光线追踪实验报告

计 24 黄晨 2012011337

目录

1 程序描述

本程序实现了基本的光线追踪，使用八叉树进行了加速，另外支持自定义场景，自定义纹理，自定义动画，以及 obj 导入。另外在图片渲染模式下，一幅图像渲染完成后，可通过键盘进行上下左右的移动以及视角方向的改变（如平移、旋转、俯仰等），当然，由于性能限制，每次移动根据场景复杂度需要等待几秒至几分钟不等。

2 程序类介绍

2.1 Camera 类

2.1.1 Ray 类：用以定义一根光线，由出发点和方向表示，其中方向向量应被单位化。

2.1.2 照相机类：一个照相机由屏幕像素的宽度和高度、屏幕实际的大小（即坐标系内的大小）、视点坐标、朝向以及正上方方向确定。

2.1.3 获取光线列表：这里有两个函数均可获取光线列表，一个是 getRay()，另一个是 getRay_antiAliasing()，前者返回一个 vector 容器，其中是需要追踪的所有光线，后者返回一个 vector 的数组（共 4 个 vector），分别为每个像素分解后的光线（此处在 3 程序算法描述中的抗锯齿部分将进行说明）。

2.1.4 运动：Camera 类内置了 move、rotate 等用于相机运动的函数，另外也可通过 set 函数直接设置相机的位置。在动画生成是通常使用 set，在键盘控制的情况下使用内置的移动函数。

2.2 Scene 类

在介绍此类之前，先对其使用的一些类做一些说明。

2.2.1 Object 类

2.2.1.1 物件类：用于定义各个部件的抽象类，其中包含了每个物件的材质信息（颜色 color、漫反射率 diffuse、镜面反射率 specular、透射率 transmiss、环境光反射率 environmentR、折射率 refractivity 和高光指数 s）、物件名称以及获得物件各信息的接口函数。

2.2.1.2 CrossRay(…)函数：有两个版本，其一返回值为 bool，即判断是否相交，并利用传入的参数返回交点坐标和相交类型；另一个返回值为 int，该函数只判断给定线段是否与该物件相交，返回相交次数。

1) bool 型函数，当返回值为真时，光线段与该物体相交，P 为交点坐标，inside 为相交类型。其中，相交类型分为 3 种，0 型、1 型和 2 型。

i. 0 型：光线从外部进入物件内部。

ii. 1 型：光线从内部穿出至物件外部。

iii. 2 型：光线从物体外部射出，与物体相交后仍在物体外部。该类型主要用于面片以及不用区分内外的物件。

2) Int 型函数，直接返回相交次数。返回值为 0 表示不相交。

2.2.1.3 InScene 函数：输入为场景的前左下角坐标和后右上角坐标，返回值为 bool 型。返回真表示该物体与场景有交，否则返回假。

2.2.1.4 运动：每个物件也相应定义有运动相关的函数，每个函数返回值为 bool 类型，表示是否可以进行对应的运动及是否成功完成运动，默认返回值为假，即不可运动。

2.2.1.5 involvedScene：set 容器，用以存储与该物件有交的所有场景，具体作用在 3 程序算法描述中的动画渲染加速部分将做进一步说明。

2.2.2 Sphere 类、Rectangle 类、Triangle 类及 TriangleOBJ 类

2.2.2.1 均继承自 Object 类，分别对应为球、平行四边形、三角形以及区分正反面的三角形。最后的 TriangleOBJ 主要为 Obj 设计，在将 Obj 作为可透光物件时使用。

2.2.2.2 根据物件不同，每个类也定义有自己专用的构造函数。

2.2.3 Texture 类

2.2.3.1 该类对纹理图像进行了封装，将图像转化为颜色数组方便以后的使用。

2.2.3.2 通过 Load 函数读取纹理图，通过 isLoaded 检测是否成功载入。

2.2.3.3 重载了[]操作符方便使用。

2.2.4 RaySource 类

光源类，定义了每个点光源的位置和颜色。

2.2.5 场景类

由前左下角坐标和后右上角坐标定义一个标准场景，由 Background 指定背景纹理标号（默认将背景映射为球型纹理）。minDistance 制定了最小场景边长限制，maxObjects 指定了最大物件个数限制。son 为子场景列表，father 为父场景，id 为场景在其父场景的子场景中的标号。初始场景的 father 为 0。

