置	loadSimpleMesh / StarterContent
设计几何	建模、部件组织、材质	3dsMaxUsage / SketchUpUsage
真实环境数据	自采：扫描与清理 复用：加载与定位	自采：3DScannerScene 复用：Cesium

先复用可用资源，缺少几何或真实环境时再增加制作环节。





3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.1 背景知识与三维仿真流程：实时性与渲染质量 真实感与运行速度的任务取舍

- **视觉识别：**保留目标纹理、边缘和重要受光变化，使目标在图像中可辨。
- **通行与避障：**保留障碍轮廓、距离和通道宽度，远处微小装饰可以简化。
- **计算成本：**可见几何、光照和多相机视图增加渲染负担，影响数据到达速度。
- **比较方法：**固定布局与相机轨迹，只改变一个因素，才能解释结果差异。

保留会改变任务判断的细节，把计算量花在有效观测上。



3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.1 背景知识与三维仿真流程：技术难点

逼真场景为何还要管时序与算力

- **实时性**：相机30帧/秒时，每帧总预算约33毫秒。
- **多传感器**：图像与点云采样频率不同，需核对时间戳和坐标。
- **大场景**：细节、范围和动态对象越多，加载与更新越吃紧。
- **算力竞争**：渲染、物理与算法共享CPU/GPU，须按目标观测分配。

真实感、时序一致和运行速度需要按任务共同取舍。





3.1 三维仿真基础与工具选型



本章目录

三维仿真基础与工具选型

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

3.1.1 背景知识与三维仿真流程

教材对应：第3.1.1—3.1.2节

3.1.2 三维仿真流程·模型建立与编辑

教材对应：第3.1.2节·模型建立与编辑

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作

教材对应：第3.1.3.1、3.1.3.3节

3.1.4 三维仿真工具·其他辅助工具

教材对应：第3.1.3.3节；采集见3.1.2

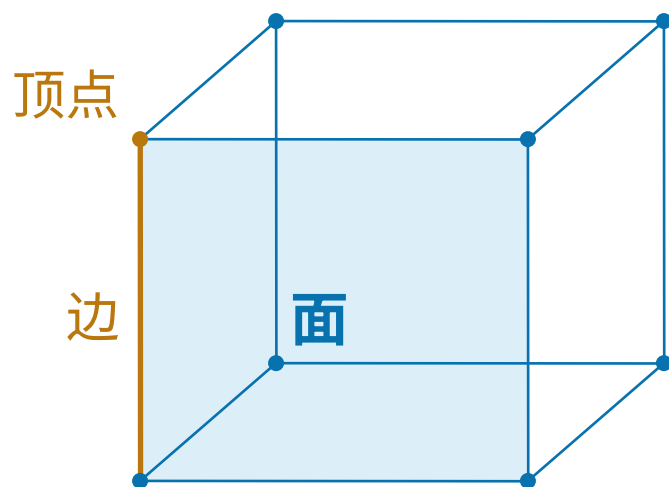
3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型

教材对应：第3.1.3.1—3.1.3.2节



3.1.2 三维仿真流程 · 模型建立与编辑：网格与拓扑

网格：顶点、边、面与连接关系



示意：浅蓝区域表示一个面

- **顶点与边**：顶点记录三维位置；边连接顶点，勾勒表面的边界。
- **面与拓扑**：面表达表面区域；面之间的连接关系决定开口与连续性。
- **编辑结果**：移动顶点会改变形状，删除一个面会使表面出现开口。

顶点给出位置，拓扑给出连接，网格共同确定物体表面。

3.1.2 三维仿真流程 · 模型建立与编辑：几何与外观

几何密度与表面外观

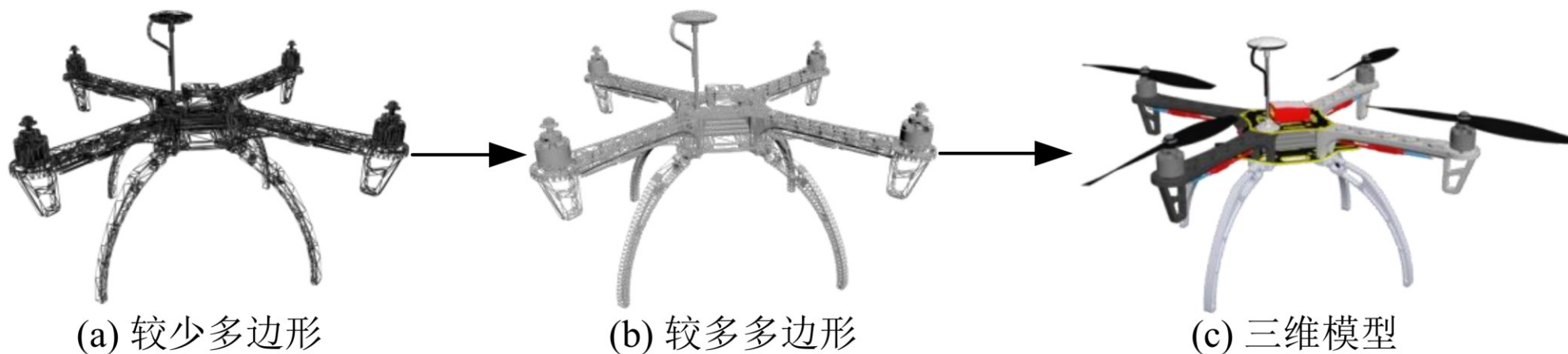


图3.3 几何形状定义和拓扑关系示意图

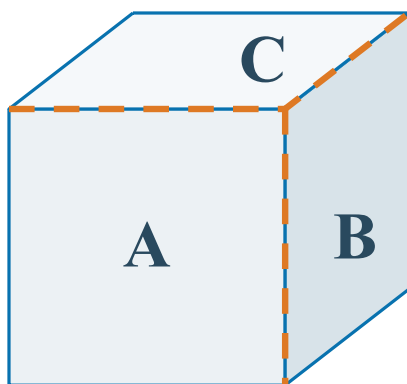
- **轮廓**：多边形过少时，曲面和边缘更容易显出棱角。
- **外观**：颜色与受光还由纹理和材质决定，并非只由面数决定。

