

一、开发环境与库依赖

本项目基于现代 C++ 标准开发，构建了一个完整的软光栅化渲染器，用于验证和对比不同的消隐算法。

- **操作系统:** Windows 10 / 11 64-bit
- **编程语言:** C++ (ISO C++17 Standard)
- **构建系统:** CMake (跨平台构建脚本)
- **图形接口:** Vulkan SDK (仅作为显示后端，用于将 CPU 计算的像素缓冲区提交到显存并显示，核心光栅化逻辑完全由 CPU 实现)
- **第三方库:**
 - **GLFW:** 负责跨平台的窗口创建、上下文管理及键盘/鼠标输入事件处理。
 - **OpenMP:** 用于并行计算加速，特别是在顶点变换 (Vertex Transformation) 和基准 Z-Buffer 的光栅化阶段。
 - **GLM (内嵌实现):** 代码中实现了一个轻量级的数学库 Vec3, Mat4，用于处理向量运算、矩阵变换及透视投影。

项目部署：

1. 编译

```
#本机存在msvc选择
cmake --preset windows-msvc-release
cmake --build --preset windows-msvc-release
#本机存在gcc、g++选择
cmake --preset windows-mingw-release
cmake --build --preset windows-mingw-release
#linux暂时没有进行测试和preset的设置，得自行修改一下，抱歉。
```

2. 测试

```
#漫游式
#Usage: ./VulkanApp.exe model.obj [mode] [scenario] [yes/no]
#mode 1zbuffer 2 scanline zbuffer 3 hzb without bvh 4 full hzb
#scenario 0是默认场景 其他scenario更多是没有大型obj所强行通过排列补充遮挡情况，容易卡
#yes no是否是benchmark环境 no为漫游 默认为no yes为benchmark环境 不可漫游 默认跑1200
帧
#左上显示帧数 红点表示mode 几个红点表示mode几
#msvc
.\build\windows-msvc-release\VulkanApp.exe .\assets\cubes.obj 1 0 no
.\build\windows-msvc-release\VulkanApp.exe .\assets\house_t.obj 4 0 yes

#gcc
.\build\windows-mingw-release\VulkanApp.exe .\assets\cubes.obj 1 0 no
```

```
.\build\windows-mingw-release\VulkanApp.exe .\assets\house_t.obj 4 0 yes  
#获得benchmark_report文件内容如下操作  
#需要python环境存在matplotlib 用来绘制图像  
#控制台会输出每一段的耗时计算 默认测试 scenario0  
python benchmark.py  
#下面容易炸 不同scenario, 这里我的排列设计的不是很好 效果一般  
#python benchmark.py --extreme
```

用户操作

程序运行后提供实时的 3D 渲染窗口，支持多种交互模式以便于观察算法效果。

1. 渲染模式切换

用户可通过键盘数字键实时切换渲染算法，控制台会输出当前的帧率和算法阶段耗时：

- **1 Standard Z-Buffer:** 标准 Z 缓冲算法（基准）。利用 OpenMP 并行加速，暴力遍历三角形包围盒。
- **2 Scanline Z-Buffer:** 扫描线 Z 缓冲算法。利用几何连续性逐行扫描，避免了包围盒法的空像素计算。
- **3 HZB Simple (Linear):** 简单层次 Z 缓冲。无空间结构，线性遍历三角形，逐个查询 HZB 进行剔除。
- **4 HZB Complete (BVH):** 完整层次 Z 缓冲。结合层次包围盒 (BVH)，实现了基于节点的整体剔除 (Node Culling)。

2. 漫游控制

实现了第一人称自由摄像机：

- **移动:** W / S (前后), A / D (左右), E / Q (升降)。按住 Shift 加速。
- **视角:** 按住鼠标左键拖拽旋转模型/视角，鼠标滚轮缩放视角。
- **动画:** Space 键暂停/恢复模型的自动旋转。

