本章目录

多模态传感器：从场景渲染到可用数据

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 4 个教学单元

3.3.1 多模态数据与视觉图像

教材对应：第3.1.4.6节（导语、视觉图像）

3.3.2 深度图与分割图

教材对应：第3.1.4.6节（深度图、分割图）

3.3.3 红外热图与激光点云

教材对应：第3.1.4.6节（红外、激光点云）

3.3.4 观测有效性与时间配对

教材对应：第3.2.1.3节

3.3.1 多模态数据与视觉图像：生成基础

虚幻引擎（UE）用渲染、射线与多通道缓冲生成传感数据

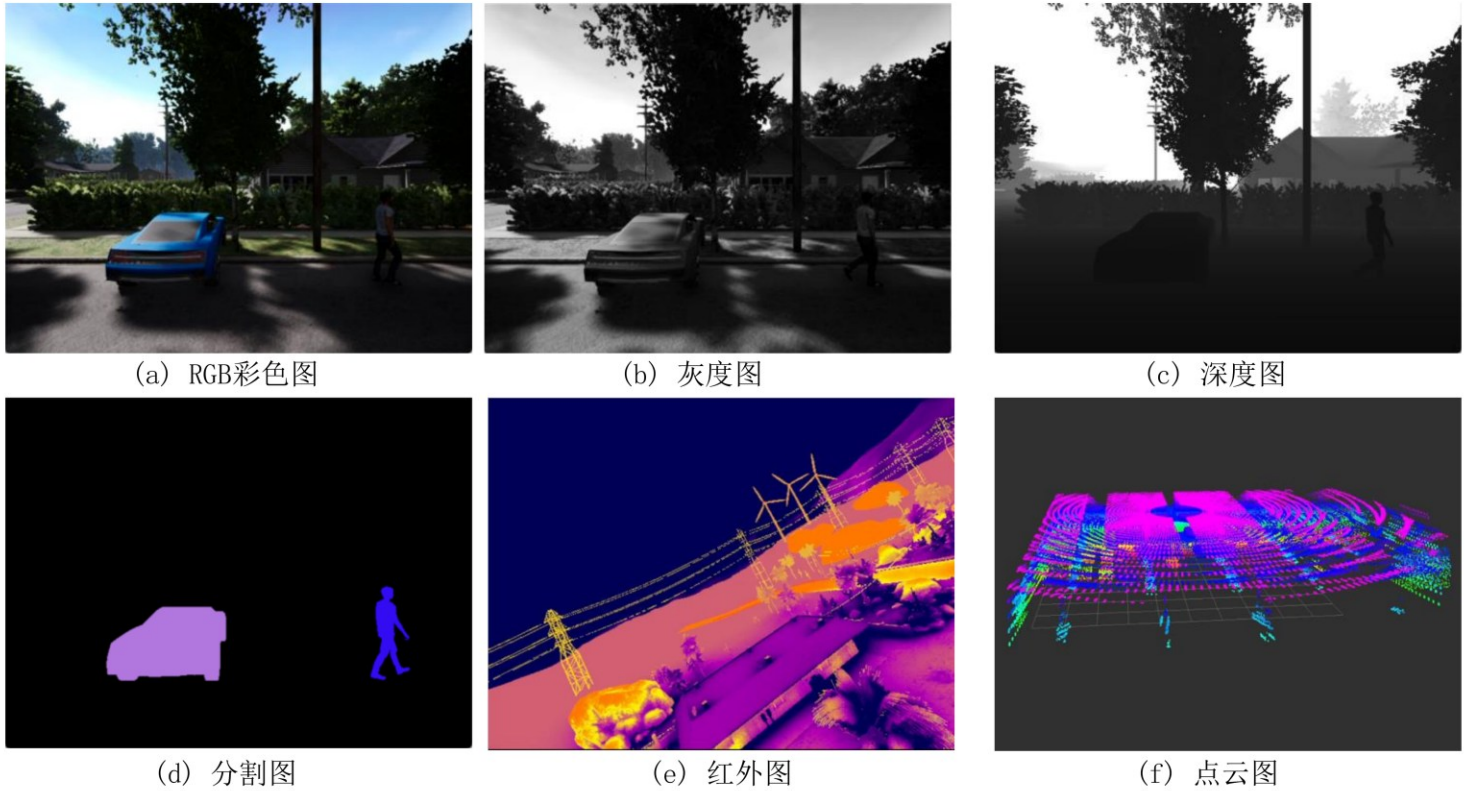
- 物理渲染：基于物理的渲染（PBR，课件3.2已介绍）按材质参数和光照计算反射，使彩色图接近真实相机成像。
- 射线检测：从传感器位置沿设定方向发射射线，返回命中点的坐标、距离、法向和材质，是激光点云的基础。
- 多通道渲染：同一帧可输出颜色、场景深度、自定义深度与模板等多个缓冲，分别形成彩色图、深度图和分割图。
- 蓝图与C++：用脚本设置传感器参数、读取结果并发给外部程序，使传感数据与人工智能算法、控制系统闭环联动。