2.2.6 部分 static 成员

2.2.6.1 RaySources：所有光源的列表

2.2.6.2 __LFD、__RBU：初始场景的前左下角坐标和后右上角坐标

2.2.6.3 AllObjects：所有物件的列表

2.2.6.4 WaitObjects：等待重新分配场景关系的物件的列表

2.2.6.5 nextBackground、alpha：用于动画中的背景变换使用，在在 3 程序算法描述中的动画部分将做进一步说明。

2.2.6.6 textures：所有纹理的列表

2.2.6.7 radius, radius_sqr：球型纹理映射时的半径大小，在初始化的时候将自动进行更新。

2.2.7 成员函数说明

2.2.7.1 outPos(Ray&)：计算光线在不与物体相交的情况下射出场景时的坐标。

2.2.7.2 cross(…)：同样为两个版本，一个版本用于求交，一个版本用于计算阴影。

1) bool cross(Ray&, SimpleOBJ::Vec3f&, Object *&, int &)：求交用。当返回值为真时，返回相交物件的指针和相交类型（定义见 2.2.1.2 1），若相交物件指针为 0，则表示已射出最大场景；当返回值为假时，返回射出该场景时坐标。

2) bool cross(Ray& ray, SimpleOBJ::Vec3f& rs_pos, std::vector<Object*> *objs, bool &flag, SimpleOBJ::Vec3f &pos)：计算阴影用。当返回值为真时，objs 为在该场景中与光线相交的物件列表，若 objs 为空，则已到底最大场景的边缘。另外，在返回值为真时，若 flag 为真，则到达光源，若 flag 为假，则 pos 为射出时的坐标；当返回值为假时，pos 表示射出时的坐标。

2.2.7.3 Initialize(bool)：初始化函数，输入的 bool 表示是否为第一次初始化，即是将 AllObjects 里的物件分配至各个场景，还是将 WaitObjects 中的物件进行再分配。关于分配物件将在 3 程序算法描述中的八叉树加速部分进行进一步说明。

2.2.7.4 shink()：这个函数主要用于动画生成时，在物件发生移动之后，对于那

些已经空了的场景，若其有子场景，则将子场景删除时使用。

2.3 Raytrace 类

2.3.1 光线跟踪类，其中定义了 BRDF 模型的计算方式、折射与反射函数、光线追踪接口以及平滑函数。一个光线跟踪类包含了一个相机、一个场景，同时定义了最大递归深度。

2.3.2 折射与反射：通过调用 Object 的方法获取物件某点的法相与材质，进而生成折射光与反射光进行进一步追踪。

2.3.2.1 关于折射：当光线从光密介质到达光疏介质时，在入射角较大的情况下可能发生全反射，因此折射函数的返回值为一个 int，表示是否发生全反射，以及折射前后光线与物件内外的关系，用于计算折射率进行下一层递归。当发生全反射时，镜面反射虑变为原镜面反射率加上透射率。

2.3.3 inScene 函数：根据光线的起点与方向判别该光线是否在某场景内。

2.3.4 subScene 函数：获取包含某光线的最小场景。

2.3.5 Trace 函数：光线跟踪主函数，完成光线跟踪的各个阶段，返回颜色列表。

2.3.6 trace 函数：光线跟踪函数，输入一根光线与起始场景，返回颜色值。

2.3.7 rsTrace 函数：计算阴影时使用的追踪函数。

2.4 Movie 类

用于生成动画的类，包含 Movement 类、CameraMove 类和 BackgroundMgr 类。

2.4.1 Movement 类

2.4.1.1 控制物件运动的类，定义了一个运动信息类 MoveInfo，Movement 类在每次移动物件时根据 MoveInfo 的信息做出相应调整。

2.4.1.2 movements 成员：一个运动序列的 vector 容器，内部元素依照起始帧与结束帧的大小进行了排序。

2.4.1.3 Init()：初始化，将当前帧置 0。

2.4.1.4 move()函数：根据 movements 和当前帧序号对物件进行移动。

2.4.2 CameraMove 类

2.4.2.1 控制相机运动的类，由视点、前点与顶点确定相机的位置信息。

1) 前点：相机正前方向上的一点

2) 顶点：确定相机正上方的点，不一定恰好位于正上方，其与视点、顶点构成的平面即觉得了相机的正上方。这样设计是便于对相机的朝向进行设置。

2.4.2.2 为了方便起见，将视点、前点与顶点均设置为了一个球型物件（Sphere），只不过这三个球体并未加入值场景类中的 AllObjects 中，因此不会被显示。CameraMove 类内含三个 Movement 类对这三个球的运动进行控制。