二、算法实现与模式设计

本项目实现了四种渲染模式，旨在对比传统 Z-Buffer、扫描线算法与层次 Z-Buffer (HZB) 在不同场景下的表现。

1. 渲染模式定义

模式 ID	名称	对应作业要求	算法描述
Mode 1	Standard Z-Buffer	基准对照	传统的 Z-Buffer 算法。利用 OpenMP 并行计算三角形包围盒，暴力光栅化。代表了利用现代多核 CPU 算力的暴力解法。
Mode 2	Scanline Z-Buffer	扫描线算法	改进的光栅化算法。利用几何连续性逐行扫描，避免了空像素计算。在 CPU 单线程逻辑下效率较高，但在并行化方面不如 Mode 1 容易扩展。
Mode 3	HZB Simple	简单模式	无空间结构的 HZB。线性遍历所有三角形，逐个查询 HZB 进行剔除。流程：Depth Pre-Pass -> Build HZB -> Color Pass (Linear Cull)。
Mode 4	HZB Complete	完整模式	HZB + 层次包围盒 (BVH)。结合了空间划分。在渲染前，先查询 BVH 节点是否被 HZB 遮挡。流程：Depth Pre-Pass (BVH) -> Build HZB -> Color Pass (Node Cull)。

2. 核心数据结构

1. 层次包围盒 (BVH):

- 采用递归构建，根据三角形重心在最长轴上进行划分。
- 空间排序 (Spatial Sorting)**: 在渲染遍历时，始终优先访问距离摄像机最近的子节点 (Front-to-Back)，这是 HZB 算法能有效剔除的关键。

2. 层次 Z-Buffer (HZB Pyramid):

- 采用 **Max-Pooling** 构建。第 L 层像素值等于上一层对应 2×2 区域的最大深度值。
- 允许算法以 $O(1)$ 时间复杂度查询屏幕任意矩形区域的**最保守遮挡深度**。

三、实验数据与图表分析

我们在五个不同规模的 OBJ 模型上进行了测试，覆盖了从极低多边形 (Cubes) 到高面数复杂场景 (City)。以下数据基于 **Scenario 0 (Base Scenario, 无大量遮挡/实例化)**。

1. 总体性能数据 (Scenario 0)

模型	面片数 (Faces)	Mode 1 (Z-Buf)	Mode 2 (Scanline)	Mode 3 (HZB Simple)	Mode 4 (HZB Complete)
Cubes	80	14.12 ms	3.21 ms	16.86 ms	16.73 ms
Teapot	9,216	5.49 ms	2.53 ms	15.63 ms	15.36 ms
Hut	85,644	51.73 ms	13.48 ms	30.73 ms	30.31 ms
House	110,600	30.37 ms	15.05 ms	31.82 ms	30.87 ms

模型	面片数 (Faces)	Mode 1 (Z-Buf)	Mode 2 (Scanline)	Mode 3 (HZB Simple)	Mode 4 (HZB Complete)
City	527,016	24.54 ms	28.24 ms	33.06 ms	33.11 ms

2. 阶段耗时分析 (为何 HZB 变慢?)

观察数据可以发现，在简单场景 (Scenario 0) 下，HZB 模式 (Mode 3/4) 普遍慢于基准算法。为了深入分析原因，我们拆解了 City.obj (527K 面片) 的耗时结构：

- **Mode 4 (HZB Complete) 耗时拆解：**
 - **Pre-Pass:** 11.04 ms (33%)
 - **HZB Build:** 11.63 ms (35%)
 - **Raster:** 9.17 ms (28%)
 - **Other:** ~1.3 ms (4%)
 - **Total:** 33.11 ms
- **对比 Mode 1 (Z-Buffer):**
 - **Raster:** 23.35 ms (95%)
 - **Total:** 24.54 ms

