硬件光追引擎文档

队伍名称：提瓦特观光队

成员：余斐然、朱鹏辉、刘剑澎

学校：华南理工大学

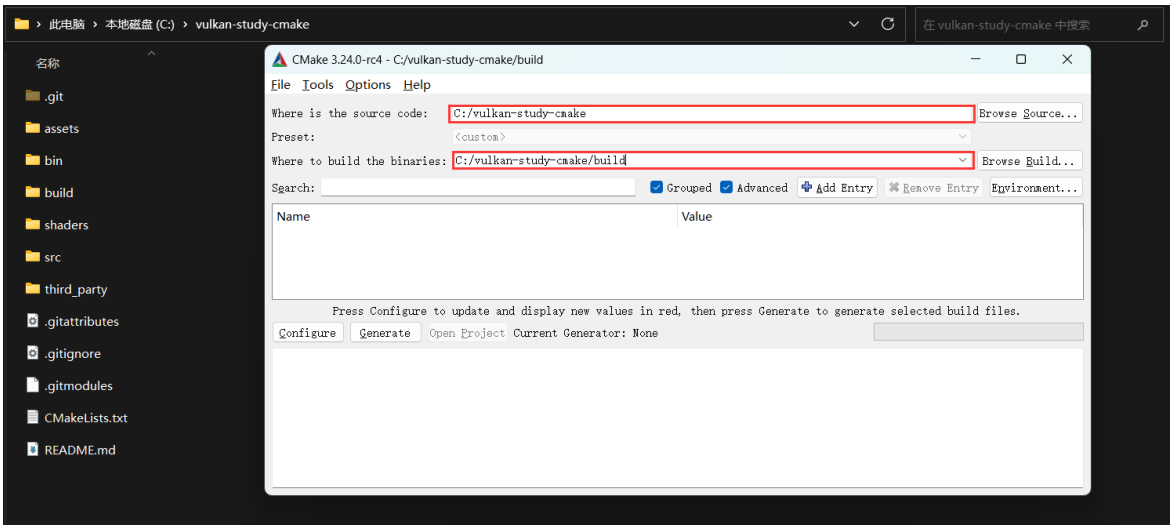
概述

本队伍提交作品为自制渲染器，采用纯光追方案，依赖库为 glm、Dear ImGui、volk、stb、tinygltf、Vulkan、glfw3。

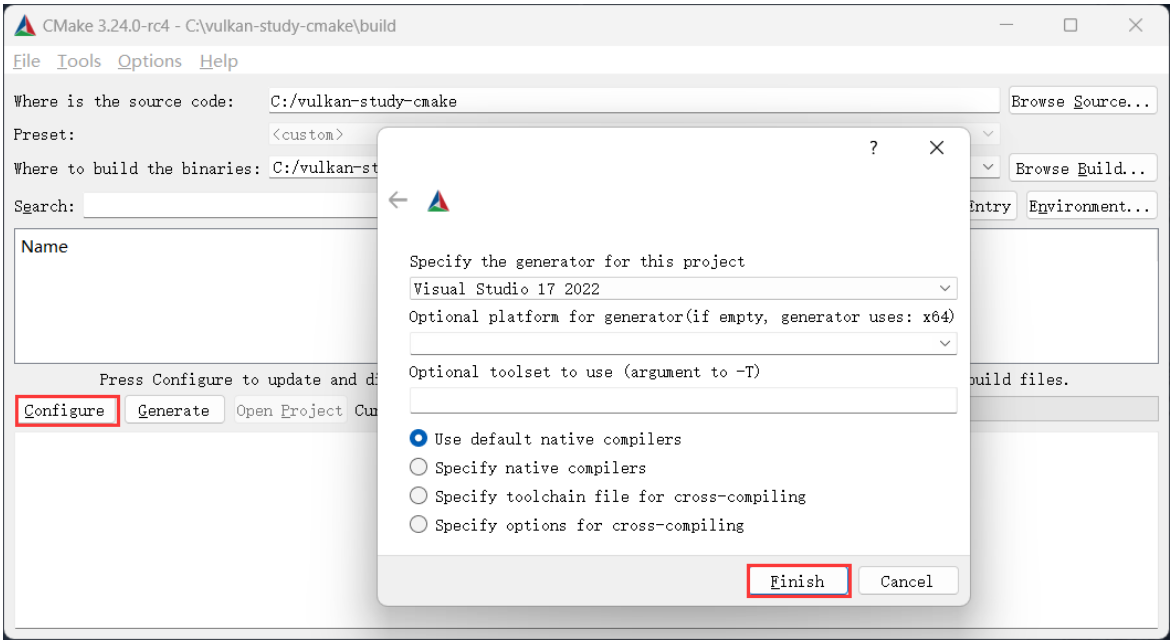
编译

1. 安装 Vulkan SDK
2. 使用 CMake 生成项目

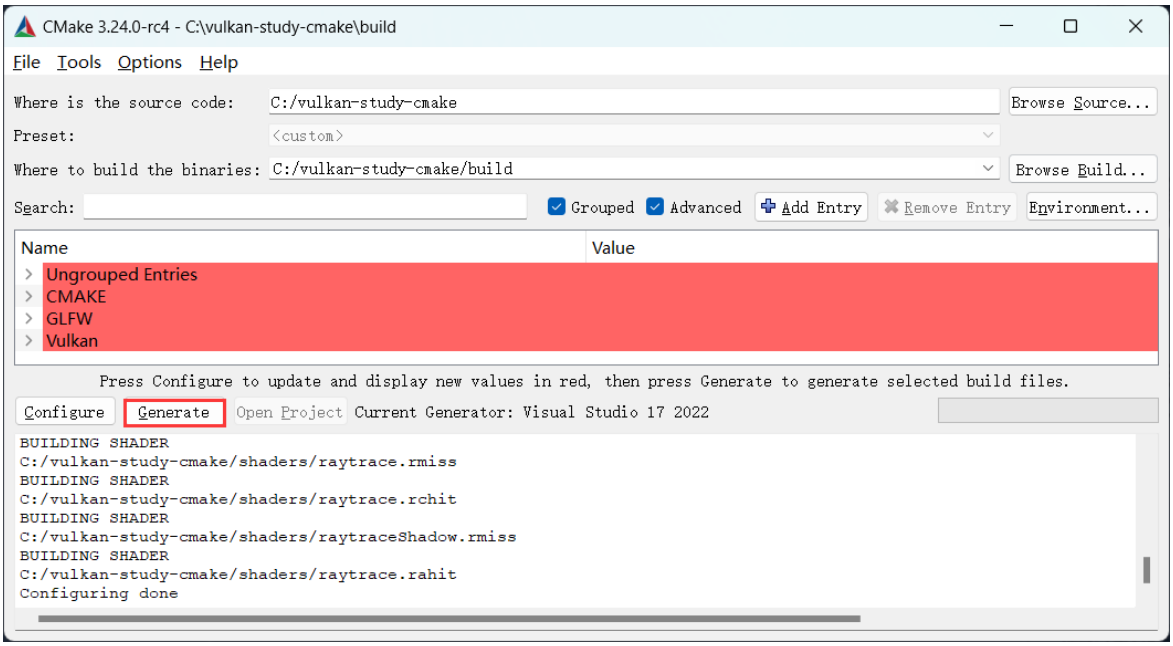
   (1) 首先解压项目压缩包，在根目录下创建 build 文件夹，打开 cmake 并填写源码路径和 build 路径。