3.1 三维仿真基础与工具选型

3.1.2 三维仿真流程 · 模型建立与编辑：UV与材质

UV展开：三维表面怎样对应二维纹理

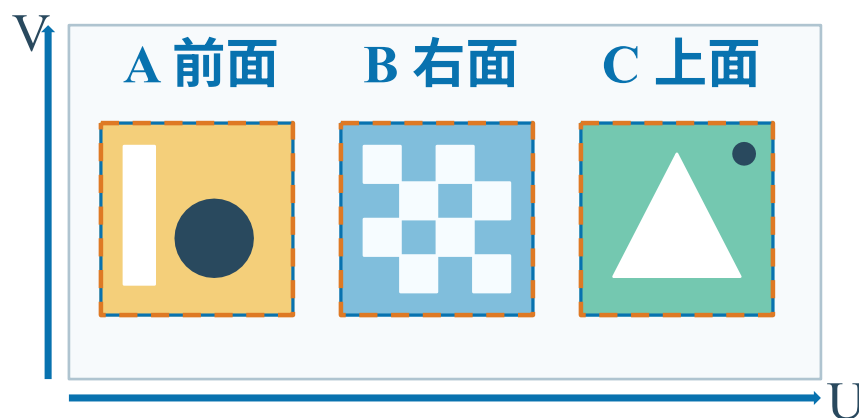
① 三维模型



展开



② UV岛叠加在已有纹理上

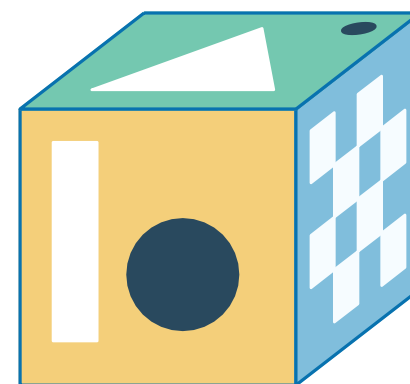


橙色虚线为展开接缝

取样



③ 贴图后的模型



三个面均显示对应纹理

示出前、右、上三面

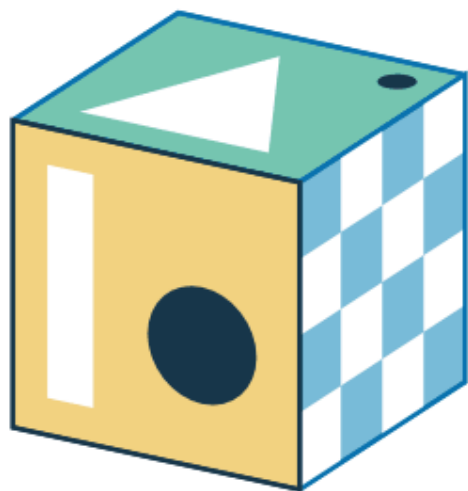
- **UV展开**：沿接缝把三维表面排成二维UV岛，确定纹理坐标（U、V）。
- **纹理取样**：按U（横向）、V（纵向）读取图像颜色，贴回对应表面。
- **材质**：组合纹理与粗糙度等参数，规定表面如何响应光照。

几何决定表面位置，UV定位纹理，材质决定受光表现。

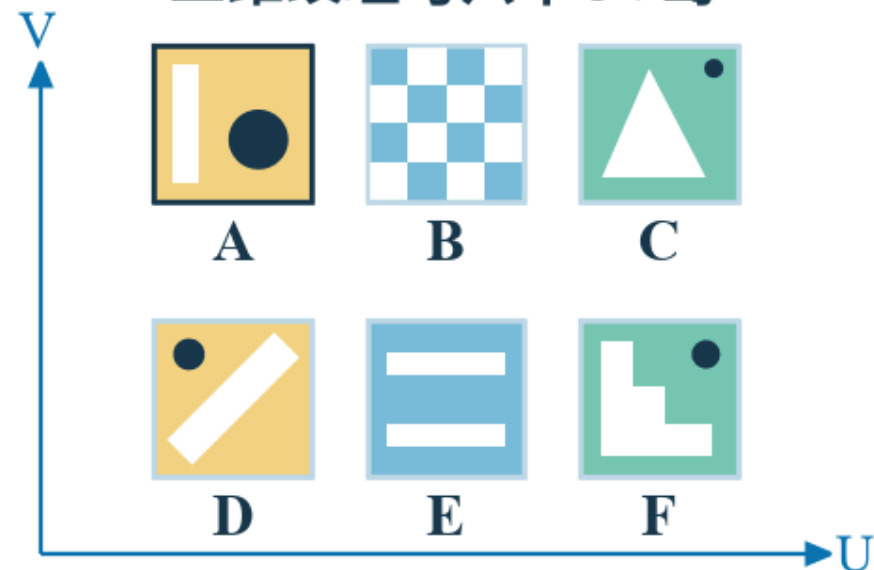
3.1.2 三维仿真流程 · 模型建立与编辑：UV与材质

沿接缝展开，再按UV把纹理贴回表面

贴图后的立方体



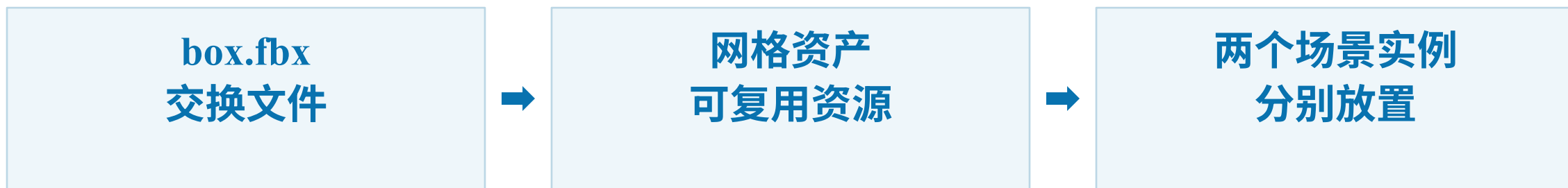
二维纹理与六个UV岛



A前 B右 C上 D左 E下 F后

图：六面展开是裁片类比；实际UV编辑建立坐标对应，不改变模型外形

3.1.2 三维仿真流程 · 模型建立与编辑：资产与实例 模型文件、引擎资产与场景实例



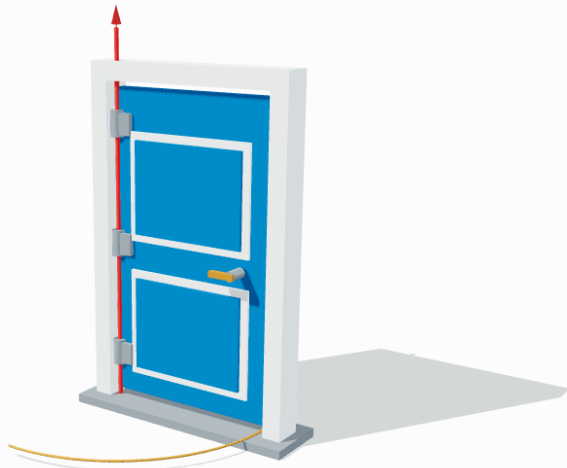
- **虚幻引擎（UE）资产：**导入后的网格与材质可被多个对象共享，避免重复制作。
- **独立变换：**实例分别记录位置、旋转和尺度；重摆一个实例不改变源文件。

同一个资产可被多个实例引用，各实例有自己的位置和状态。

3.1.2 三维仿真流程·模型建立与编辑：尺寸与转轴

尺寸、原点和转轴决定导入后的几何关系

红线：固定铰链轴



- **尺寸**：2m与2cm相差100倍，导入单位影响与载具的相对大小。
- **原点**：底部原点便于落地放置，中心原点便于对称旋转。
- **部件转轴**：门在铰链处转动，旋翼在电机轴处转动。