渲染给出外观，射线给出距离，多通道缓冲给出深度和标签。

3.3 多模态传感器数据生成

3.3.1 多模态数据与视觉图像：教材图3.5

六种输出分别记录外观、距离、类别、热差与空间点



(a) RGB彩色图　(b) 灰度图　(c) 深度图

(d) 分割图　(e) 红外图　(f) 点云图

图3.5 RflySim多模态传感器数据预览

3.3.1 多模态数据与视觉图像：观测类型

不同观测分别记录外观、几何、标签与热值

- **外观：**彩色图保留颜色与明暗，灰度图用一个亮度通道描述边缘和纹理。
- **几何：**深度图把距离编码到像素，点云把空间采样结果写成坐标列表。
- **标签：**分割图依据场景赋值区分对象，标签表把颜色关联到类别或实例。
- **热值：**红外仿真把对象的热值映射为灰度或伪彩色，可用于观察热差。
- **任务例子：辨认车色用彩色图，计算车距用深度，像素分类用分割标签。**

任务需要哪种信息，就选择保留该信息的传感器输出。

3.3.1 多模态数据与视觉图像：彩色与灰度

彩色和灰度保留不同的外观线索



(a) RGB彩色图

图3.5（a）RGB彩色图

材质与光照形成彩色外观；
彩色保留物体间的颜色差异。



(b) 灰度图

图3.5（b）灰度图

灰度保留亮度边缘和纹理；
颜色差异转为明暗差异。

3.3.1 多模态数据与视觉图像：成像链

相机图像经渲染、采集、缓冲和输出四步生成

1 渲染 按材质和光照计算每个像素的颜色与明暗（PBR）。

↓

2 采集 Camera Actor（摄像机实体）或SceneCaptureComponent2D（二维场景捕捉组件）按位姿、视场和分辨率获取一帧画面。

↓

3 缓冲 画面写入RenderTarget2D（二维渲染目标），形成显存中的像素阵列。

↓

4 输出 保存PNG/JPEG文件，或经共享内存、UDP/TCP网络、视频推流发出，供外部程序读取为图像数组。

3.3.1 多模态数据与视觉图像：配置与观测

视场、分辨率、位姿与时刻共同限定观测

配置	直接作用	同条件下的变化
视场角	光轴两侧的覆盖范围	角度增大，远处目标像素尺度减小
分辨率	水平、垂直采样点数	视场不变时像素数增多，细节采样更密
安装位姿	相机原点和光轴方向	平移改变视点，转动改变目标投影
采样时刻	记录哪一时刻的场景	运动目标的位置随时刻变化