2.4.3 BackgroundMgr 类

2.4.3.1 控制场景背景变换的类，与该类配套的同样定义了一个 BackgroundInfo 类来存储背景变换信息。

2.4.3.2 与 Movement 类的实现方式类似，backgoundList 存储了背景变换的各种信息，然后 BackgroundMgr 类中存储了当前的帧数。通过 init()进行初始化，通过 next()进行场景变换。

3 程序算法描述

3.1 基本的光线追踪

3.1.1 对每一跟光线，调用场景类的 cross 方法求出光线与场景中物体的交点，调用光线追踪类的 refract 和 reflect 方法生成折射与反射光，对折射与反射光进行继续追踪，之后利用着色函数进行着色，返回颜色值。

3.1.2 追踪停止的条件：超过最大递归深度或光线对色彩的贡献过小。

3.2 抗锯齿

3.2.1 FSAA 4x

本程序使用的抗锯齿算法为 FSAA 全屏抗锯齿，采样虑为 4 倍，即将每一个像素点分为 4 各小的像素点分别采样，最后的结果用 4 各像素点的颜色取平均值。

3.2.2 Smooth

后期平滑处理。即将每个点的颜色换位其本身、右方、下发、右下方 4 个点颜色的平均值，这种处理方式可以达到一定的抗锯齿效果，不过会使画面整体模糊化。虽然性能不必 FSAA，不过速度较快。

3.3 光线追踪加速

3.3.1 八叉树加速

3.3.1.1 初始化：

1) 若场景尺度小于最小尺度，或场景中物件个数小于最大物件个数，返回。
2) 创建子场景，对每个物件，检测其与所有子场景是否相交，若相交则将其加入对应子场景的物件列表。
3) 初始化各子场景，返回。

3.3.1.2 对每一个光线，首先求出包含其的最小场景，然后获取该光线与场景的交点坐标，这样，有光线起点和光线与场景的交点就构成了一跟线段。之后对场景中的每个物件，看该线段是否与其相交，若相交，求出最近交点，将最近交点作为起点，生成折射与反射光，继续进行追踪。若不相交，则将光线与场景的交点作为新的起点，继续进行追踪，直至相交或到达最大场景边缘。

3.3.1.3 关于获取包含光线的最小场景

1) 根据课件上的场景标号原则，将光线起点与场景分割的中点比较即可。初始子场景标号置为 0。若 x 坐标大于中点 x 坐标，标号加 1，若 y 坐标大于中点坐标，标号加 2，若 z 坐标大于中点 z 坐标，标号加 4。最后所得即为子场景的标号。值得注意的是对临界情况的处理，若起点位于某一分割平面上，应根据其方向进行界定属于哪一侧。
2) 初始状态的查找：对每一个场景，若其无子场景，返回该场景；否则根据 1）的规则查找起点所属的场景标号，进入对应的子场景，再次查找。
3) 射出场景时的查找：在父场景中进行检测，若新的光线属于父场景，则在父场景中，使用 1）的方法获得最小子场景；否则，将当前场景置为其父场景，重新对当前场景的父场景进行包含检测。

3.3.2 多线程加速

3.3.2.1 初始化多线程加速

1) 主线程

i. 若初始场景尺度小于最小尺度，或 AllObjects 中物件个数小于最大物件个数，则将 AllObjects 中所有物件加入初始场景的物件列表，将该场景指针加入各物件的 involvedScene 中，返回。

ii. 初始化各子场景，其中中点坐标使用各物件中心坐标的平均值。若以此法求出的中点坐标距离场景边界的某平面的距离小于 1，则将中点坐标置为场景正中心。

iii. 对 AllObjects 中的每个物件，检测其与各子场景是否相交，若相交则将其加入对应子场景的物件列表。

iv. 对每个子场景，开启一个从线程进行初始化处理。

2) 从线程

i. 若场景尺度小于最小尺度，或场景中物件个数小于最大物件个数，将该场景指针加入各物件的 involvedScene 中，返回。

ii. 初始化各子场景，其中中点坐标使用各物件中心坐标的平均值。若以此法求出的中点坐标距离场景边界的某平面的距离小于 1，则将中点坐标置为场景正中心。

iii. 对每个物件，检测其与所有子场景是否相交，若相交则将其加入对应子场景的物件列表，当该子场景的物件数大于最大物件数时，初始化该场景（这里进行初始化是为减少内存占用，并不节省时间）。