图：2m门板绕侧边铰链开合（示意）

导入前校准尺度、原点与转轴，物体才能正确落位并运动。

3.1.2 三维仿真流程·模型建立与编辑：文件用途

常见文件格式按数据用途区分

类型	常见格式	主要保留的信息
网格交换	FBX / OBJ / STL	以几何为基础；外观与动作随具体格式保存
运行时资源	glTF / GLB	场景层级、网格与表面数据
机器人描述	统一机器人描述格式 (URDF) 等	部件、关节与惯性
制作工程与场景	SketchUp (SKP) Twinmotion (TM)	保留工具中的编辑组织

选格式要看交接目标：外形、机器人结构与场景组织各不相同。



3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.2 三维仿真流程 · 模型建立与编辑：网格交换格式

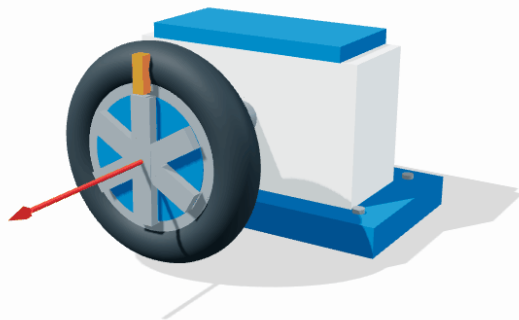
FBX、OBJ与STL分别交接什么

格式	主要交接内容	具体选择与条件
FBX	网格、层级、动画； 可转换的材质信息	带部件和动作交接； 复杂材质可能需要重建
OBJ	静态几何与UV； 外观常依赖MTL和纹理	带外观的静态网格； 附属文件一起保存
STL	以三角面保存表面几何	只需交接形状； 不承担完整外观和动画



3.1.2 三维仿真流程 · 模型建立与编辑：URDF结构 用连杆与关节描述机器人

连续旋转关节：不设角度限位



图：底座与车轮的关节运动（示意）

URDF入门模型与源码：https://github.com/ros/urdf_tutorial

- **结构文件**：采用可扩展标记语言（XML），用标签记录部件与连接关系。

- **连杆（link）**：一个刚性部件，可引用网格作为外观。

- **关节（joint）**：连接父子连杆，规定相对位姿、运动类型和轴。

URDF把部件连接成结构树，网格文件负责部件外形。

3.1.2 三维仿真流程 · 模型建立与编辑：URDF属性 URDF中的外观、碰撞与惯性

wheel_link：同一个车轮连杆

visual：精细网格与纹理

collision：简化圆柱

inertial：质量、质心、惯量

- **visual**：可见几何、材质和相对位姿，决定部件怎样显示。

- **collision**：接触检测使用的几何，常采用更简单的形状。

- **inertial**：质量、质心和转动惯量，参与动力学计算。

结构示意图：三类信息分别参与计算

同一连杆可用精细外观、简化碰撞体和独立惯性参数。

3.1.2 三维仿真流程·模型建立与编辑：URDF复用边界

URDF跨平台复用的范围

平台	使用方式	需要继续配置的部分
RflySim	导入URDF机器人资源	平台控制、观测与实验配置
Isaac Sim	转换成通用场景描述 (USD) 资产	驱动、碰撞与传感器属性
MuJoCo	读取URDF；原生模型使用 MuJoCo模型格式 (MJCF) 。	执行器、接触与仿真选项

MuJoCo模型与URDF扩展：<https://mujoco.readthedocs.io/en/stable/modeling.html>

复用机器人结构与网格，再按目标平台配置驱动、接触和传感器。



3.1 三维仿真基础与工具选型



本章目录

三维仿真基础与工具选型

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

3.1.1 背景知识与三维仿真流程

教材对应：第3.1.1—3.1.2节

3.1.2 三维仿真流程·模型建立与编辑

教材对应：第3.1.2节·模型建立与编辑

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作

教材对应：第3.1.3.1、3.1.3.3节

3.1.4 三维仿真工具·其他辅助工具

教材对应：第3.1.3.3节；采集见3.1.2

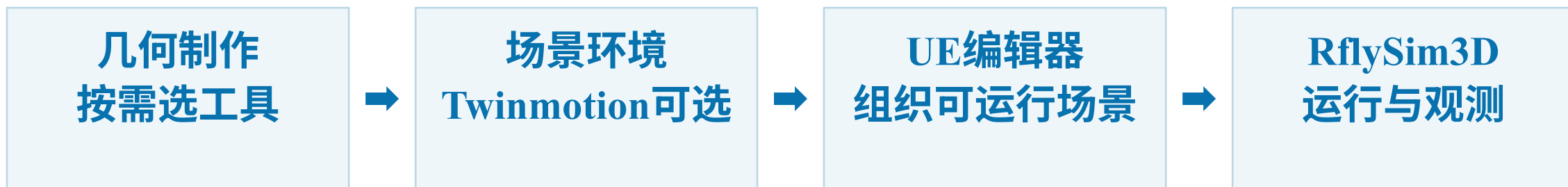
3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型

教材对应：第3.1.3.1—3.1.3.2节



3.1.3 三维仿真工具 · 建模与场景制作：工具分工总览

从几何制作到运行：按任务选工具



· **几何**：3ds Max、Blender或SketchUp；制作网格、材质与纹理。

· **资产复用**：已有模型或Fab资产可直接导入UE，跳过从零建模。

· **环境**：在UE中布置场景；Twinmotion可补材质、植被与光照。

· **运行**：UE组织对象与行为；RflySim3D连接运动状态与观测。

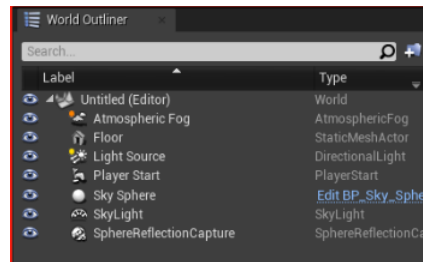
几何、环境和运行各有产物；已有资产可复用，无需走完全部工具。

3.1.3 三维仿真工具 · 建模与场景制作：UE编辑与运行 UE编辑器与RflySim3D运行程序

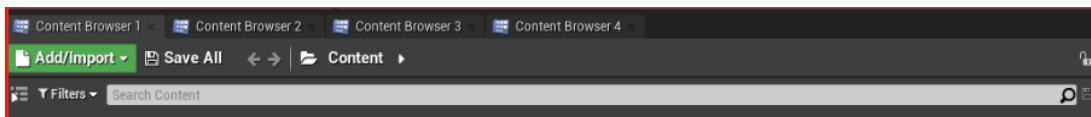
场景视口 预览三维场景



对象列表 场景对象 (Actor)