同一场景的图像差异，也可能来自相机配置和采样时刻。

3.3.1 多模态数据与视觉图像：针孔算例

视场角如何改变目标的像素尺度

题设：理想针孔相机；平面垂直光轴，轴向距离d为10 m。

$$W = 2d\tan\left(\frac{\theta}{2}\right); \quad n = \frac{640w}{W}$$

水平视场	640像素覆盖宽度	1 m目标宽度
90°	20.0 m	约32像素
60°	约11.55 m	约55像素

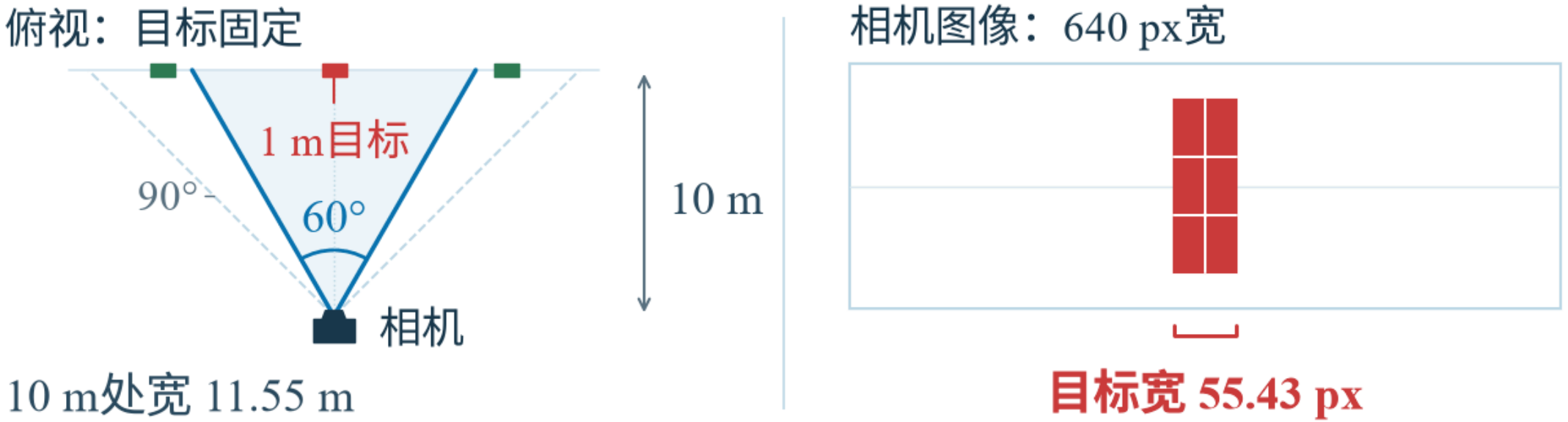
θ为水平视场角，W为覆盖宽度，w为目标宽度，n为目标像素数。

同一分辨率下，视场越宽，同距离目标占据的像素越少。

3.3.1 多模态数据与视觉图像：视场与像素

视场从90°收窄到60°，目标宽度由32增至约55像素

视场收窄：目标变大，周边参照退出画面



图：视场变化与目标像素宽度（理想针孔示意）

理想针孔模型：视场越窄，目标像素越多，但可见范围同时缩小。

3.3.1 多模态数据与视觉图像：单变量对照

分辨率与视场角的单变量对照

同一1 m目标，距离10 m	预期像素宽度	变化原因
640宽，90°视场	约32	基线
1280宽，90°视场	约64	采样点数加倍
640宽，60°视场	约55	视野变窄，投影尺度增大