iv. 初始化各子场景，返回。

v. 注：在多线程中维护各物件的 involvedScene 列表时，为避免访问冲突，应加入一个互斥锁。

3.3.2.2 光线追踪的多线程加速

1) 主线程将光线列表等分为 4 部分，开启 4 各从线程分别对 4 各光线列表进行光线追踪。

2) 注意，由于分割为单纯的顺序分割，因此该加速在无抗锯齿的情况下加速效果为 2-4 倍，在抗锯齿的情况下加速效果为 4 倍。

3.4 高维纹理

3.4.1 场景背景采用的是球型纹理，对于每一个需要获取背景的背景点，根据其光线的前进方向，利用光线与球相交的算法，计算出其在背景纹理球上的交点，此处球心坐标取为场景最低（z 坐标最小）平面的中心。

3.4.2 根据交点 z 坐标绝对值，使用映射函数$\varphi(z) = 1 - \frac{|z|}{r}$，其中 r 为球半径（场景类中的 radius），将其映射至纹理图的高度值（乘以最大高度）。

3.4.3 根据交点在最低平面的投影与 y 轴正半轴的夹角确定宽度值，映射函数$\varphi(x,y) = \frac{1+\frac{\arctan\left(-\frac{y}{x}\right)}{\pi}}{2}$，将其映射至纹理图的宽度值（乘以最大宽度）。

3.5 动画

3.5.1 基本运动函数：

3.5.1.1 Move：运动至某点，或按某方向运动一定距离

3.5.1.2 Rotate：根据跟定的点和轴方向进行旋转。旋转的函数在 MyMath.h 中进行了声明，在 Object 类中根据不同物体进行了封装。

3.5.2 每次进行运动时，根据当前帧数找出需要进行的所以运动。由于实现对运动列表进行了排序，因此可以顺序查找，当某个运动信息的起始帧大于当前帧时，即可退出查找。每帧对每个物体可能同时有多种移动。

3.5.3 对于每个运动，首先根据剩下的帧数和需要运动的距离或角度，计算出当前帧的移动参数，然后对对应物体进行移动。

3.5.4 背景变换

3.5.4.1 背景变换的原理

1) $\text{Background} = (1-\alpha) * \text{oldBackground} + \alpha * \text{newBackground}$

2) 根据 alpha 值的不同，背景颜色也不同，当 alpha 实现渐变时，背景便实现了渐变。

3.5.4.2 根据变换的持续时间，计算出每一针 alpha 值的变化量。变换结束时更新背景。

3.6 动画渲染加速

3.6.1 动画渲染的原理就是一帧一帧地渲染然后将结果图像连接起来，但如果每一帧都删除之前的场景后重新初始化整个场景，将耗费大量的时间，因此本程序对动画渲染的初始化进行了优化。

3.6.2 动画渲染中的初始化加速：

3.6.2.1 对于每一帧，对每个移动过的物件，在包含该物件的场景中删除该物件，若删除之后场景不含有任何物件，则调用 Scene 类中的 shrink 方法对场景进行收缩（如可收缩的话）。将移动过的物件加入 Scene 类的 WaitObjects 中。

3.6.2.2 调用最大 Scene 中的初始化函数，传入参数置为 false（非第一次初始化）。

3.6.3 依此法进行加速过后，每次只需对移动过的物件进行再分配，而不必进行整个场景的重构

3.6.4 缺陷：在很多帧以后，可能会存在一些冗余子场景，这是由于场景收缩的判断条件引起的。冗余子场景的数量和场景类中每个场景的最大物件数成正比。

4 程序亮点

4.1 Obj 的导入

4.1.1 在八叉树的支持下，Obj 的导入成为了现实。在不加速的情况下，渲染时间将非常的长。

4.1.2 导入 Obj 使用提供的 parser 即可，然后对每个三角面片，根据 Obj 的导入模式（在 4.2 中将进行介绍），初始化为一个 Triangle 或者 TriangleOBJ 即可。