内容浏览器：管理模型与材质资源



图：UE编辑器的三个区域（局部）

· **虚幻引擎（UE）**：组织场景、渲染、交互与可扩展行为。

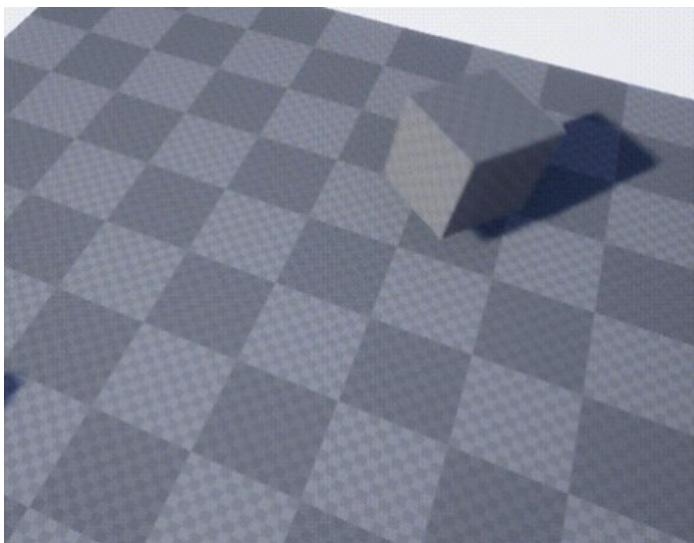
· **编辑侧**：盒体例用UE4.27.2；新建空白工程，制作关卡与蓝图。

· **运行侧**：RflySim3D加载资源，连接对象状态与传感器。

编辑器制作场景与行为，运行程序加载资源并响应实验输入。

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作：蓝图与C++

蓝图与C++怎样分工



图：蓝图箱体例程中的运行场景

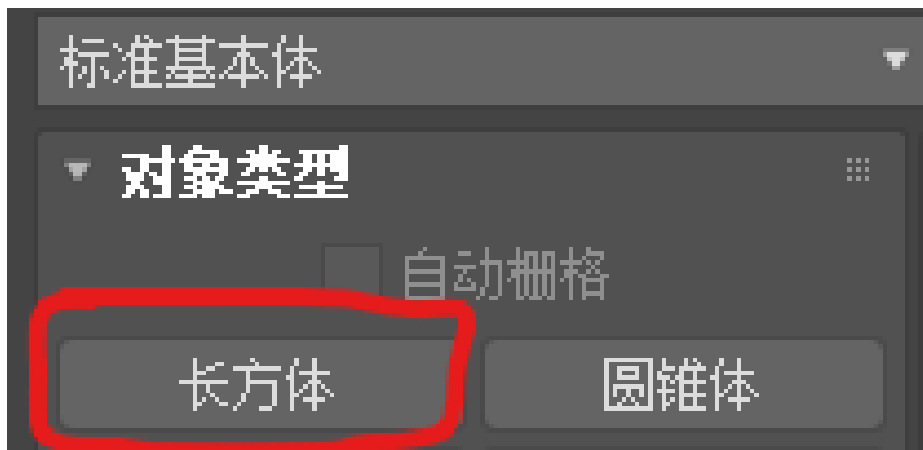
- **蓝图**：可视化脚本组织事件、变量和操作，便于查看行为关系。
- **C++**：扩展组件、插件与接口，可与蓝图配合。
- **运行验证**：编译保存蓝图，拖入关卡后点击Play，观察箱体旋转。

UE关卡、资产与蓝图文档：<https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine>

蓝图便于连接场景行为，C++便于扩展底层能力与原生接口。

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作：3ds Max建模 精细网格与部件怎样编辑

创建面板：标准基本体 → 长方体



图：长方体创建选项（局部）

· **职责：** 建立和修改网格，组织独立部件与动画。

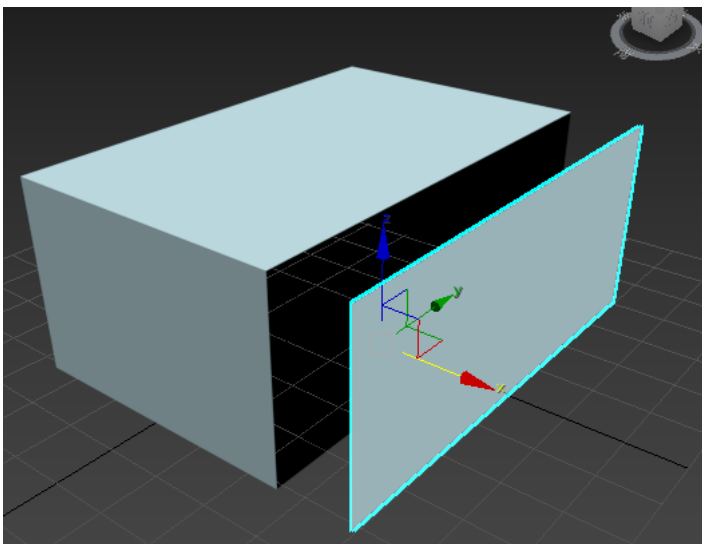
· **优势：** 多边形编辑和变换控制细，适合载具部件加工。

· **产物：** 保留制作工程，导出box.fbx等交换资源。

3ds Max建模与导出帮助：<https://help.autodesk.com/view/3DSMAX/2024/ENU/>

3ds Max把尺寸与部件要求转成可交换的模型资源。

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作：3ds Max对象组织 分离对象与合并网格



图：箱体面板分离为独立对象

- **分离 (Detach)**：分离为对象后，选定面可单独移动或旋转。
- **附加 (Attach)**：多个部分合为网格，便于统一管理。
- **迁移应用**：机身与舵面分开，后续再配置转轴和控制。