题设：目标正对相机，忽略畸变；对照时固定目标、位姿和采样时刻。

用几何预期解释像素变化，能够区分视场调整和分辨率调整。

本章目录

多模态传感器：从场景渲染到可用数据

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 4 个教学单元

3.3.1 多模态数据与视觉图像

教材对应：第3.1.4.6节（导语、视觉图像）

3.3.2 深度图与分割图

教材对应：第3.1.4.6节（深度图、分割图）

3.3.3 红外热图与激光点云

教材对应：第3.1.4.6节（红外、激光点云）

3.3.4 观测有效性与时间配对

教材对应：第3.2.1.3节

3.3.2 深度图与分割图：读图

深度图编码几何，分割图编码标签



(c) 深度图



(d) 分割图

图3.5（c）深度图

灰度是深度数值的显示映射。

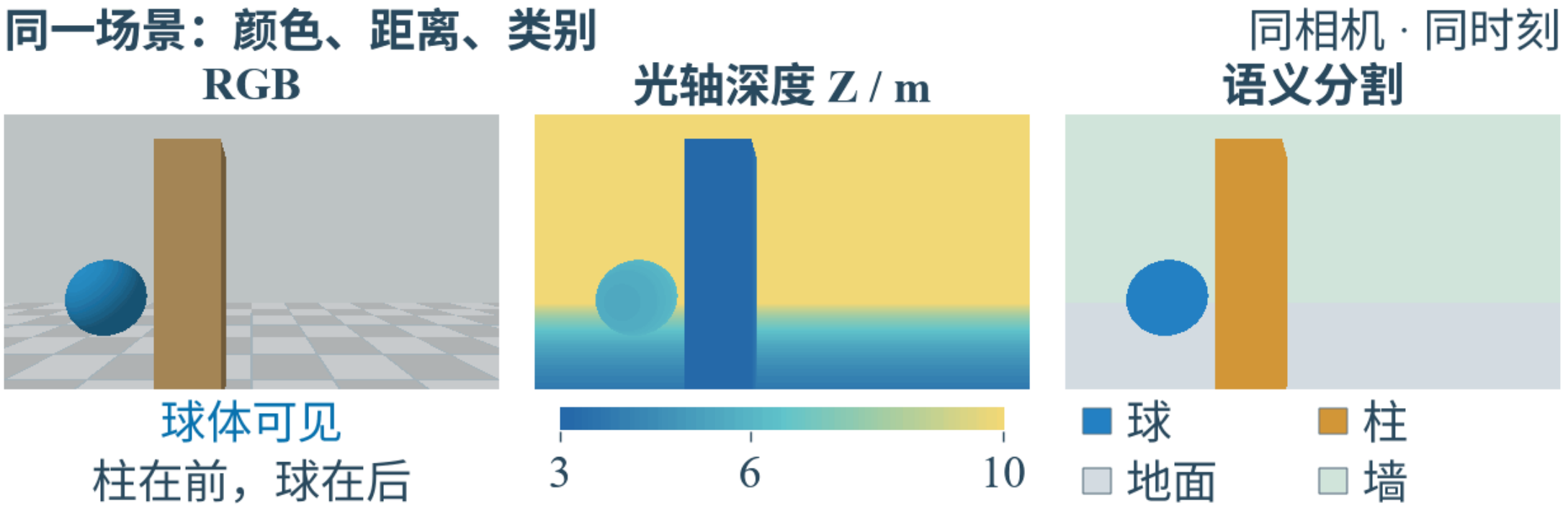
图3.5（d）分割图

颜色含义取决于场景标签配置。

深度像素用于空间计算，分割像素通过标签表关联对象。

3.3.2 深度图与分割图：同场景对照

同一个运动场景，同时产生颜色、深度与标签



图：相同相机与采样时刻下的三种观测表示

颜色描述外观，深度记录远近，标签说明对象类别。

3.3.2 深度图与分割图：深度生成

深度图逐像素存距离，显示时再压缩成灰度

- 生成：将SceneCaptureComponent2D设为SceneDepth in R，原始深度默认以厘米计；本页先换算为米。
- 显示：自定义材质把深度映射成灰度，可用线性或对数归一化；范围或方式一变，同一距离的亮度也变。
- 保存：精确计算（如点云建模）应保留浮点深度，可导出32位浮点格式（如EXR）；RflySim Type 2的编码和刻度须按所用例程配置核对。
- 算例：取 z_min = 0.3 m、z_max = 12 m，z = 6 m 时线性映射得 g ≈ 124，对数映射得 g ≈ 207；g为显示灰度，z为深度。