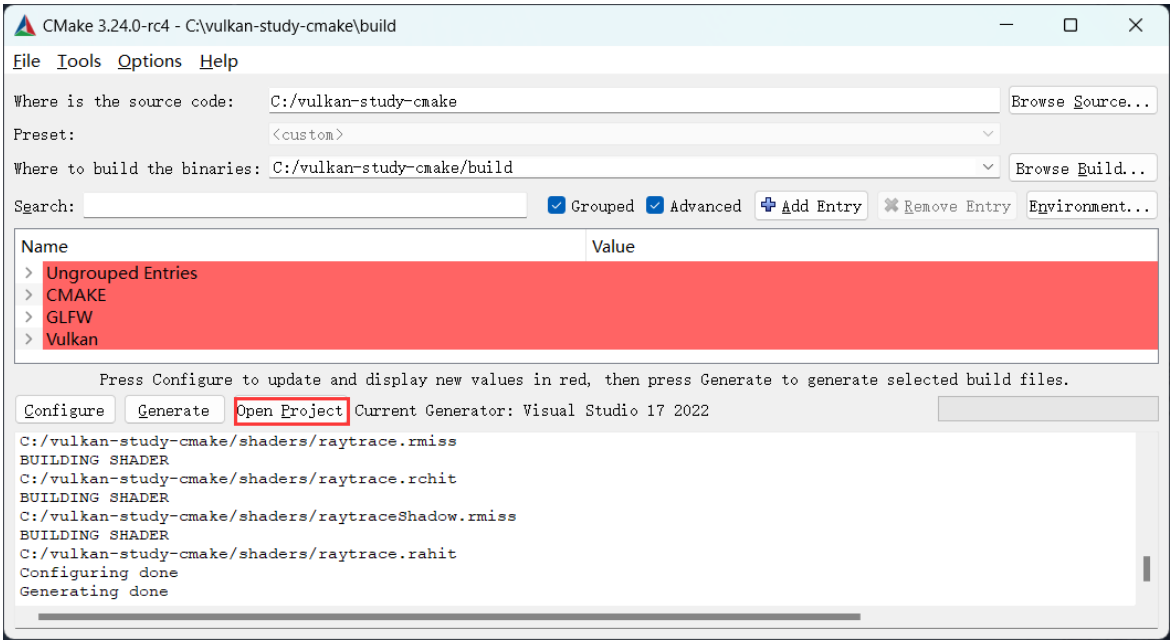
（2）点击 Configure，选择生成工程的 visual studio 版本，点击 Finish。