独立运动的部分保留独立对象，静态部分可按需要合并。

3.1.3 三维仿真工具 · 建模与场景制作：模型交接

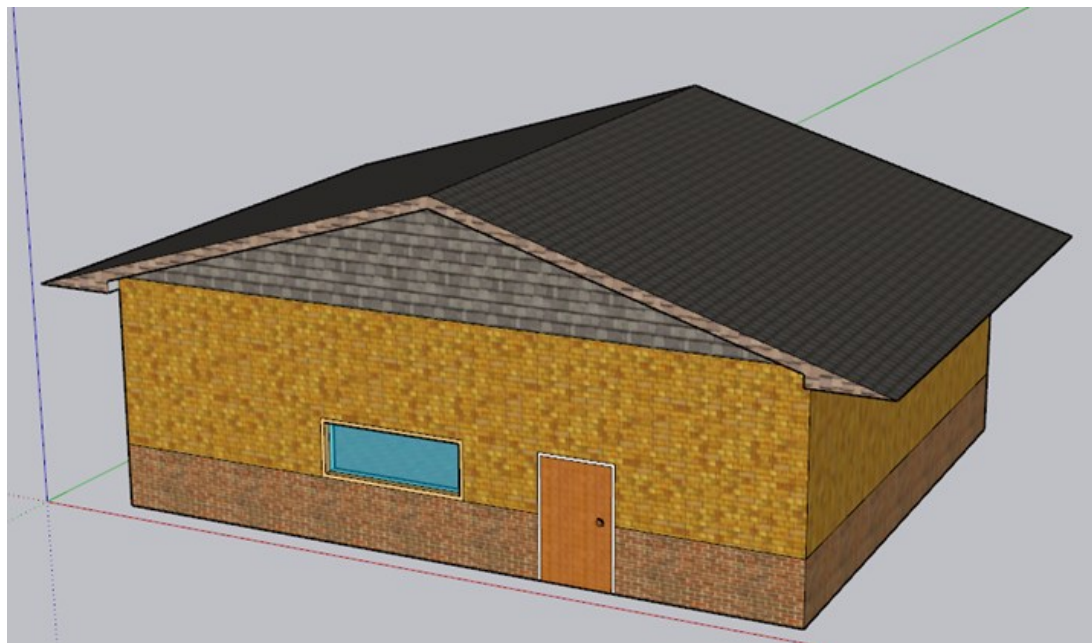
3ds Max模型交接：几何与依赖一起保存



- **几何交接：**保留单位、朝向和部件命名，导入后用已知尺寸检查比例。
- **外观交接：**纹理可关联或嵌入；复杂材质需按目标引擎重新建立。

交付模型时保留编辑工程和纹理依赖，换平台后才便于修复。

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作: SketchUp建筑 从平面轮廓快速建立建筑

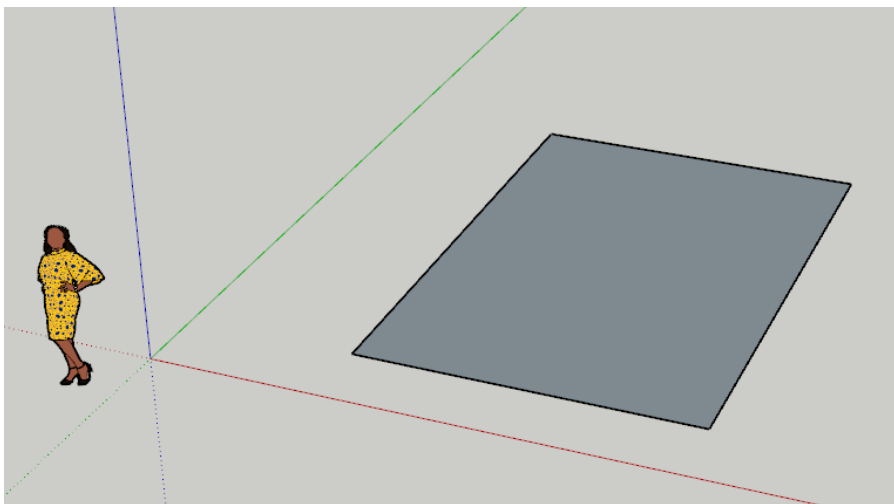


- **建模思路**: 平面轮廓推拉成三维体量。
- **适用任务**: 小屋、房间与建筑布局，便于快速修改尺寸。
- **交接产物**: house.skp保存模型组织，供后续场景装饰。

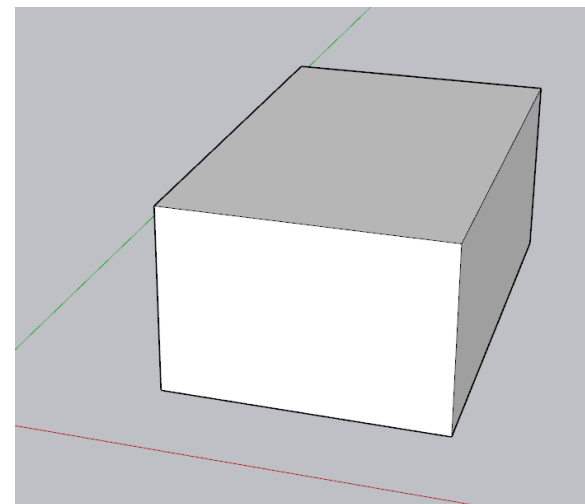
图: SketchUpUsage的house.skp

SketchUp推拉建模教程: <https://help.sketchup.com/en/sketchup/pushing-and-pulling-shapes-3d>

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作: SketchUp推拉平面怎样通过推拉变成立体



矩形面：建立平面轮廓

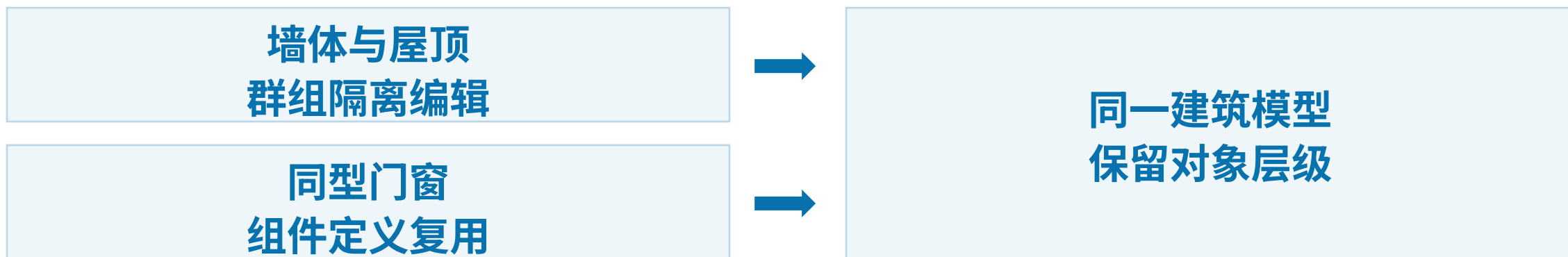


推拉后：形成箱体

- **基本过程：** 封闭轮廓 → 生成面 → 推拉厚度 → 调整尺寸。
- **建筑迁移：** 墙体、门洞和屋顶先定几何，再添加纹理与环境。

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作: SketchUp对象复用

SketchUp群组与组件组织建筑



- **群组**: 把一部分几何包在一起, 减少相邻边面相互牵连。
- **组件**: 多个实例共享定义; 修改共享定义会同步影响对应实例。

SketchUp组件与实例: <https://help.sketchup.com/en/sketchup/components>

重复门窗用组件共享定义, 改一处可同步更新各实例。



3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作：Blender替代路线 开源工具支持网格建模与资产制作

- **功能：**网格、UV、材质、骨骼和动画可在同一工具中制作。
- **盒体例子：**对象模式移动整个盒体；编辑模式修改顶点或面，改变盒体形状。
- **课程用法：**用Blender制作盒体并导出FBX，可接续本章的模型导入。
- **保存工程：**.blend保留可编辑对象；FBX用于交换，纹理文件一并交付。

Blender网格编辑手册：<https://docs.blender.org/manual/en/4.2/modeling/meshes/index.html>

Blender整合建模、材质与动画，可交付同类资源而无需沿用同一软件。

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作：Twinmotion环境布置 给已有几何布置环境



- **输入：** 导入house.skp，保留建筑的对象层级。
- **加工：** 替换墙面材质，再布置草木与灯光，观察外观变化。
- **产物：** 保存house.tm；按配套版本导出面向UE的场景资源。

图：house.skp在Twinmotion中的场景效果

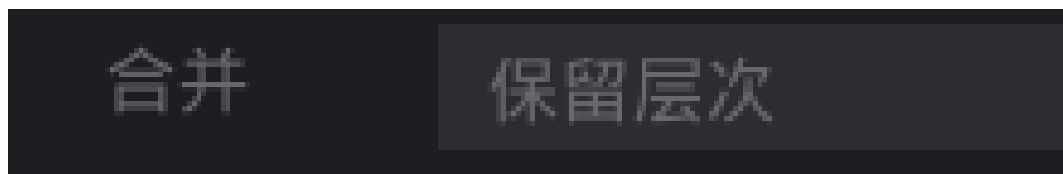
Twinmotion场景制作课程：<https://www.twinmotion.com/learning-resources>