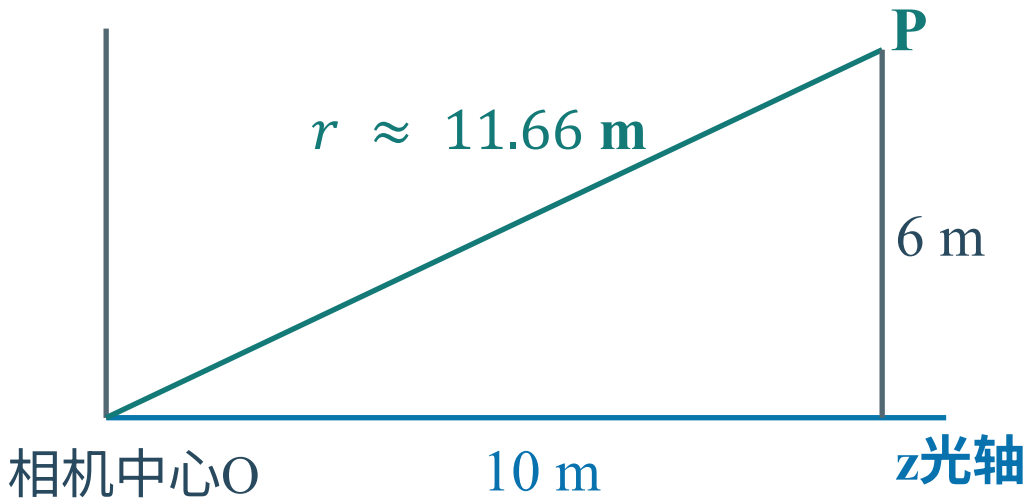
$$g_{\text{lin}} = 255\,\frac{z - z_{\min}}{z_{\max} - z_{\min}}$$

深度数组存距离，灰度只是显示，归一化方式不同亮度就不同。

3.3.2 深度图与分割图：轴向与射线

同一个空间点有轴向深度和射线距离

几何题设：相机坐标以z为光轴，$P = (6, 0, 10)$ m。



轴向深度：$z = 10$ m

只取光轴方向的投影。

射线距离：$r = \sqrt{6^2 + 10^2}$

从相机中心量到P点。

几何公式依赖距离定义；Type 2的轴向或径向口径，需与匹配的发送端确认。

轴向深度取光轴分量，射线距离取相机中心到空间点的直线长度。

3.3.2 深度图与分割图：原码换算

16位深度数组怎样换算成米

默认0.001 m/码：1200→1.2 m；65535无效。刻度按otherParams[2]核对。

```
raw = vis.Img[i]
assert raw.dtype == np.uint16
d = raw.squeeze(2) if raw.ndim == 3 else raw
assert d.ndim == 2
meters = d.astype(np.float32) * 0.001
meters[d == 65535] = np.nan
```