分析：

1. **固定开销 (Overhead):** HZB 算法必须先进行深度预处理 (Pre-Pass) 和金字塔构建 (Build HZB)。在 City 场景中，仅这两项就消耗了 **22.67 ms**，几乎等于 Mode 1 渲染完整一帧的时间。
2. **光栅化收益 (Raster Gain):** HZB 确实减少了光栅化时间 (从 23.35ms 降至 9.17ms，减少了 **60%**)。这证明 HZB 的剔除机制是有效的。
3. **结论:** 在无严重遮挡的场景下，HZB 节省的光栅化时间不足以抵消其构建成本。这是一个经典的“剔除开销 vs. 渲染开销”的权衡问题。

四、算法分析与空间排序的意义

1. 简单模式 (Mode 3) vs. 完整模式 (Mode 4)

虽然在 Scenario 0 的总耗时上两者差异不大，但在算法行为上有本质区别：

- **Mode 3 (Linear):** 必须遍历所有 527,016 个三角形，逐个进行 HZB 查询。Pre-Pass 耗时 7.33ms。
- **Mode 4 (BVH):** 利用 BVH 树。Pre-Pass 耗时 11.04ms (因为递归遍历 BVH 比线性循环更慢，且涉及大量节点包围盒计算)。
- **Cull Time:** Mode 4 记录了 2.20 ms 的 Cull 时间，这意味着它花了时间在树结构上做决策。

为什么 Mode 4 没有显著快于 Mode 3?

在 Scenario 0 (普通视角, 无大量遮挡) 中, 大部分物体都是可见的。BVH 无法剔除大块节点 (因为节点都在屏幕内且没被遮挡), 反而引入了树遍历的开销。Mode 4 的优势通常体现在 "High Depth Complexity" (高深度复杂度) 场景, 例如站在一堵墙后面看整个城市, 此时 Mode 4 能瞬间剔除 90% 的几何体, 而 Mode 3 仍需逐个检查。

2. 物体空间排序 (Spatial Sorting) 的意义

在代码中, 我们在遍历 BVH 时实现了 **Front-to-Back (由近及远)** 的排序逻辑:

C++

```
// 优先处理距离相机近的子节点
if (dLeft < dRight) { push(right); push(left); }
else { push(left); push(right); }
```

实验意义:

HZB 是一种保守剔除 算法。它依赖于 Z-Buffer 中已经存在的深度值来遮挡后续物体。

- **如果乱序渲染**: 算法可能先处理了远处的建筑 A。此时 Z-Buffer 是空的, A 被画了出来。接着处理近处的建筑 B。虽然 B 挡住了 A, 但 A 已经画了, 计算量已经浪费了。
- **空间排序后**: 算法先处理近处的建筑 B, 填入较浅的深度值。当处理远处的建筑 A 时, 查询 HZB 发现 A 的深度大于 B, 直接剔除 A。

数据佐证:

在 City 模型中, 尽管总时间变长, 但 Mode 4 的 Raster 时间 (9.17ms) 远低于 Mode 1 (23.35ms) 和 Mode 2 (26.91ms)。这证明通过空间排序, 我们成功利用近处的物体遮挡了远处的物体, 避免了大量的像素着色计算 (Overdraw)。

3. 扫描线算法 (Mode 2) 的表现

- **优势**: 在 Cubes, Teapot, Hut, House 等中小规模模型上, **Scanline 算法是最快的** (比 Z-Buffer 快 2-5 倍)。这是因为扫描线算法只处理三角形覆盖的有效像素, 完全避免了包围盒算法中对空像素的无效遍历与测试。
- **劣势**: 在 city (527K 面片) 这种超大规模场景下, Scanline 的串行逻辑 (难以像 Mode 1 那样简单地 OpenMP 并行化) 成为了瓶颈, 被暴力的并行 Z-Buffer 反超。

五、结论

1. 算法效率:

- **低负载/中负载**: 扫描线 Z-Buffer (Mode 2) 效率最高, 它是 CPU 软光栅化的理想选择。

- **高负载 (海量面片)**: 简单的并行 Z-Buffer (Mode 1) 凭借多核优势胜出。

2. HZB 的适用性:

- HZB 算法引入了显著的固定开销 (Pre-Pass + Build)。在简单场景 (Scenario 0) 下, 这种开销会导致性能下降 (加速比 < 1.0)。
- 然而, HZB 成功减少了 **60% 以上的光栅化时间**。这表明在 **像素着色开销极大** (如复杂 Shader) 或 **遮挡极高** (如室内漫游、城市建筑群) 的场景下, HZB 将从“负优化”转变为“性能救星”。

3. 空间排序:

- 是 HZB 算法生效的基石。没有由近及远的排序, HZB 只能作为 Z-Buffer 的一种昂贵替代品, 而无法发挥其“提早剔除”的核心优势。

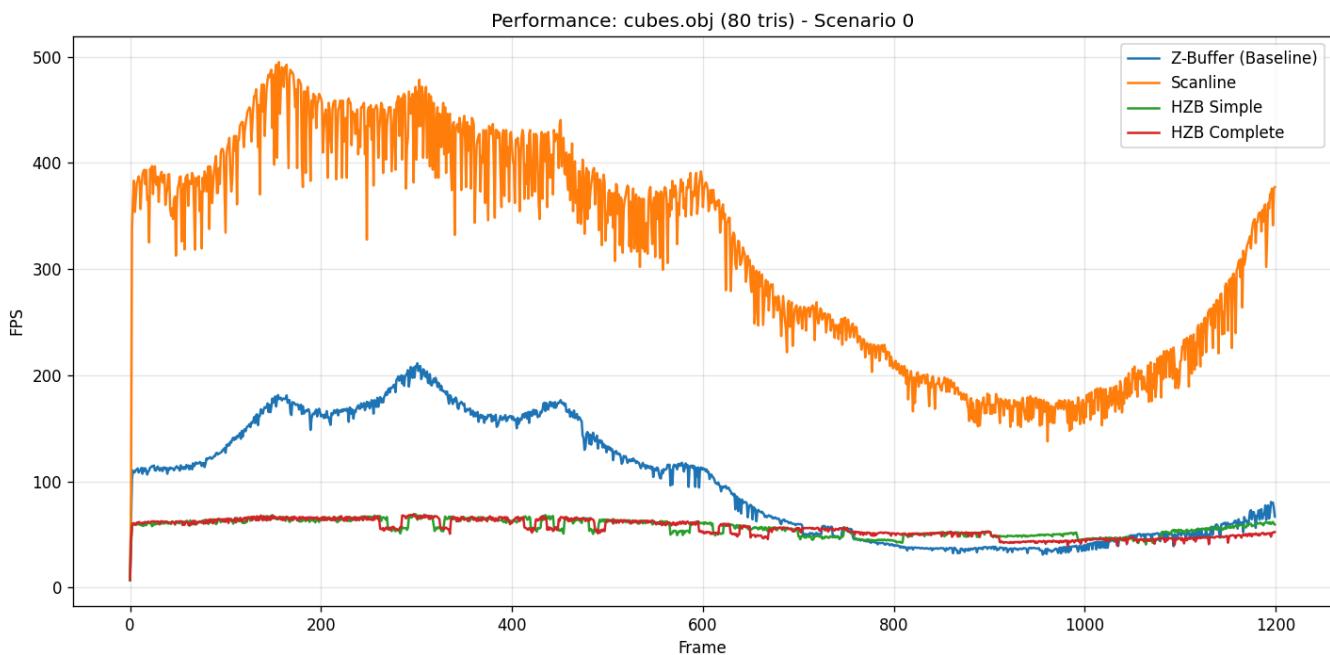
其中我其实考虑过一些并行优化光栅化操作, 但是比较容易出现数据竞争, 并且最终效果并不稳定, 后续再CG2 光线追踪的时候再回过头来考虑优化。