建模工具确定几何，Twinmotion快速组织外观、植被与光照。

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作: Twinmotion对象组织

Twinmotion导入时怎样选择对象组织

几何体导入：合并方式



“保留层次” 保留源模型的对象层级。

图：小屋导入的合并选项（局部）

- **保留层级**：沿用源模型对象关系，便于逐部件修改。

- **按材质合并**：同材质几何合并组织，减少管理对象。

- **控制需求**：要分别移动的门、舵面等部件保留独立性。

保留层级便于逐对象编辑，合并适合无需独立控制的部分。

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作: Datasmith场景交接 把设计场景交接给UE

Datasmith: 将设计场景导入UE的一套工具与数据交换方式。

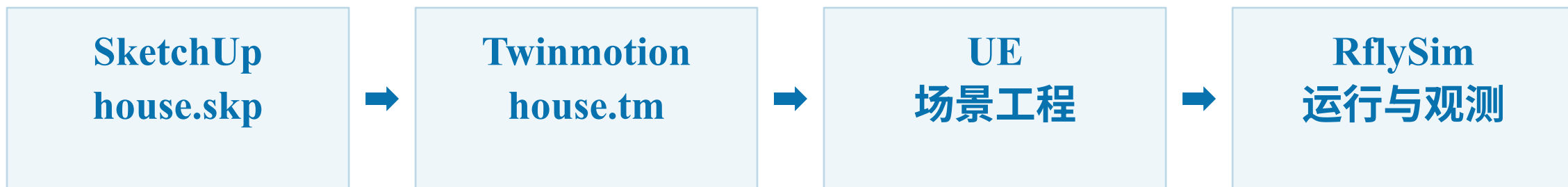


- **交接文件:** .udatasmith保存场景描述, 配套资源目录保存网格与纹理, 需一起复制。
- **版本配套:** 按例程匹配Twinmotion、Datasmith插件与UE; 导入后仍需在UE设置行为。

场景描述文件与附属资源一起传递, 保留可用的对象组织。

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作：小屋工具链

小屋案例中的工具分工



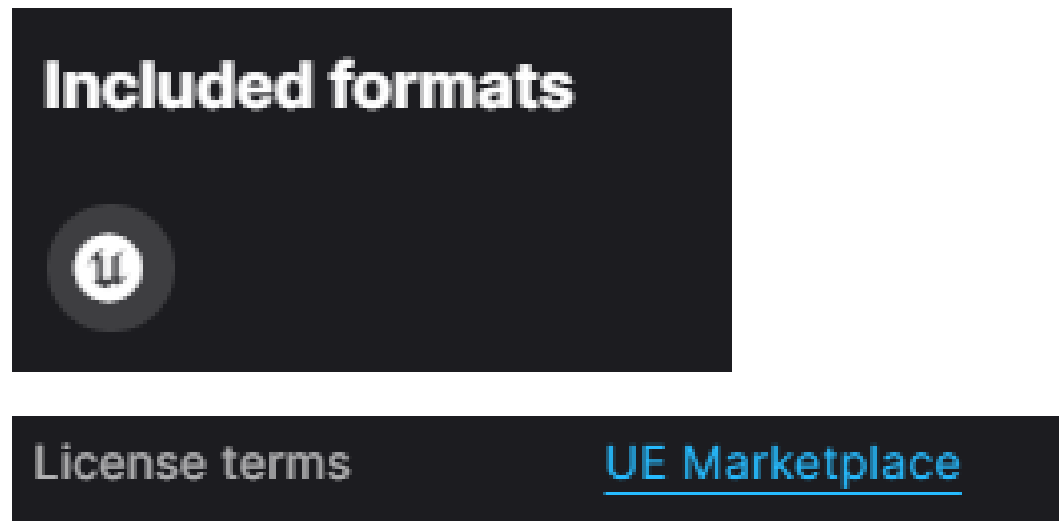
- **SketchUp**：几何与对象层级。
- **UE**：场景对象与运行行为。
- **Twinmotion**：材质、植被与光照。
- **RflySim**：运动状态、控制与观测。

新版Twinmotion到UE的Datasmith交接流程：

<https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/twinmotion/twinmotion-to-unreal-engine-workflow>

工具交接的不只是文件，还包括对象层级、纹理依赖和运行接口。

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作: Fab资源获取 获取可复用模型与引擎资源



- **资源类型**: 模型、材质、场景内容和插件用途不同。
- **技术条件**: 格式与UE版本匹配, 纹理和插件依赖完整。
- **使用条件**: 按资源授权使用与分发, 保留来源记录。

图: Fab资源的格式与许可 (局部)

Fab资源检索与下载: <https://www.fab.com/>

资源市场缩短制作时间, 筛选依据是格式、版本、依赖与授权。



3.1 三维仿真基础与工具选型



本章目录

三维仿真基础与工具选型

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

3.1.1 背景知识与三维仿真流程

教材对应：第3.1.1—3.1.2节

3.1.2 三维仿真流程·模型建立与编辑

教材对应：第3.1.2节·模型建立与编辑

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作

教材对应：第3.1.3.1、3.1.3.3节

3.1.4 三维仿真工具·其他辅助工具

教材对应：第3.1.3.3节；采集见3.1.2

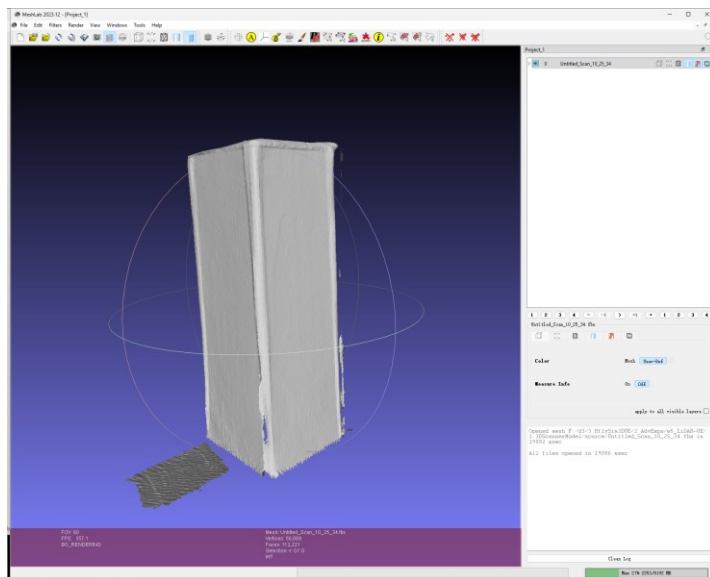
3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型