步长与无效码由配套协议规定；0是否有效也取决于协议。
量化步长不等于测量误差。

深度编码不仅约定距离比例，也约定哪些数值不代表有效测量。

3.3.2 深度图与分割图：分割生成

分割图由纯色材质替换或自定义模板值生成

- 纯色材质替换｜渲染时把每类物体的材质临时换成一种纯色，再用场景捕捉组件拍摄｜原理直观；要逐类替换材质

- 自定义深度与模板｜物体写入整数模板值（8位，0–255），后处理材质按值上色｜不改原材质，无需替换原材质；性能取决于实现

- RflySim：Type 4按物体的CustomDepthStencilValue（自定义深度模板值）上色，输出H×W×3、蓝绿红顺序（BGR）的彩色数组。

分割颜色来自物体被赋予的标注值，换一套配色不改变标注本身。

3.3.2 深度图与分割图：类别与实例

标签表把像素颜色连接到类别或对象

场景对象	类别标签	实例标识（示例）
车辆A	车辆	17
车辆B	车辆	23
行人C	行人	31

标注机制：Type 4按对象整数标注值（Stencil）映射颜色。

映射关系：同类别可含多个实例；保存标注值与对象的对应表。

类别表示是什么，实例表示是哪一个，颜色只是标签的显示编码。

本章目录

多模态传感器：从场景渲染到可用数据

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 4 个教学单元

3.3.1 多模态数据与视觉图像

教材对应：第3.1.4.6节（导语、视觉图像）

3.3.2 深度图与分割图

教材对应：第3.1.4.6节（深度图、分割图）

3.3.3 红外热图与激光点云

教材对应：第3.1.4.6节（红外、激光点云）

3.3.4 观测有效性与时间配对

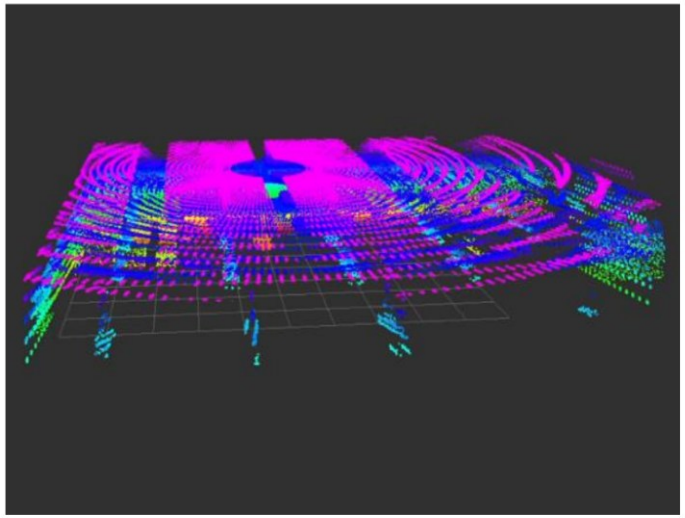
教材对应：第3.2.1.3节

3.3.3 红外热图与激光点云：读图

热图显示热差，点云记录空间采样



（e）红外图



（f）点云图

图3.5（e）红外图

明暗或伪彩色表示所设热值。

图3.5（f）点云图

有效点记录空间采样结果。

热值映射服务外观差异观察，空间点坐标服务几何分析。

3.3.3 红外热图与激光点云：热值映射

热值、颜色与温度测量的对应关系

- **简化生成：**给对象或材料设置热值，再通过查找表映射为灰度或伪彩色。
- **色表作用：**同一热值可显示为不同颜色；换色表改变显示，不改变原始热值。
- **物理测量：**辐射率改变材料发射的能量，环境反射与大气影响传播，探测器响应决定输出。
- **适用条件：**红外Type 40/41需相应付费授权；热差可用于检测对照，定量测温还依赖辐射模型与设备标定。

热值经过色表成为可见热图，温度测量还需要材料与传感器响应模型。

3.3.3 红外热图与激光点云：射线检测

激光点云由成批射线检测生成，异步读取晚一个Tick

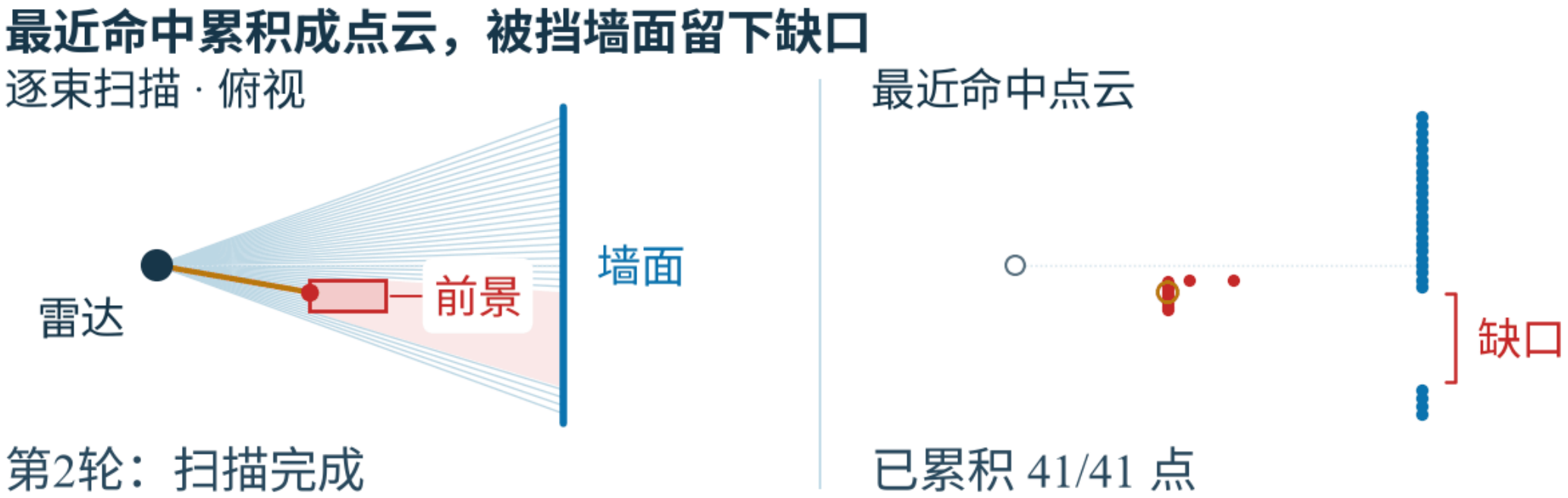
- 单次检测：虚拟激光雷达按扫描参数发射射线，LineTraceSingleByChannel返回第一个命中点的坐标、法向、材质和距离。
- 多次检测：LineTraceMultiByChannel返回首个阻挡前的重叠命中及首个阻挡；多层回波须另建模型。
- 异步检测：AsyncLineTraceByChannel异步提交射线查询，结果异步取回，主线程不被阻塞。