（3） 点击 Generate，生成对应的工程文件

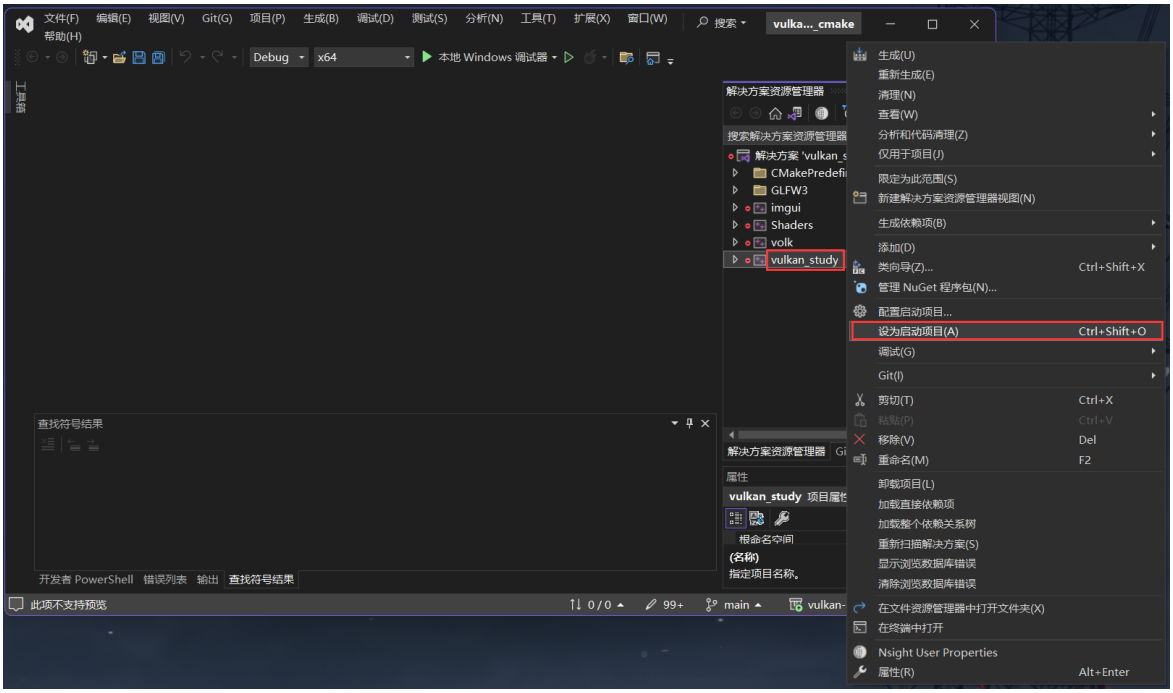


（4） 点击 Open Project，打开生成的工程文件

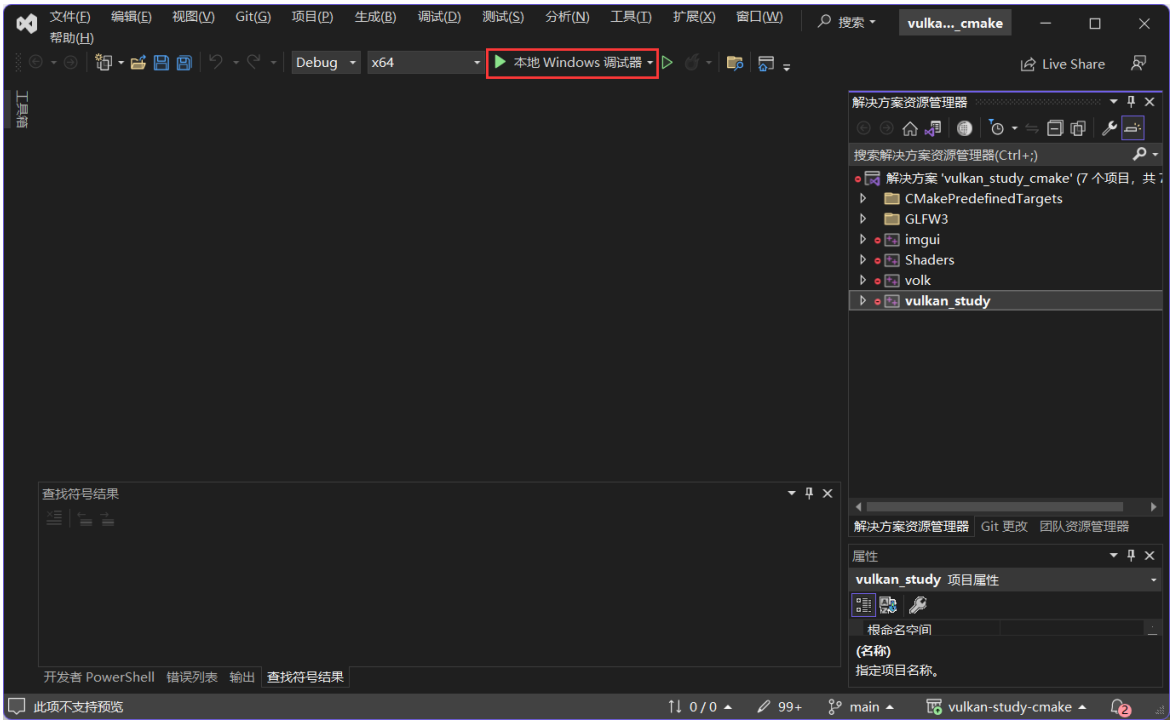


3. 在 Visual Studio 中编译运行（需按照 “**配置**” 章节放置资源文件）

（1）在放置完资源文件后，将"vulkan_study"设置为启动项目



(2) 点击调试按钮，即可启动渲染器



配置

需要将比赛场景资源放置在 ./assets/ 中，即路径应为：

assets +

- Caustics
- Deferred
- GI
- PBR

- Shadow

软件操作

画面分为红框中的 UI 区域，以及其余的非 UI 区域。

1. 镜头操作

   使用键盘可以进行如下操作：

   - **WASD** 控制水平移动；
   - 按下 **左 CTRL 键** 下降，**空格键** 上升

   此外，提供两种鼠标操作模式：拖拽模式、捕获模式

   a. 拖拽模式

   在非 UI 区域下，使用鼠标按键以及鼠标移动可以进行如下操作：

   - 按住 **鼠标左键**，可以旋转镜头；
   - 按住 **鼠标中键**，可以平移镜头；
   - 按住 **鼠标右键**，可以前进或后退镜头；
   - 滚动 **鼠标滚轮**，可以前进或后退镜头。

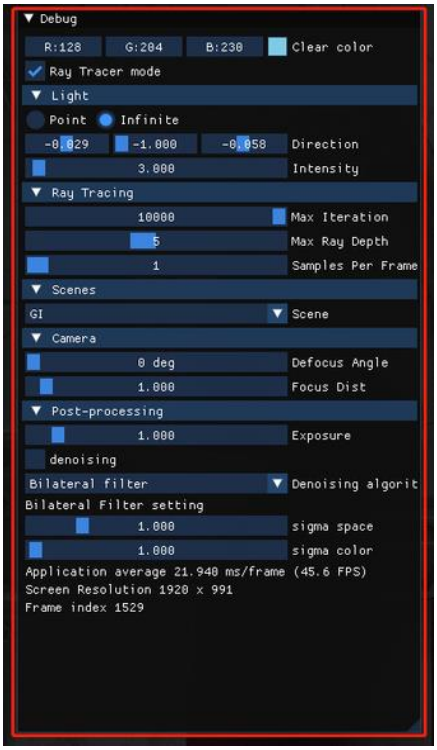
   此外，可以从窗口外**拖拽 glTF 文件**到窗口内，来打开 glTF 文件。

   b. 捕获模式

   在非 UI 区域中按下 **左 ALT 键**，就可以控制摄像头旋转与移动：

   - 鼠标控制视角旋转；
   - 再次按下 **左 ALT 键** 结束控制。

2. UI 区域



其中：

1) Light 部分：改变光源参数，可选点光源和环境光源，改变位置、方向和光强；
2) Ray Tracing 部分：光线追踪参数，可选最大累计帧数，光线迭代深度，以及每帧中每个像素的采样次数；