4.2 场景文件

4.2.1 本程序的场景定义由文件进行，在运行程序时，可以通过参数输入场景文件名称，在不输入的情形下默认为 scene.inf。

4.2.2 场景文件的格式

4.2.2.1 #... 该行为注释

4.2.2.2 window height width 定义窗口大小

4.2.2.3 scene LFD RBU 定义场景大小，LFD 为前左下角坐标，RBU 为后右上角坐标

4.2.2.4 smooth 0/1 是否进行平滑：0 表示不平滑，1 表示平滑，不定义默认为不平滑

4.2.2.5 antiAliase 0/1 是否抗锯齿：0 表示关闭抗锯齿，1 表示开启抗锯齿，不

定义默认为关闭

4.2.2.6 back number 背景的纹理编号

4.2.2.7 texture path 载入纹理

4.2.2.8 camera sw sh focus pos forward upward 定义相机信息，sw 和 sh 为相机在坐标系中的实际宽度和高度，focus 为焦距，pos 为视点坐标，forward 为正方向，upward 为正上方，upward 和 forward 可不垂直，不垂直时系统将自行修正

4.2.2.9 depth number 定义最大递归深度，不定义默认为 2

4.2.2.10 sphere center radius color diffuse specular transmiss environmentR refractivity s name 定义一个球体，center 为球心，radius 为半径，其后的参数参见 Object 类的定义。

4.2.2.11 triangle corner0 corner1 corner2 color diffuse specular transmiss environmentR refractivity s name 定义一个三角面片，corner0/1/2 分别为其三个顶点

4.2.2.12 rect/rectangle leftDown length width color diffuse specular transmiss environmentR refractivity s name 定义一个平行四边形，其中用/隔开的部分表示前后均可，leftDown 为其左下角坐标，length 和 width 均为向量，分别为长和宽。

4.2.2.13 obj/object path name normal/obj/object center scale color diffuse specular transmiss environmentR refractivity s 定义一个 obj，其中 normal 表示普通模式，即不考虑 obj 的内外，obj/object 为物体模式，此时光线在穿过 obj 时将发生折射（如果可能的话）。

4.2.2.14 rs/raysource pos color 定义一个点光源

4.2.2.15 movie fileName 一旦出现此语句，则输出为视频格式，其后的 fileName 指定了动画描述文件（在 4.3 中进行介绍），若不指定，则默认为 Movie.inf

4.2.2.16 save/savename fileName 指定输出文件的文件名，默认为 Image.bmp

4.2.2.17 注：

1) 以上的 color、diffuse、specular、transmiss、environmentR 均为三通道，分别为 r、g、b。

2) 文件中坐标、向量均为 x y z 的格式

4.3 自定义动画

4.3.1 跟场景一样，本程序的动画同样是通过动画描述文件自定义的

4.3.2 动画文件的格式

4.3.2.1 #... 该行为注释

4.3.2.2 movie length fps 定义视频基本信息，length 为视频长度，以帧为单位，fps 为每秒帧数

4.3.2.3 id[-id] rotate center axis degree fS fE 定义一个（一系列）物件的旋转运动，其中 id 为物件编号（物件在 AllObjects 中的编号），该编号可根据场景文件中的物件顺序确定（以 0 开始）。扩展为中括号内部分，即可知道从编号 a 到编号 b 直接的所有物件做其后的选择运动。Center 为旋转中心，axis 为旋转轴的方向向量，degree 为选择度数（弧度），fS 为起始帧数，fE 为终止帧数。

4.3.2.4 id[-id] rotateSelf degree fS fE 定义一个自旋转运动，其中 id[-id]、fS、fE 同 4.3.2.3 中所述，degree 为旋转角。该运动使物体绕自己中心做顺时针旋转运动（degree<0 时逆时针旋转）。定义该运动主要用于解决运动中物体中心不确定的问题。

4.3.2.5 id[-id] move pos fS fE 定义一个平移运动，该运动使得物体在指定帧过后移动至 pos。值得注意的是，该运动在每一帧都将计算一次移动距离，因此，不论过程中物体进行了何种其它运动，在结束帧时都将移动至 pos 处。请勿在同一结束帧定义多个移动至不同地点的 move 运动。

4.3.2.6 id[-id] moveRadius center distance fS fE 定义一个径向运动，运动方向为指定 center 与物体中心连线的方向，规定指向物体中心方向为正。