- RflySim做法：本帧发出射线请求，下一个Tick（引擎更新周期）读取结果，因此点云晚一个Tick；按每秒帧数（FPS）计，100 FPS时晚10 ms。
- 算例：水平每0.2°一条、扫一周共 360/0.2 = 1800 列，16线即 1800×16 = 28 800 条射线；若每秒扫10圈，就是每秒28.8万条。

射线数量决定点云密度，异步检测换来效率，也带来一个Tick的延迟。

3.3.3 红外热图与激光点云：最近命中

射线逐条记录最近表面，遮挡后方没有点



图：射线最近命中与遮挡（二维教学示意）

最近命中决定点云轮廓；前景物体遮住的墙面没有回波。

3.3.3 红外热图与激光点云：两种点云

射线扫描与深度反投影产生不同的采样分布

生成方式	采样位置如何确定	缺失与密度
Type 20/21 射线扫描	按水平、垂直角度 检测表面	角度间隔与命中结果 决定点密度
Type 7深度反投影 （付费版）	由像素、深度和内参 计算三维位置	像素分布与有效深度 决定点分布

射线遇到前景表面时，前景命中点仍有效；后方表面因被遮挡而没有被采样。

3.3.3 红外热图与激光点云：点云编码

点云编码经过解码和缩放成为坐标

层次	数据形式	处理内容
传输编码	int16；每点3或4项	读取XYZ及语义颜色码
坐标恢复	XYZ × (otherParams[0]/32767)	前三列恢复米制坐标 第4列颜色码不缩放
应用数组	N×4浮点数组 读取实际shape/dtype	三通道载荷的第4列补0 四通道载荷保留颜色码

坐标参考： Type 20使用传感器本体坐标，Type 21使用世界坐标。
颜色编码：第4列存RGB555语义颜色码，不直接等于对象ID。

整数载荷节省传输空间，坐标缩放恢复物理量，第4列按独立编码解释。

3.3.3 红外热图与激光点云：一步换算

一步换算：整数码变成米，颜色码拆成三个分量

- 题设：Type 20最大量程 R_max = 200 m（本题设定），某点x方向整数码 q = 16384，第4列颜色码 c 为0x7C00。

$$x = \frac{qR_{\max}}{32767} = \frac{16384 \times 200}{32767} \approx 100.0\ \text{m}$$

- 分辨率：整数码每加1，坐标变化 R_max/32767 ≈ 6.1 mm；量程设得越大，坐标越粗。
- 颜色码：例程用 (c>>10)&0x1F、(c>>5)&0x1F、c&0x1F 取出红、绿、蓝，再乘8恢复8位颜色；0x7C00得(31, 0, 0)，即(248, 0, 0)纯红。