这里的最终结论有点可惜, 因为我没有找到更好的比如1000k面片情况下是否会出现更显著的反超情况, 后续会补充实验内容, 和完善代码。

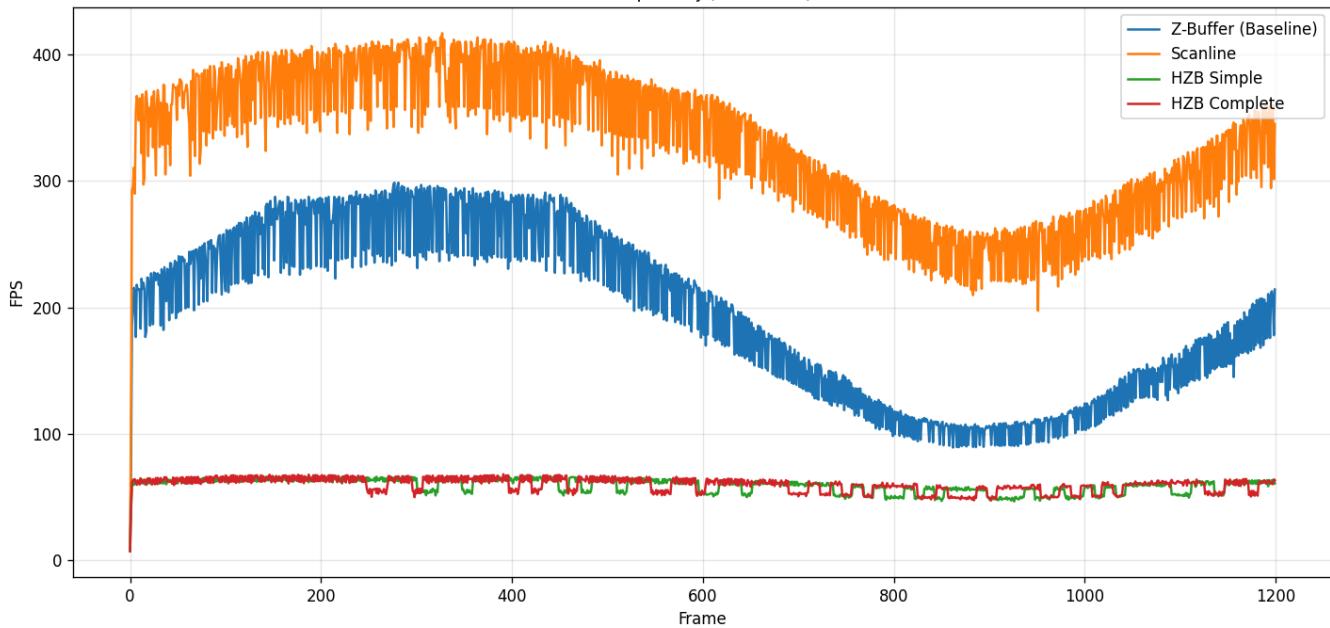
benchmark 测试:

实验环境:Win11\Intel(R)Core(TM)Ultra 7 265KF

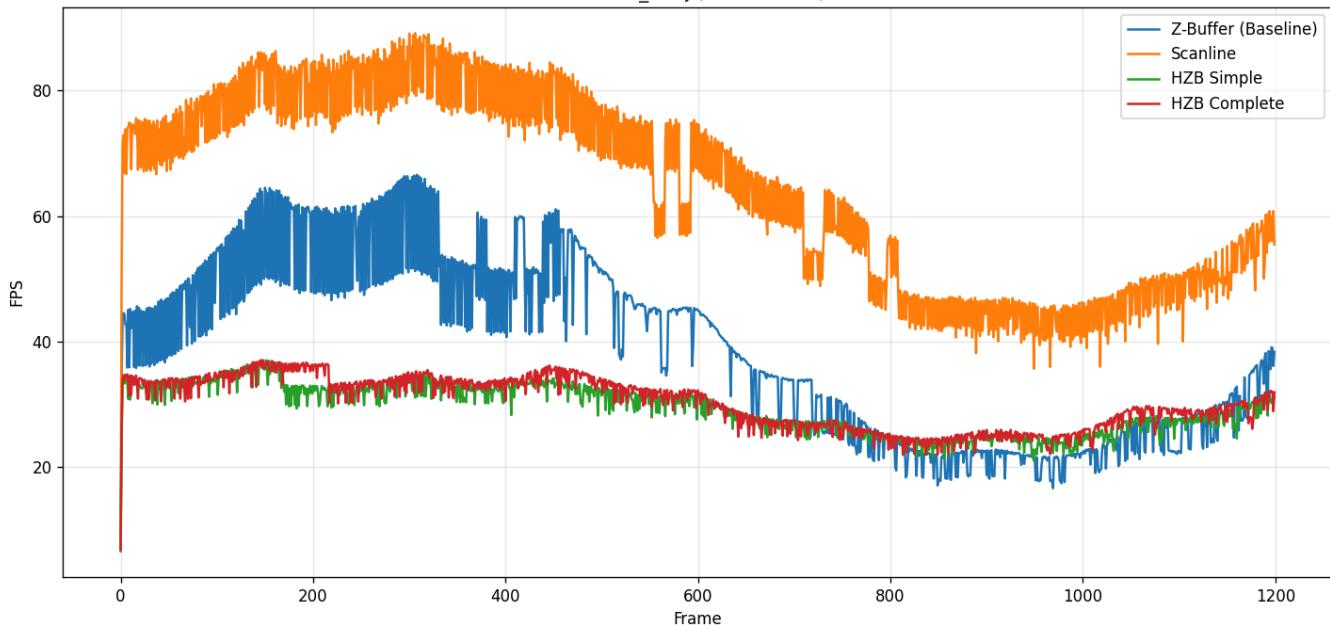
以下为 scenario 0 即默认排列的情况



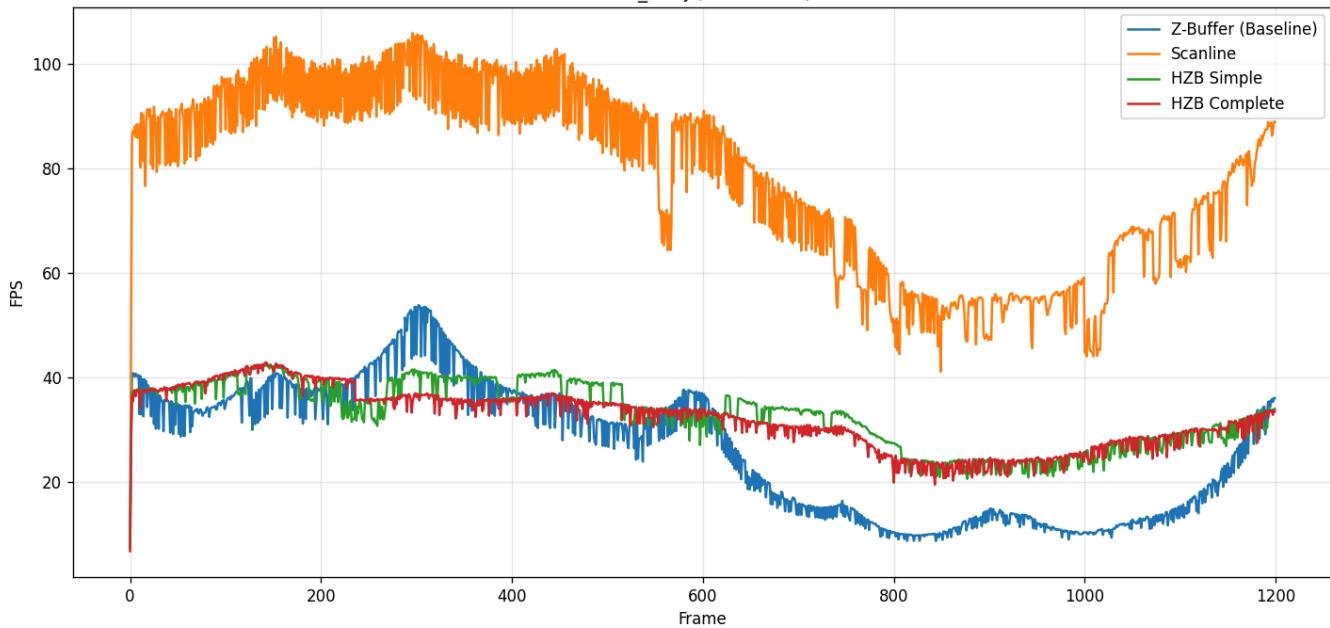
Performance: teapot.obj (9,216 tris) - Scenario 0