4.3.2.7 id[-id] moveDirect direction distance fS fE 定义一个固定方向的平移运动，direction 为移动的方向，distance 为移动的总距离

4.3.2.8 back id fS fE 定义了一个背景变换，在结束帧时将背景变换为第 id 各纹理图。该变换将自动实现渐变。

4.3.2.9 camera u/f/v rotate/move/moveRadius/moveDirect … 定义了相机的运动，u、f、v 分别表示顶部、前方和视点的运动，其后的运动定义和物件的运动类似。注意，相机没有 rotateSelf 的定义。

4.4 加速

除使用八叉树加速外，对程序的初始化和运行均进行了优化与加速。其中，初始化部分实现了边分配物件边创建场景，使得物件分配占用更少的内存即可实现。在分配与追踪过程中使用多线程技术，使得花费时间更短。

4.5 高维纹理

场景的球型纹理背景增加了视觉上的宏大感，对于大型场景的渲染非常有效。

4.6 背景渐变

应用背景渐变，使得动画具有更多的观赏性与可创造性，例如 demo 中的天气变化。

4.7 键盘控制

这个功能比较纠结……由于程序的性能问题，使得每一次按键后均需等待一段时间，短则几秒，长则几十秒，因此实用性能有所下降。虽然与最初的设想差距比较大，不过还是可以使用的。