量程越大，同样的整数码间隔代表越粗的空间分辨率。

本章目录

多模态传感器：从场景渲染到可用数据

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 4 个教学单元

3.3.1 多模态数据与视觉图像

教材对应：第3.1.4.6节（导语、视觉图像）

3.3.2 深度图与分割图

教材对应：第3.1.4.6节（深度图、分割图）

3.3.3 红外热图与激光点云

教材对应：第3.1.4.6节（红外、激光点云）

3.3.4 观测有效性与时间配对

教材对应：第3.2.1.3节

3.3.4 观测有效性与时间配对：显示与数据

显示变换不改变原始数据的物理含义

显示内容	真正的数据	显示与计算的区别
深度灰度	深度整数码及距离定义	归一化亮度不直接等于米数
分割色块	对象赋值及标签表	相同颜色按映射归属类别或实例
热伪彩色	热值及颜色查找表	颜色变化可能只是色表变化
点云着色	XYZ及附加通道	坐标比例不应用到类别/颜色编码

保存原始数值与映射关系，才能从显示结果回到可计算的数据。

3.3.4 观测有效性与时间配对：有效性

遮挡、无效像素与缺帧分别发生在哪一层

情形	得到什么	算法含义
前景遮挡背景	前景表面的有效深度	只观察到最近可见表面
未命中/超量程	所选协议的无效编码或缺点	先标记有效像素， 再计算几何
传输缺帧	本次图像未完整更新	不能把缓存旧帧当成新的采样

遮挡改变可见表面，无效值标记测量失败，缺帧表示本次数据没有完整到达。

3.3.4 观测有效性与时间配对：时间配对

运动目标的时间错配会转化为空间偏差

题设：汽车以5 m/s（18 km/h）匀速行驶，图像的采样时刻比配对状态早40 ms。

$$\Delta x = v\Delta t = 5 \times 0.040 = 0.20\ \mathbf{m}$$

- **偏差来源：**图像对应较早位置；用较晚状态投影，目标像素会发生偏移。

- **配对方法：**在同一时间域内，按采样戳选择或插值状态；
  接收时刻仅表示数据到达。

同一速度下，时间错配越大，图像与状态之间的空间偏差越大。

课堂练习

用四道算例检查本节的计算与判读方法

- 像素尺度：1280宽、60°视场的相机，20 m处1 m宽的目标约占多少像素？与640宽、60°、10 m的结果相比说明什么？
- 深度口径：相机正对10 m外平墙，边缘视线水平偏离光轴45°。
  预测中心与边缘的轴向深度和射线距离，再与Type 2原码及配置对照。
- 射线数量：激光雷达水平每0.1°一条、扫一周、32线，一圈有多少条射线？帧率50 FPS时异步结果晚多少？
- 时间配对：行人以1.5 m/s行走，图像比配对状态早100 ms，位置偏差多少？怎样避免？

单位换对仍可能算错，深度与像素题还要先核几何口径。

参考要点

四道算例的参考答案与判断依据

$$W = 2 \times 20 \tan 30^\circ \approx 23.09\ \text{m}, \quad n = \frac{1280}{W} \approx 55$$

- 像素尺度：距离与分辨率同倍增长，目标仍约占55像素；视场角保持60°。
- 深度口径：轴向深度对正对平墙保持约10 m；射线距离在水平45°边缘约为14.14 m。先核刻度、无效码和捕获源，再用实测判别Type 2口径。
- 射线数量：360/0.1×32 = 115 200条；异步结果晚一个Tick，50 FPS时为20 ms。
- 时间配对：Δx = 1.5×0.1 = 0.15 m；按图像采样时间戳取同一时刻的状态或插值，不用到达时刻配对。

相同像素宽度未必来自同一条件，还要核对距离与分辨率。

本节小结

四类观测的生成、读取与检验

- 生成机制：彩色图来自物理渲染和场景捕捉，深度来自场景深度，分割来自纯色材质或模板值，点云来自射线检测或深度反投影。
- 读取数据：先查类型、shape、dtype与单位；深度原码按刻度换算并识别无效码；vis.Img中的点云XYZ已为米，不再缩放。
- 检验方法：用视场与分辨率预测像素宽度，用正对墙面区分轴向深度与射线距离，用采样时间戳配对图像与状态。
- 易错点：把显示亮度当距离、把BGR当RGB、把数组下标当SeqID（课件3.4.4）、把到达时刻当采样时刻、把热图颜色当实测温度。

读传感数据先问怎样生成、怎样编码，再用几何和时间关系检验。