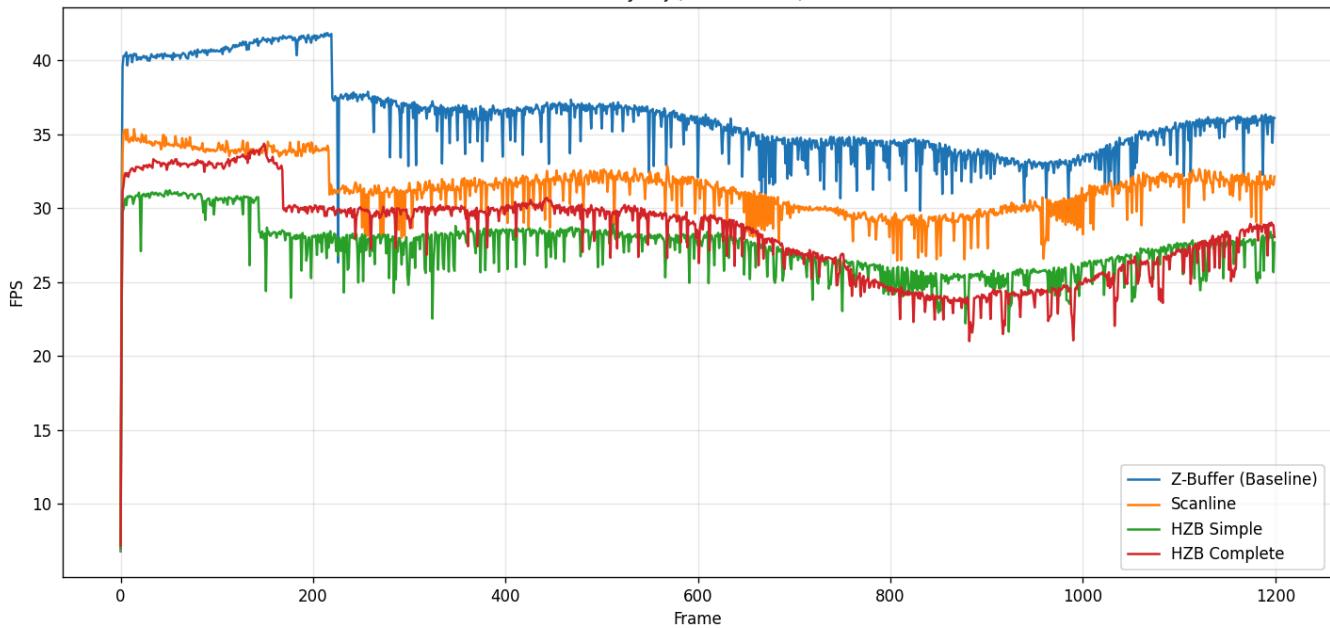
Performance: house_t.obj (110,600 tris) - Scenario 0