3) Scenes 部分：可以切换场景；
4) Camera 部分：调整散焦角度和对焦距离，影响景深效果；
5) Post-processing 部分：调整各种后处理的效果，包括：曝光控制、降噪开关、降噪算法选择，以及降噪算法的可调参数。

渲染器特性

1. 纯光追实现

本渲染器采用纯光追方案，基于路径追踪算法，配合光栅化实现部分后处理效果，使用的渲染后端为 Vulkan。为了保证实时性能，采用了各种优化的技术与方案，其中比较重要的是：迭代方案、重要性采样以及分部积分。

路径追踪要求发射并追踪一条光线，并沿着光线路径累积能量，这一过程可以用递归轻松地定义。但是在 GPU 上递归开销很大，而且递归的深度也很有限。因此需要将递归改进为迭代的形式。迭代中需要记录的值有：累积的能量、累积的吸收权重、上一个光线的位置和方向。做了这样的改进后，性能最多能有 3 倍以上的提升。

重要性采样也是降低噪声的重要方法，包括光源重要性采样和 BRDF 采样。一个函数在积

分时，函数值高的部分肯定对积分有着更多的贡献，重要性采样就是在接近函数值分布的概率密度函数中采样，以此来加快蒙特卡洛积分收敛的速度。我们的光源只有平行光源和点光源，因此概率密度函数都是 1；而 BRDF 采用的是理想漫反射和 GGX 法向分布函数。

如果按照路径追踪的公式直接进行积分，会出现很多路径无法达到光源而浪费的情况。通过将积分分为直接光照和间接光照两部分，在每次击中物体时，都计算直接光照。这样大大加快了积分的收敛速度。

除了上述这些优化以外，我们也采取了诸如时间累积，光线抖动等等其它方法来优化最终效果。

2. PBR 材质

我们的渲染器采用了 PBR 材质。参考了 glTF 标准以及 UE4 引擎的渲染模型，我们采用了理想漫反射以及 Cook-Torrance 微表面模型。此外也实现了 glTF 扩展中的 Clearcoat 和 Transmission。Clearcoat 是附着在物体表面的一层薄涂层，一般用于实现车漆以及路面积水的效果。Transmission 不同于 alpha 透明度，它描述的是物体发生透射的概率，需要考虑折射和物体内的吸收，用于实现水、玻璃等透明介质。