教材对应：第3.1.3.1—3.1.3.2节



3.1.4 三维仿真工具 · 其他辅助工具：实景采集

实景资源：扫描、摄影测量与地理数据

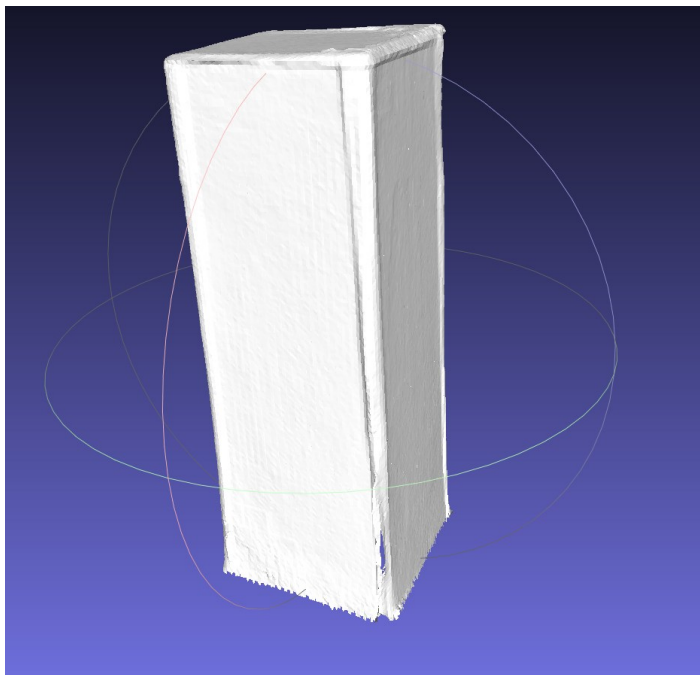


图：扫描模型导入MeshLab（配套例程截图）

- **摄影测量**：多视角照片恢复几何与纹理；MeshLab可清理网格。
- **深度与激光扫描**：采样形成点云或网格；Open3D可处理点云。
- **地理数据**：保留位置、高程基准；支持大范围场景。Cesium加载，GIS与CityEngine辅助城市建模。

实景采集提供几何和外观，清理与定位把数据变成可用资源。

3.1.4 三维仿真工具 · 其他辅助工具：扫描网格修复 **MeshLab：清理与修复扫描网格**



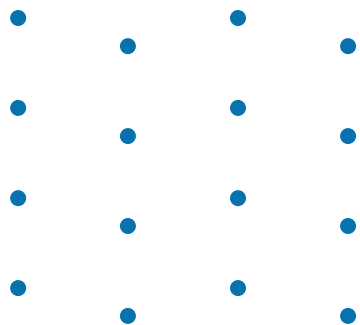
图：例程中清理后的扫描网格

- **清理**：删除背景碎片和孤立几何，检查表面朝向（法线）。
- **修复**：对采集缺口补面，保留任务需要的真实开口。
- **交接**：导出OBJ等资源，同时保留纹理与材质依赖。

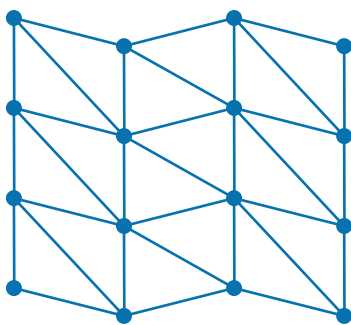
MeshLab网格处理与扫描教程：<https://www.meshlab.net/>

3.1.4 三维仿真工具 · 其他辅助工具：点云与网格

点云与网格保存的信息不同



采样点



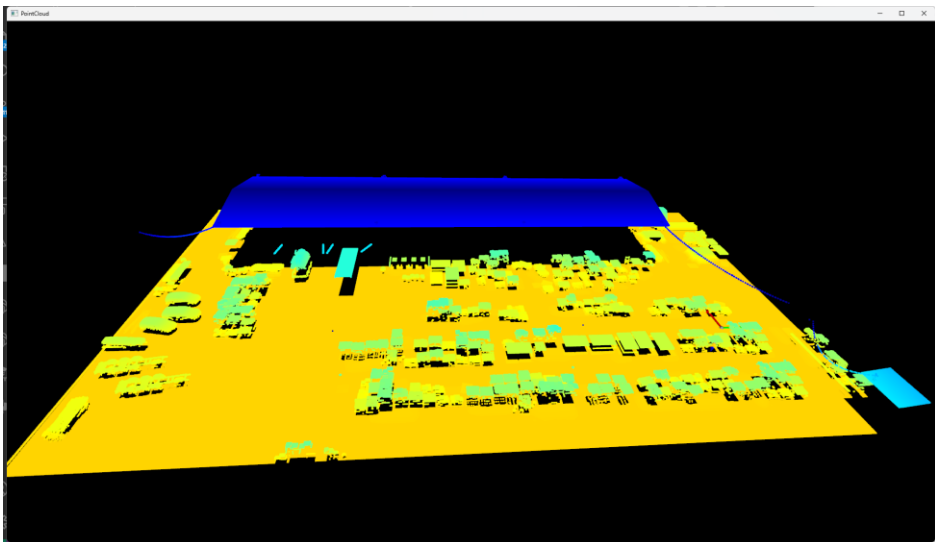
连接后的网格

- **点云**：保存点的位置，可附带颜色、法线等属性。
- **网格**：用面连接顶点，表达和渲染连续表面。
- **高度图**：每个平面位置记录一个高度，不能同时表达桥面与桥下地面。

示意：同一组位置，不同的数据组织

点云保存采样点，网格增加表面连接，两者服务不同的数据处理。

3.1.4 三维仿真工具 · 其他辅助工具：Open3D数据处理 在Python中处理三维数据



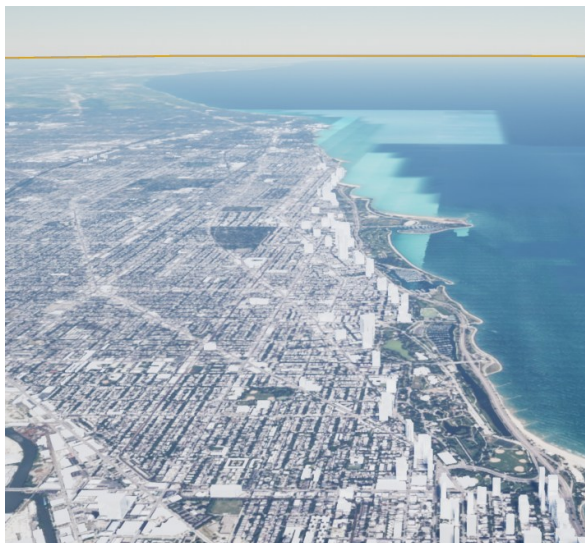
图：地形例程的Open3D点云显示

- **接口：** Python或C++操作点云与网格，便于写入算法流程。
- **数据处理：** 降采样减少密集点；配准估计两组点云的相对位姿，使重叠表面对齐。
- **例程产物：** VisTerrainPcd.py把地形坐标数组装入点云对象并显示。

Open3D点云处理教程：<https://www.open3d.org/docs/release/tutorial/geometry/pointcloud.html>