Performance: hut_t.obj (85,644 tris) - Scenario 0



Performance: city.obj (527,016 tris) - Scenario 0



scenario 3 mode 1 house_t.obj 仅作展示情况



```
(cv) C:\Users\lcknight\Desktop\CG\CGAssignment>python benchmark.py
Target Executable: C:\Users\lcknight\Desktop\CG\CGAssignment\build\windows-
msvc-release\VulkanApp.exe
Scanning models in 'assets'...
```

Found 5 models:

- cubes.obj	Faces: 80
- teapot.obj	Faces: 9,216
- hut_t.obj	Faces: 85,644
- house_t.obj	Faces: 110,600
- city.obj	Faces: 527,016

```
[===== Testing Model: cubes.obj (80 faces)
=====]
```

--- Stage Breakdown (Scenario 0) ---

Mode	Clear	Vertex	PrePass	HZB	Cull	
Raster	Total (ms)	FPS				

Z-Buffer (Baseline)	0.86	0.01	0.00	0.00	0.00	13.24
14.12	100.7					
Scanline	0.75	0.00	0.00	0.00	0.00	2.46
3.21	316.5					
HZB Simple	0.79	0.01	1.45	12.48	0.00	2.12

16.86	56.7
HZB Complete	0.80
16.73	56.0

Saved FPS chart: benchmark_report\cubes.obj_fps.png

[===== Testing Model: teapot.obj (9,216 faces)
=====]

--- Stage Breakdown (Scenario 0) ---

Mode	Clear	Vertex	PrePass	HZB	Cull	
Raster	Total (ms)	FPS				
<hr/>						
Z-Buffer (Baseline)	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	4.72
5.49	195.0					
Scanline	0.77	0.00	0.00	0.00	0.00	1.76
2.53	330.1					
HZB Simple	0.92	0.00	1.31	12.08	0.00	1.31
15.63	59.3					
HZB Complete	0.94	0.00	1.41	11.76	0.09	1.25
15.36	59.9					

Saved FPS chart: benchmark_report\teapot.obj_fps.png

[===== Testing Model: hut_t.obj (85,644 faces)
=====]

--- Stage Breakdown (Scenario 0) ---

Mode	Clear	Vertex	PrePass	HZB	Cull	
Raster	Total (ms)	FPS				
<hr/>						
Z-Buffer (Baseline)	0.94	0.03	0.00	0.00	0.00	50.76
51.73	26.4					
Scanline	0.94	0.02	0.00	0.00	0.00	12.52
13.48	78.7					
HZB Simple	0.98	0.02	8.42	11.84	0.00	9.48
30.73	32.9					
HZB Complete	0.91	0.02	8.39	11.81	0.02	9.18
30.31	32.1					

Saved FPS chart: benchmark_report\hut_t.obj_fps.png

[===== Testing Model: house_t.obj (110,600 faces)
=====]

--- Stage Breakdown (Scenario 0) ---

Mode	Clear	Vertex	PrePass	HZB	Cull	

Raster	Total (ms)	FPS
<hr/>		
Z-Buffer (Baseline)	0.98	0.03
30.37	38.9	
Scanline	0.85	0.02
15.05	64.4	
HZB Simple	0.94	0.02
31.82	29.4	
HZB Complete	0.92	0.02
30.87	30.2	

Saved FPS chart: benchmark_report\house_t.obj_fps.png

[===== Testing Model: city.obj (527,016 faces)
=====]

--- Stage Breakdown (Scenario 0) ---

Mode	Clear	Vertex	PrePass	HZB	Cull	
Raster	Total (ms)	FPS				
<hr/>						

Z-Buffer (Baseline)	1.04	0.15	0.00	0.00	0.00	23.35
24.54	36.1					
Scanline	1.17	0.15	0.00	0.00	0.00	26.91
28.24	31.4					
HZB Simple	1.11	0.18	7.33	11.63	0.00	12.82
33.06	27.3					
HZB Complete	1.11	0.16	11.04	11.63	2.20	9.17
33.11	28.2					

Saved FPS chart: benchmark_report\city.obj_fps.png

Benchmark Suite Completed.