3. HDR

在路径追踪的过程中，计算都是基于能量的角度进行的，因此可能会累积到很大的数值，超出 LDR 所能处理的范围，因此需要使用 HDR。我们使用了每个颜色通道都是 32 位宽的 RGBA 缓冲来存储路径追踪的结果，读取贴图以及帧缓冲时都采用 UNORM 格式，并在后处理中加入了 HDR 到 LDR 的转换，并能使用曝光参数进行控制。这样能够正确地显示路径追踪的结果，并保持了图像的细节。

4. 景深

实际的相机受限于镜头以及光圈，在对焦平面之外会出现虚化的现象，这一画面效果能够很大地提升画面的真实性。我们通过在虚拟的镜片上随机采样并发射光线，在路径追踪中实现了仿真的景深效果，并能调整参数分别控制虚化的程度以及对焦的距离。

5. 多种经典降噪算法

路径追踪在样本较少的情况下，结果会有大量的噪点，我们在后处理中实现了三个经典的滤波降噪算法：均值滤波、中值滤波以及双边滤波。双边滤波能够在保留边缘的同时移除噪声，是其中效果最好的算法。

运行结果展示

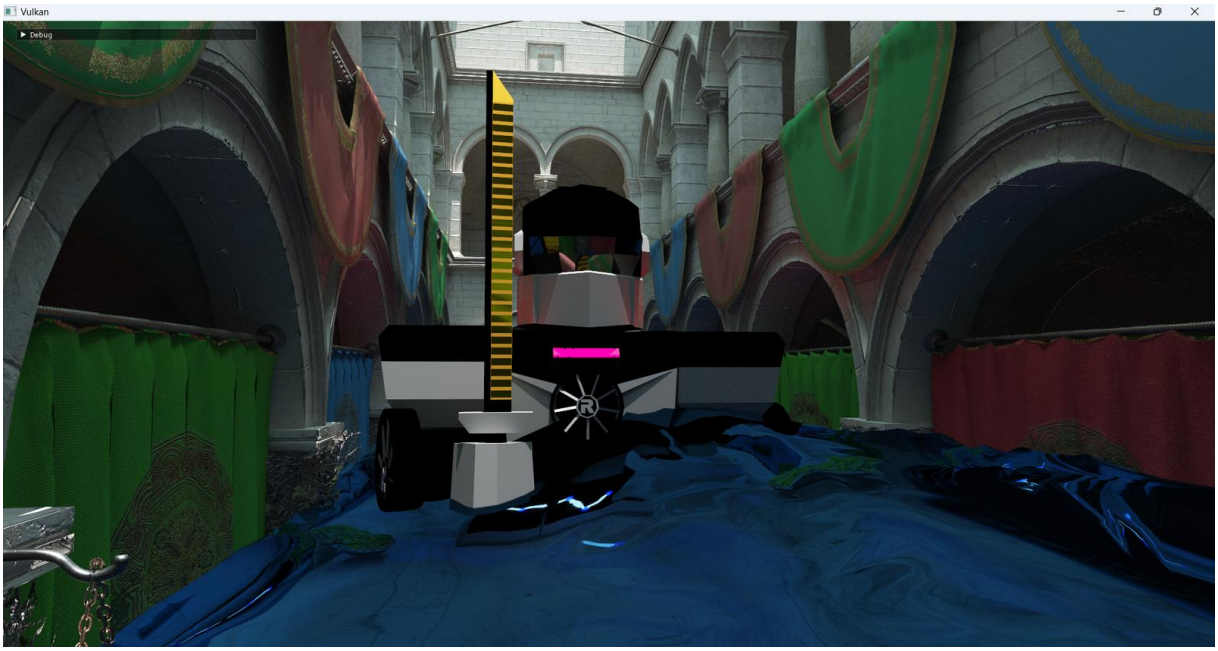
设备信息：

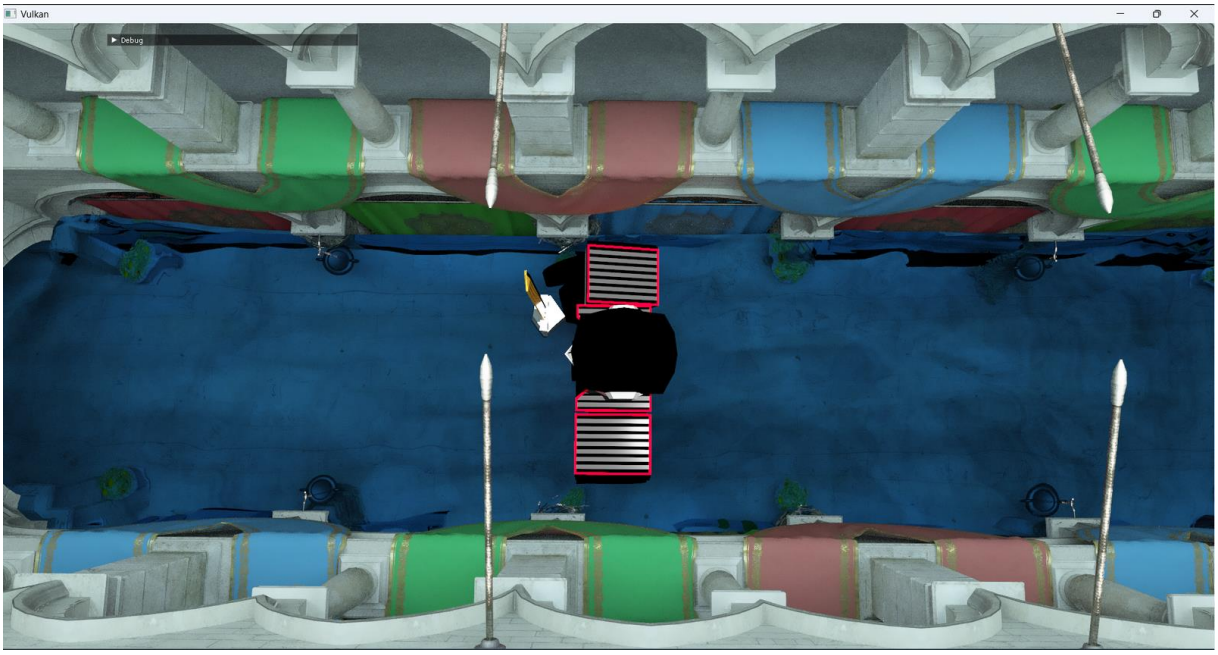
CPU : AMD Ryzen 5 5600X

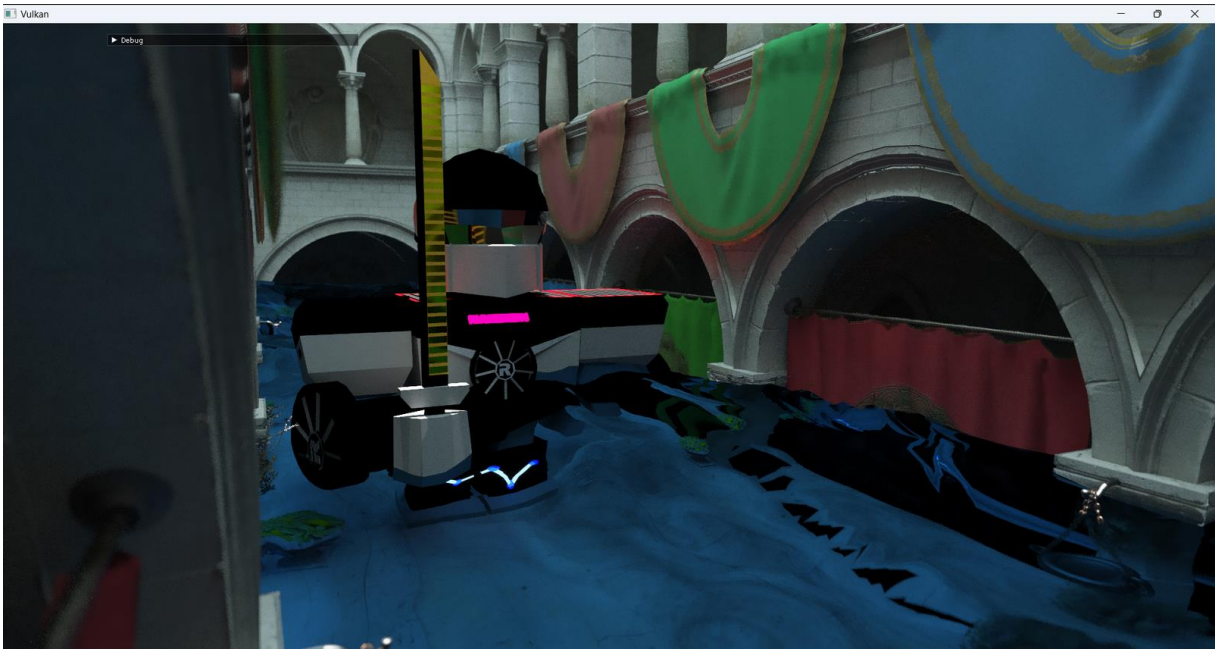
RAM : 32GB DDR4 3200MHz

GPU : AMD Radeon RX 7900 GRE (16GB)