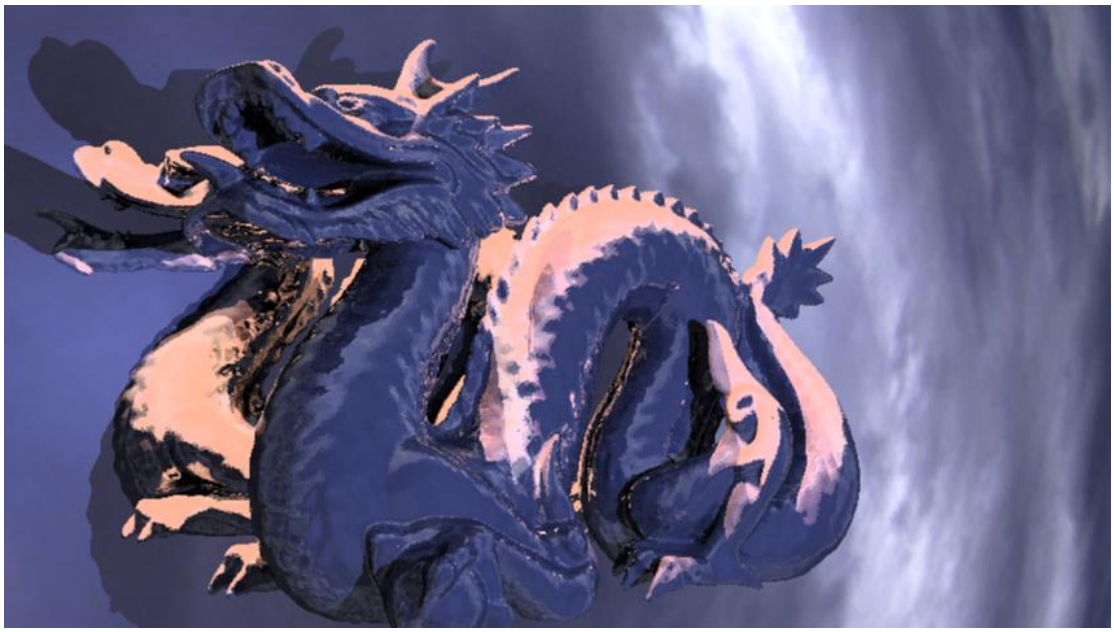
5 程序运行结果

5.1 普通光线追踪与两种抗锯齿效果

5.1.1 普通光线追踪

5.1.2 FSAA4x 抗锯齿

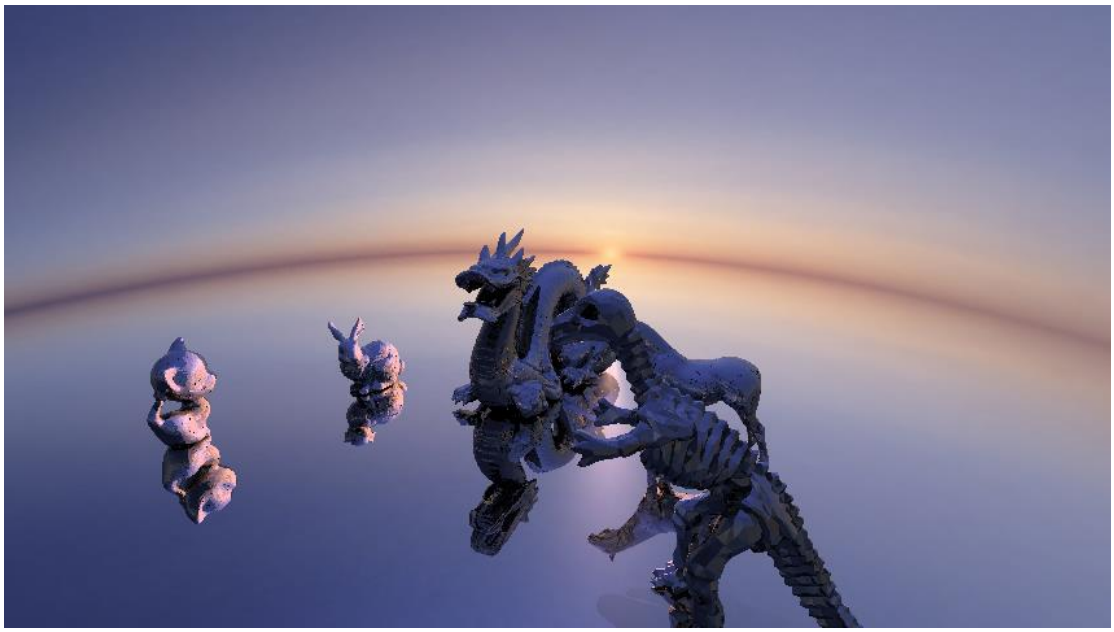
5.1.3 Smooth 平滑



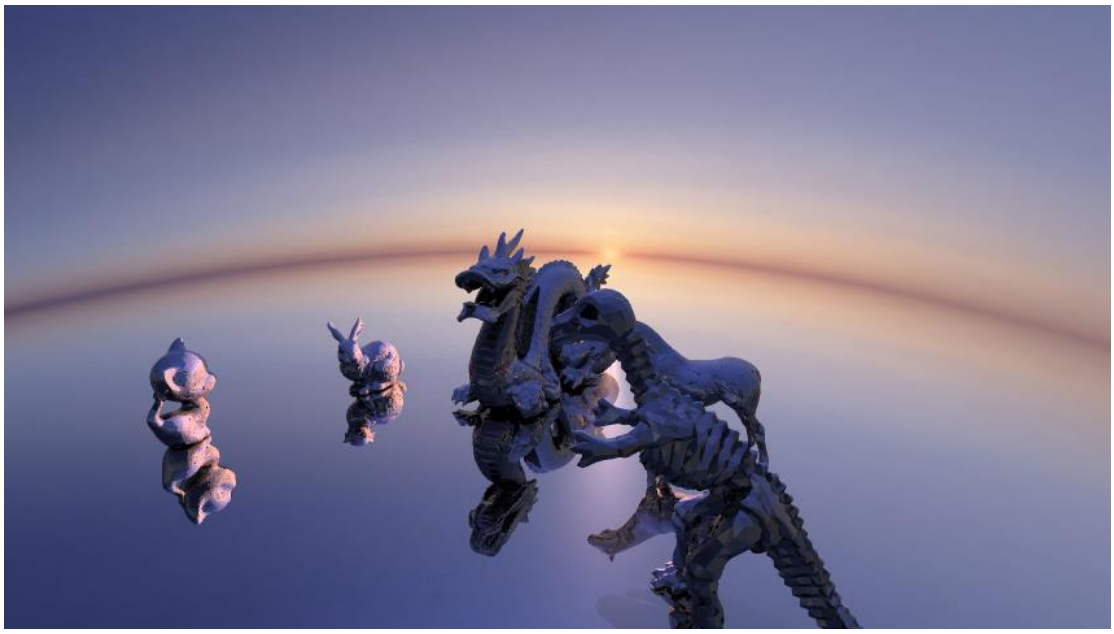
5.2 普通光线追踪——Dragon

5.3 多 obj

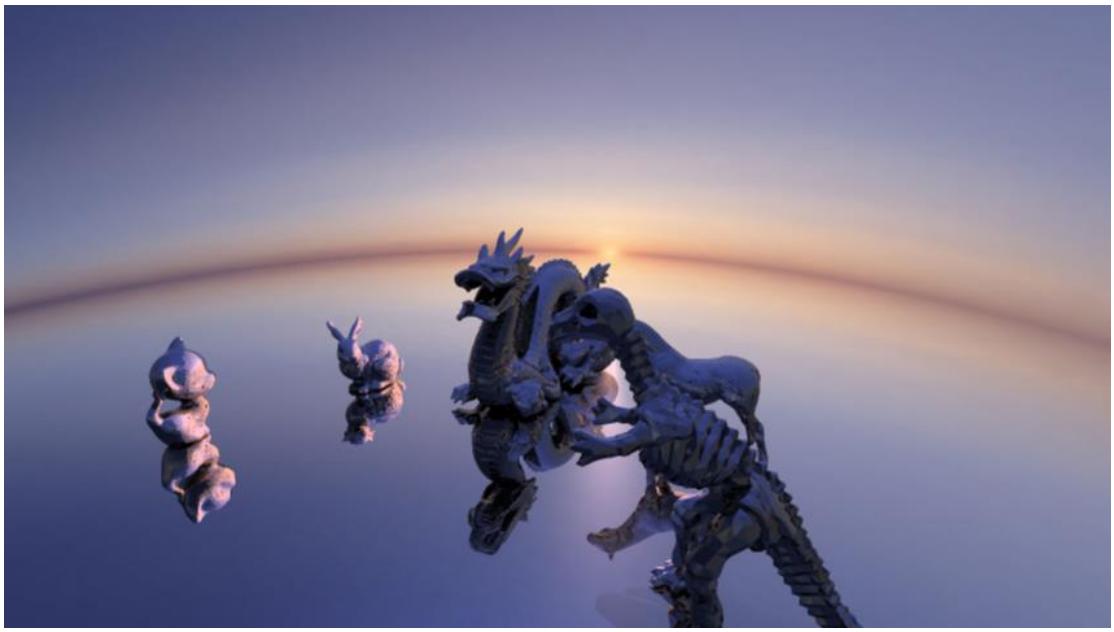
5.3.1 普通光线追踪



5.3.2 FASS4x 抗锯齿



5.3.3 FASS4x 抗锯齿+Smooth 平滑



5.4 动画

见打包附件

6 总结与收获

6.1 OpenCV

6.1.1 openCV 的版本不尽相同，在生成 exe 时应注意将对应版本的 dll 拷贝至 exe 文件所在目录。

6.1.2 在读取图像时，默认读取的图像为 8 位无符号整型，在运算时应转化为浮点型。

6.1.3 在储存图像时，应将 32 位无符号浮点型图像转化为 8 位无符号整型图像再进行存储。

6.1.4 输出图像时，cvSize 的两个参数分别为列和行，而不是行和列。

6.2 遇到的困难