Open3D把几何采样变成可读写、可计算和可视化的数据对象。

3.1.4 三维仿真工具·其他辅助工具：Cesium地理加载 按地理位置加载大范围三维数据



- **作用：**在UE中加载地形、影像与3D Tiles等地理资源。
- **优势：**按位置和视距组织大范围数据，减少逐个手工建模。
- **定位：**原点对应局部场景位置，高程基准规定高度起算面。

图：Cesium例程加载的城市区域

Cesium地形与建筑快速入门：<https://cesium.com/learn/unreal/unreal-quickstart/>

地理定位与分块加载使大范围环境可以进入局部仿真实验。



3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.4 三维仿真工具 · 其他辅助工具：在线与离线资源

Cesium在线资源与离线资源

- **在线加载：** 按需从服务获取数据，网络与访问权限影响资源是否完整。
- **离线加载：** 将已授权的数据部署到本地，按确定版本组织实验。
- **数据准备：** CesiumLab等工具可转换和发布三维地理数据，再由Cesium加载。
- **复现实验：** 记录区域、来源和版本；离线专题须匹配所装版本的例程与授权。

在线服务便于获取与更新，离线数据便于固定实验环境。



3.1.4 三维仿真工具 · 其他辅助工具：规则化城市

CityEngine与GIS：批量构建城市环境



- **地理信息系统（GIS）**：管理空间参考、区域范围和地理数据处理。
- **规则建模**：对地块轮廓应用楼高、层数等规则，生成建筑体量与立面。

CityEngine规则建模学习：

<https://learn.arcgis.com/en/paths/learn-the-basics-of-procedural-modeling/>

GIS管理空间数据，CityEngine用规则把区域几何扩展为建筑。



3.1 三维仿真基础与工具选型



本章目录

三维仿真基础与工具选型

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

3.1.1 背景知识与三维仿真流程

教材对应：第3.1.1—3.1.2节

3.1.2 三维仿真流程·模型建立与编辑

教材对应：第3.1.2节·模型建立与编辑

3.1.3 三维仿真工具·建模与场景制作

教材对应：第3.1.3.1、3.1.3.3节

3.1.4 三维仿真工具·其他辅助工具

教材对应：第3.1.3.3节；采集见3.1.2

3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型

教材对应：第3.1.3.1—3.1.3.2节





3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型：引擎与框架

三维引擎、图形工具包与框架

选择	层级与组织方式	适用条件
UE	引擎：关卡、场景对象（Actor）、组件与蓝图	已有UE资产 或RflySim工程
Unity / Godot	引擎：场景、对象或节点与脚本	已有脚本经验 与相应项目生态
OpenSceneGraph (OSG) / Panda3D	OSG：图形工具包 Panda3D：三维引擎	已有程序化开发代码 或自定义渲染需求
Delta3D	仿真应用框架	已有框架项目 与接口依赖

成熟资产与团队代码决定迁移成本，引擎选择服务于项目交付。





3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型：仿真平台 仿真平台按模型与实验接口选用

平台	主要用途	学习时关注的接口
RflySim	无人系统开发与验证	状态、控制、传感器与半实物
Gazebo	机器人仿真与系统集成	模型、传感器与通信
CarSim	车辆动力学与联合仿真	车辆输入输出与模型参数
AirSim原项目	无人机/车辆与视觉实验	图像、状态与外部控制

专用平台提供领域模型，通用平台侧重对象扩展与系统集成。



3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型：Isaac Sim与MuJoCo

按视觉数据与接触控制任务选择仿真工具

- **Isaac Sim**：用USD组织场景，集成物理、传感器与合成数据工具。
- **MuJoCo**：用MJCF组织多关节模型，计算接触与控制响应。
- **抓取控制**：已有MJCF模型时，可在MuJoCo中迭代接触与执行器控制。
- **视觉任务**：需要组织相机、光照与标签数据时，可选Isaac Sim的相应工具。

Isaac Sim传感器配置与数据读取：

<https://docs.isaacsim.omniverse.nvidia.com/latest/sensors/index.html>

资源能复用，仿真器的场景表达、执行器和实验 workflows 各有侧重。



3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型：资源工具选型 资源制作工具按任务选用

需要解决的问题	任务与工具对应	得到的产物
建筑与载具部件	简单建筑：SketchUp 精细部件：3ds Max / Blender	几何与独立部件
材质与环境布置	外观布置：Twinmotion 行为设置：UE	可编辑场景
网格与点云处理	交互式网格清理：MeshLab 程序化点云处理：Open3D	整理后的几何数据
大范围地理场景	加载地理数据：Cesium 规则城市：CityEngine+GIS	定位后的区域资源

缺什么数据，就学习产生或修复该数据的工具。





3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型：例程学习入口

第三章例程中的工具学习入口

例程文件夹	入门内容	可检查的产物
1.UEB BlueprintUsage 2.3dsMaxUsage	行为与几何编辑	箱体蓝图 / box.fbx
4.SketchUpUsage 5.TwinmotionUsage	建筑与场景装饰	house.skp / house.tm
3.CesiumForUnrealUsage	地形与城市加载	有地理参考的场景
6.EpicFabUsage	资源筛选与获取	符合工程要求的资源

例程广场 → 第3章 → 0.ApiExps → e0_DevToolsUsage；先读对应Readme.pdf。

先完成一个小产物，再进入对应的完整资源开发实验。





3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型：资源实践

通过复用、建模与扫描准备场景资源

资源起点	第三章内的相对目录	得到的产物
已有模型	1.BasicExps/e4_CusLoadObj/ 2.loadSimpleMesh	test.glb 场景实例
手工建模	0.ApiExps/e0_DevToolsUsage/ 4.SketchUpUsage → 5.TwinmotionUsage	house.skp house.tm
室内扫描	2.AdvExps/e5_LiDAR-UE/ 2.3DScannerScene	扫描场景

统一入口：例程广场 → 第3章；按上表目录进入，先读对应Readme.pdf。

已有资源先跑通，资源不足再制作，最后把观测接入算法。





3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型：数据实践

读取地形点云、载具状态与图像

数据任务	第三章内的相对目录与脚本	得到的数据
地形点云	1.BasicExps/e3_RflySim3DTerrainPcd 脚本：VisTerrainPcd.py	点云对象 三维显示
状态与图像	0.ApiExps/e6_RflySim3DCtrlAPI/ 10.GetCamObjDemo 脚本：GetCamObjDemoWithCam.py	状态元数据 图像数组

统一入口：例程广场 → 第3章。前者处理已有几何，后者请求场景状态与观测。

地形点云用于几何处理，状态与图像接口把场景数据送入算法。





3.1 三维仿真基础与工具选型



3.1.5 三维仿真工具·平台比较与选型：后续分工

3.1与后续各节的分工

后续内容	在3.1已认识	后续新增知识
3.2 引擎与渲染	网格、材质、UE	对象更新、渲染与蓝图机制
3.3–3.4 观测与接口	观测与资源的区别	成像、采样、坐标与数据格式
3.5 资源开发	格式与工具产物	导入、配置、烘焙与部署
3.6–3.7 实验与应用	任务驱动选型	例程复现、改动与结果解释

资源要进入算法，还须弄清运行状态、采样机制和接口配置。