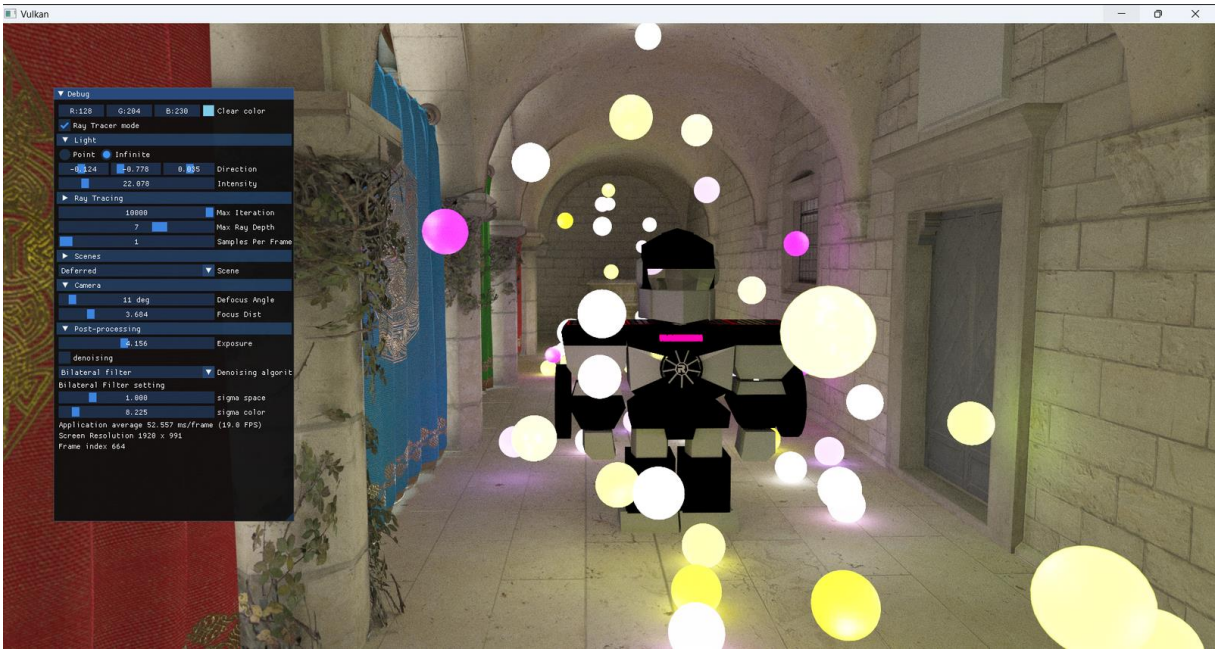
a. Caustics





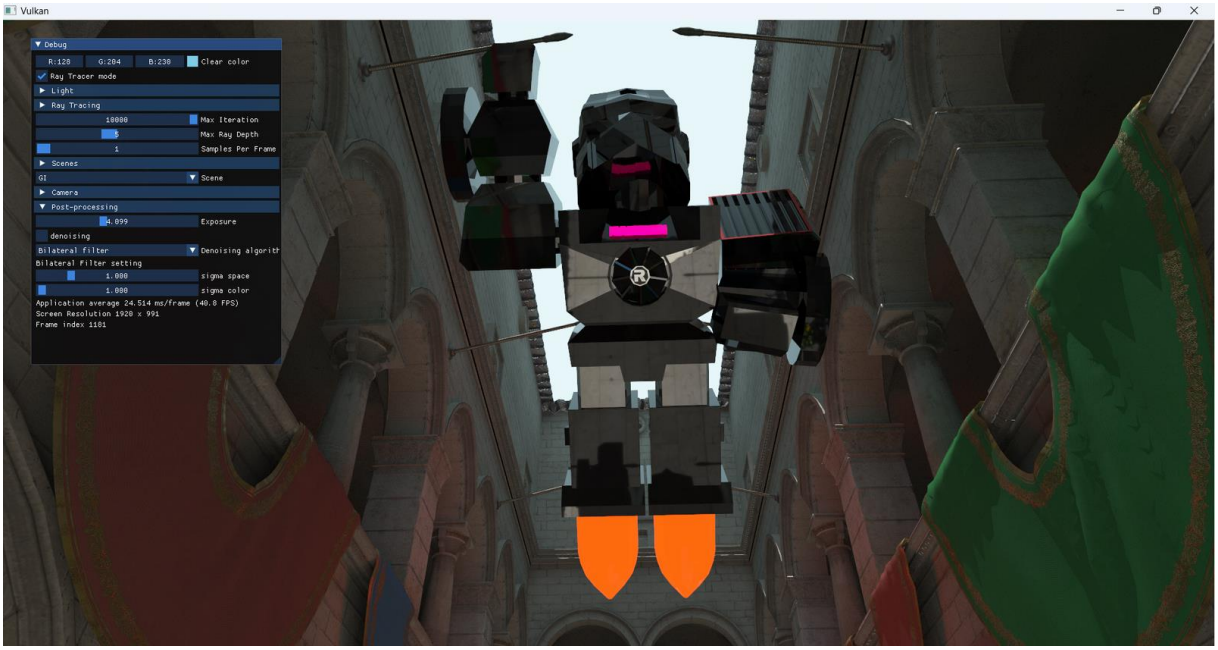

Vulkan
Debug

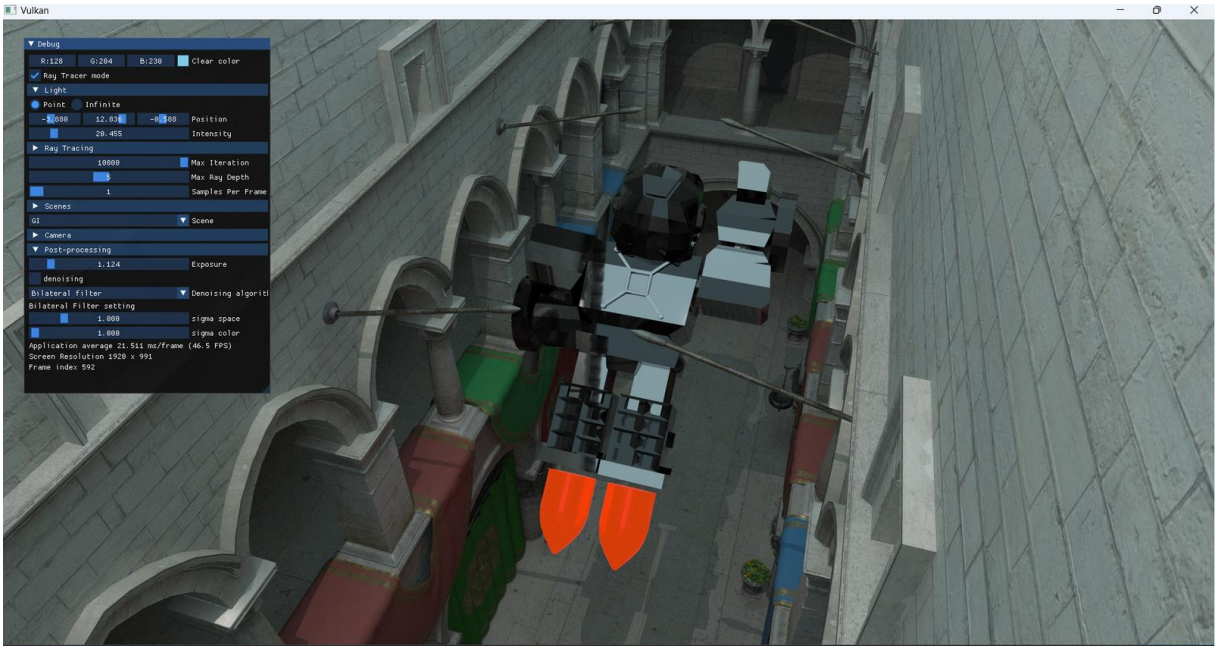
b. Deferred


Vulkan
Debug
R:128
G:204
B:230
Clear color
Ray Tracer mode
Light
Point
Infinite
Direction
Intensity
Ray Tracing
10000
Max Iteration
7
Max Ray Depth
1
Samples Per Frame
Scenes
Deferred
Scene
Camera
11 deg
Defocus Angle
3.684
Focus Dist
Post-processing
Exposure
denoising
Bilateral filter
Denoising algorit
Bilateral Filter setting
1.000
sigma space
0.225
sigma color
Application average 52.557 ms/frame (19.0 FPS)
Screen Resolution 1920 X 991
Frame Index 664


Vulkan
Debug
R:128
G:204
B:230
Clear color
Ray Tracer mode
Light
Point
Infinite
-0.124
-0.778
0.615
Direction
22.078
Intensity
Ray Tracing
10000
Max Iteration
7
Max Ray Depth
1
Samples Per Frame
Scenes
Deferred
Scene
Camera
25 deg
Defocus Angle
4.463
Focus Dist
Post-processing
4.156
Exposure
denoising
Bilateral filter
Denoising algorit
Bilateral Filter setting
1.000
sigma space
8.225
sigma color
Application average 56.113 ms/frame (17.8 FPS)
Screen Resolution 1920 x 991
Frame index 582