6.2.1 计算精度问题：在进行光线求交运算时，所得数据精度需根据具体情况进行调整，如球体求交精度在 1e-3，而三角和平行四边形面片求交精度在 1e-4。

6.2.2 空间占用问题：最初每个场景的物件列表是使用 vector 存储的，这导致在初始化时，若面片数目过大，内存会不够用。究其原因在于 vector 的连续空间存储性质，这使得内存中有许多空闲空间碎片。改为 list 结构后便更充分利用了空间。

6.2.3 全反射问题：最初在计算折射时并未考虑全反射，这使得对于立方体的情况，在入射角大于全反射角时，折射光线方向变得非常诡异，产生的景象也很奇怪。后来经过调试发现光线在立方体内发生了全反射，因此加入了全反射判断。

6.2.4 屏幕处于场景外的问题：有时候，在设置相机位置时设置有误，使得屏幕有一部分在场景外，此时在产生光线时需要对光线起点进行修正。在无法修正的情况下默认显示黑色。

6.2.5 多线程访问冲突问题：这在多线程加速部分已经提到，在维护物件的 involvedScene 列表是须加入互斥锁。

6.2.6 运动场景更新的优化问题：这在运动渲染加速部分也已经提到，通过只重新分配运动物体以达到运动场景更新的加速。

7 参考资料

7.1 课件

7.2 CSDN 博客（具体参考的文章也记不住了，通常是直接用搜索引擎搜索的 CSDN 的博文）