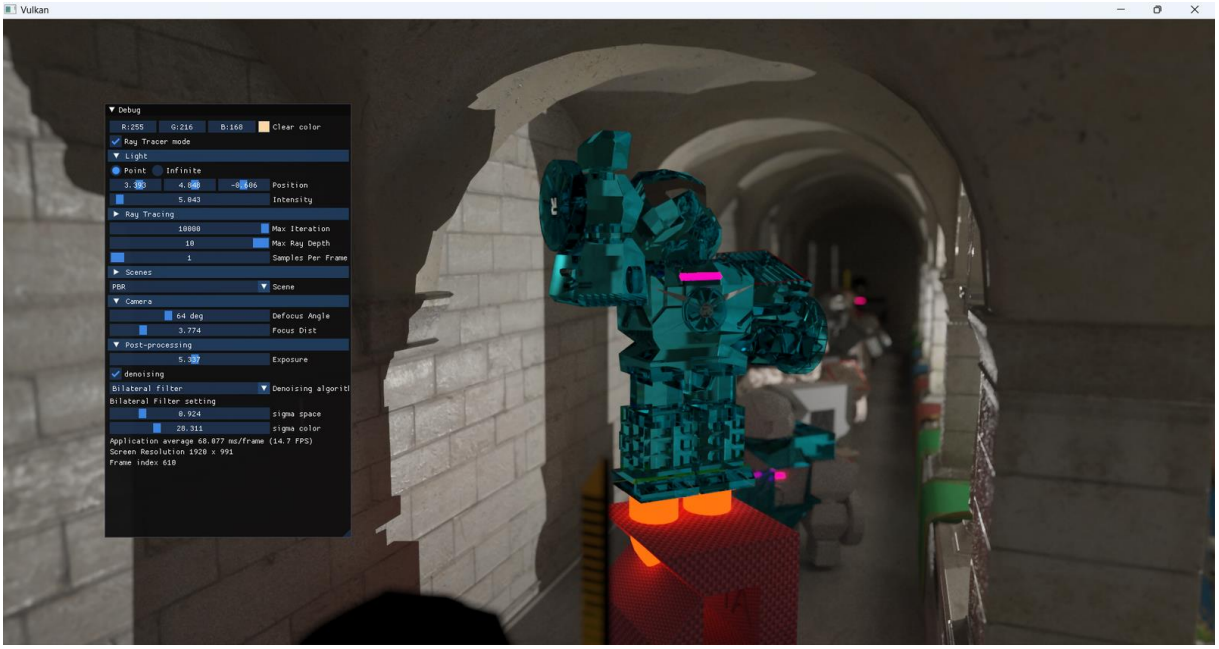
c. GI

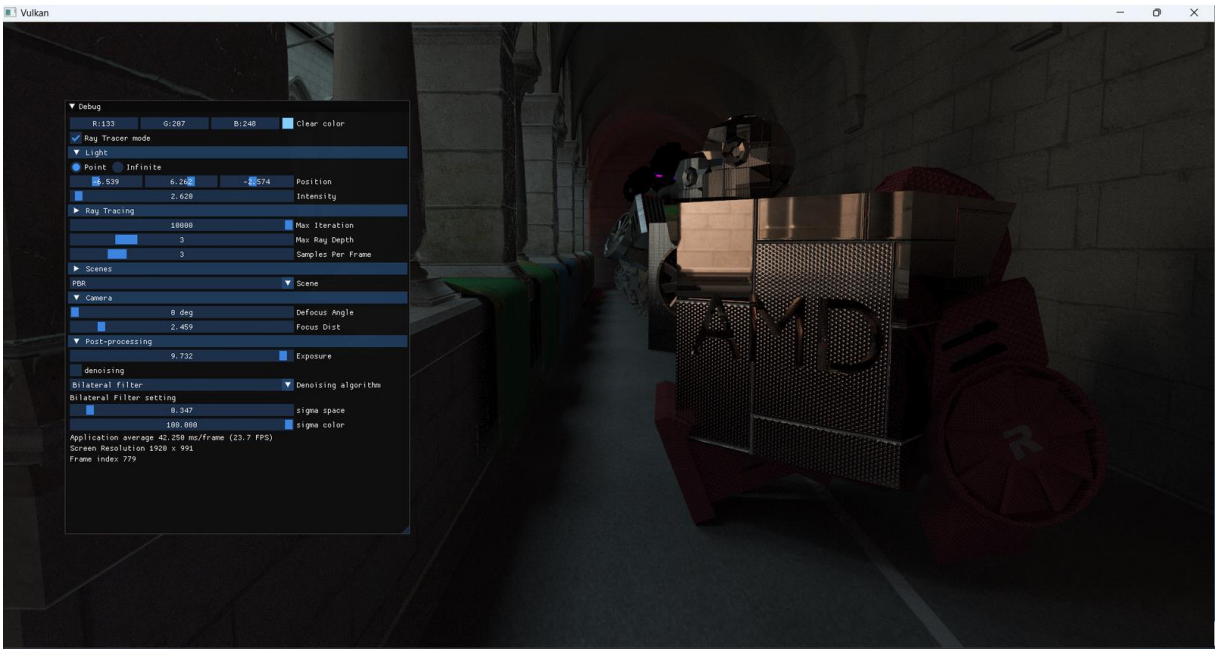

Vulkan
Debug
R:128
G:204
B:230
Clear color
Ray Tracer mode
Light
Ray Tracing
10000
Max Iteration
5
Max Ray Depth
1
Samples Per Frame
Scenes
GI
Scene
Camera
Post-processing
4.099
Exposure
denoising
Bilateral filter
Denoising algorith
Bilateral Filter setting
1.000
sigma space
1.000
sigma color
Application average 24.514 ms/frame (40.8 FPS)
Screen Resolution 1920 x 991
Frame index 1181


Vulkan
Debug
R:128
G:204
B:230
Clear color
Ray Tracer mode
Light
Point
Infinite
-3.000
12.034
-0.500
Position
20.455
Intensity
Ray Tracing
10000
Max Iteration
5
Max Ray Depth
1
Samples Per Frame
Scenes
GI
Scene
Camera
Post-processing
1.124
Exposure
denoising
Bilateral filter
Denoising algorith
Bilateral Filter setting
1.000
sigma space
1.000
sigma color
Application average 21.511 ms/frame (46.5 FPS)
Screen Resolution 1920 x 991
Frame index 592

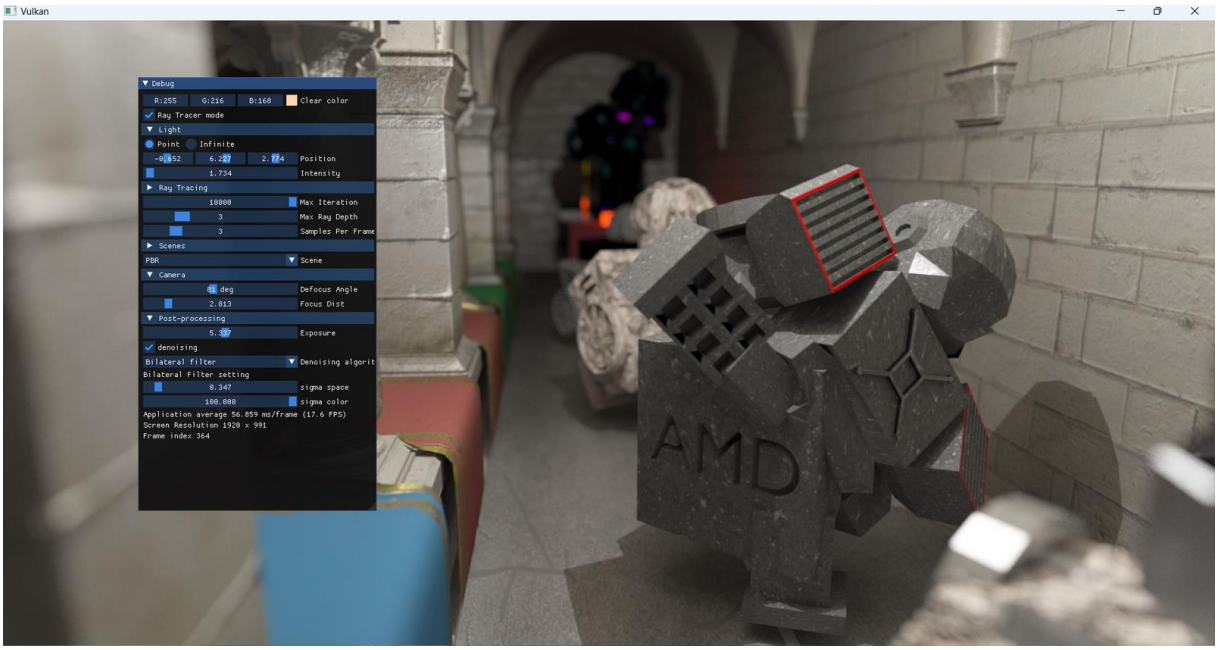

Vulkan
Debug

d. PBR


Vulkan
Debug
R:255
G:216
B:168
Clear color
Ray Tracer mode
Light
Point
Infinite
Position
5.843
Intensity
Ray Tracing
10000
Max Iteration
10
Max Ray Depth
1
Samples Per Frame
Scenes
PBR
Scene
Camera
64 deg
Defocus Angle
3.774
Focus Dist
Post-processing
Exposure
denoising
Bilateral filter
Denoising algorithm
Bilateral Filter setting
0.924
sigma space
20.311
sigma color
Application average 68.877 ms/frame (14.7 FPS)
Screen Resolution 1920 x 991
Frame index 610


Vulkan
Debug
R:133
G:207
B:248
Clear color
Ray Tracer mode
Light
Point
Infinite
2.620
Intensity
Ray Tracing
10000
Max Iteration
3
Max Ray Depth
3
Samples Per Frame
Scenes
PBR
Scene
Camera
0 deg
Defocus Angle
2.459
Focus Dist
Post-processing
9.732
Exposure
denoising
Bilateral filter
Denoising algorithm
Bilateral Filter setting
0.347
sigma space
100.000
sigma color
Application average 42.258 ms/frame (23.7 FPS)
Screen Resolution 1920 x 991
Frame index 779
AMD


Vulkan
Debug
R:255
G:216
B:168
Clear color
Ray Tracer mode
Light
Point
Infinite
Position
Intensity
Ray Tracing
10000
Max Iteration
3
Max Ray Depth
3
Samples Per Frame
Scenes
PBR
Scene
Camera
7 deg
Defocus Angle
2.459
Focus Dist
Post-processing
Exposure
denoising
Bilateral filter
Denoising algorithm
Bilateral Filter setting
0.347
sigma space
100.000
sigma color
Application average 50.581 ms/frame (19.8 FPS)
Screen Resolution 1920 x 991
Frame index 539

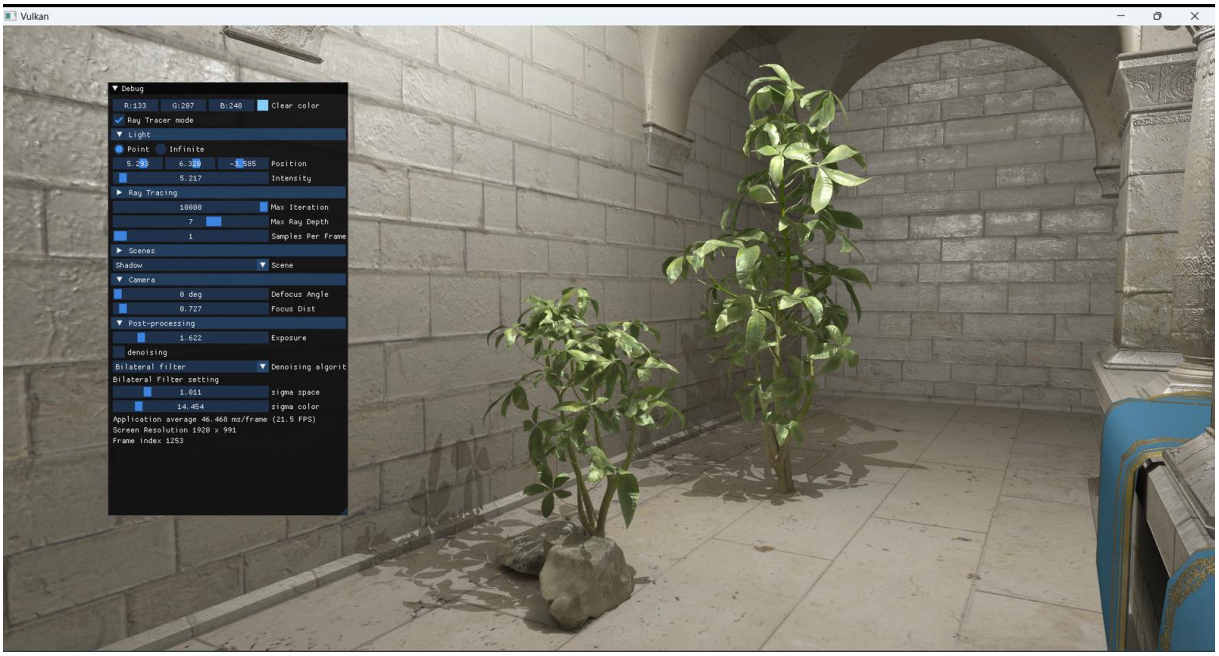

Vulkan
Debug
R:255
G:216
B:168
Clear color
Ray Tracer mode
Light
Point
Infinite
Position
1.734
Intensity
Ray Tracing
10000
Max Iteration
3
Max Ray Depth
3
Samples Per Frame
Scenes
PBR
Scene
Camera
Defocus Angle
2.813
Focus Dist
Post-processing
Exposure
denoising
Bilateral filter
Bilateral Filter setting
0.347
sigma space
100.000
sigma color
Application average 56.859 ms/frame (17.6 FPS)
Screen Resolution 1920 x 991
Frame index 364
AMD


Vulkan
Debug

e. Shadow


Vulkan
Debug
R:133
G:207
B:248
Clear color
Ray Tracer mode
Light
Point
Infinite
Position
Intensity
Ray Tracing
10000
Max Iteration
7
Max Ray Depth
1
Samples Per Frame
Scenes
Shadow
Scene
Camera
0 deg
Defocus Angle
2.459
Focus Dist
Post-processing
1.622
Exposure
denoising
Bilateral filter
Denoising algorit
Bilateral Filter setting
1.011
sigma space
14.454
sigma color
Application average 52.293 ms/frame (19.1 FPS)
Screen Resolution 1920 x 991
Frame index 516


Vulkan
Debug


Vulkan
Debug
R:133
G:207
B:248
Clear color
Ray Tracer mode
Light
Point
Infinite
Position
Intensity
Ray Tracing
10000
Max Iteration
7
Max Ray Depth
1
Samples Per Frame
Scenes
Shadow
Scene
Camera
0 deg
Defocus Angle
0.727
Focus Dist
Post-processing
1.622
Exposure
denoising
Bilateral filter
Denoising algorit
Bilateral Filter setting
1.011
sigma space
14.454
sigma color
Application average 46.468 ms/frame (21.5 FPS)
Screen Resolution 1920 x 991
Frame index 1253