计算机图形学基础-大作业报告

——坐标变换+纹理映射+Blinn-Phong 光照+阴影映射

姓名：魏少杭 学号：20373594 学院：人工智能研究院

注：终端 make up 指令可以直接链接运行。如果想看光照结果而不看阴影映射结果，则将 src 中的 main_无阴影.cpp 内容复制到 main.cpp 中即可。

一、综述

本次作业主要应用 OpenGL 完成。完成作业过程中，学习了 OpenGL 的渲染流水线和一些库函数的用法。代码实现主要依赖 glad、GLFW、glm、stb_image.h 等库和头文件。作业主要实现了顶点坐标变换、纹理映射、光照、阴影映射等。下面从这四个方面分别介绍作业完成情况。

代码结构中，全体流程均在 main 函数中实现。所有顶点着色器和所有片段着色器都以 GLSL 语言实现，并放在文件开头，在 main 中构建着色器时调用。

二、顶点坐标变换

一个顶点通常包含 x,y,z 三维坐标，通常以四元组形式，经过局部空间-[model 矩阵]->世界坐标系下的坐标-[视角矩阵 view matrix]->视角空间-[projection 矩阵]->剪辑空间-[viewport transform]->屏幕空间过程的变换。

1.局部空间

物体初始所在的坐标空间即局部空间。初始时构建物体各个顶点即定义其局部空间坐标，通常为 3 维向量。

2.世界空间

世界空间是所有物体共同存在的一个绝对空间，所有物体在这个空间中有自己的分布。由于局部空间不同物体的顶点可能位置有重合或很接近的情况，故需要用模型矩阵对各个物体的各个顶点坐标做变换，使得物体坐标从局部空间到世界空间。模型矩阵能够对物体进行位移、缩放、旋转等基本操作。在 glm 库下定义的各种变换函数可以实现这种变换。例如以下三种变换分别在 glm 中是 glm::translate、glm::rotate 和 glm::scale。我们可以通过首先定义一个 4*4 的对角阵作为 model，然后 model 不断通过变换迭代得到完成平移和缩放的操作：

```
// 各个正方体先创建model矩阵
glm::mat4 model = glm::mat4(1.0f);
model = glm::translate(model, cubePositions[i]);    // 平移
float angle = 20.0f * i;
model = glm::rotate(model, glm::radians(angle), glm::vec3(1.0f, 0.3f
int modelLoc = glGetUniformLocation(shaderProgram, "model");
glUniformMatrix4fv(modelLoc, 1, GL_FALSE, glm::value_ptr(model));
```

```
glm::mat4 model = glm::mat4(1.0f);
model = glm::translate(model, lightPos);    // 移到
model = glm::scale(model, glm::vec3(0.2f)); // 缩小
```

3.观察空间/视觉空间/摄像机空间

经常是通过一系列旋转、平移等操作，将物体从世界空间坐标转换到用户视野前方的空间坐标中。需要用 view 矩阵实现。glm::lookAt 可以很方便地实现这个操作。

```
glm::vec3 viewPosition = glm::vec3(camX, 0.0f, camZ);
// lookAt函数的参数：1.视角世界位置；2.视角目标位置；3.世界坐标系的上方向
view = glm::lookAt(viewPosition, glm::vec3(0.0f, 0.5f, 0.0f), glm::vec3(0.0f, 1.0f, 0.0f));
int viewLoc = glGetUniformLocation(shaderProgram, "view");
glUniformMatrix4fv(viewLoc, 1, GL_FALSE, glm::value_ptr(view));
```

4.裁剪空间

顶点着色器对坐标进行前面的变换之后，为了成像在一个屏幕的一定区域内，必须裁掉超出屏幕空间不可见的点。

由观察空间坐标转换到裁剪空间，需要用投影矩阵实现。投影矩阵主要包含两类：正交投影和透视投影。在本次实现过程中两类投影矩阵都有用到：

正交投影矩阵用 glm::ortho 实现，如下面例子，投影映射过程深度贴图部分由光源作为“相机”的坐标变换：

```
// 计算世界空间->光源视角的裁剪空间的变换矩阵：先view再proj
// 1.首先，使用正向投影，所以正交投影矩阵
GLfloat near_floor = 1.0f, far_floor = 7.5f;
    // 光源的投影矩阵
glm::mat4 lightProjection = glm::ortho(-10.0f, 10.0f, -10.0f, 10.0f, near_floor, far_floor);
    // 利用lookAt函数生成view矩阵
glm::mat4 lightView = glm::lookAt(lightPos, glm::vec3(0.0f), glm::vec3(0.0f, 1.0f, 0.0f));
    // 从世界坐标转换到光源向外投影裁剪的复合变换矩阵
glm::mat4 lightSpaceMatrix = lightProjection * lightView;
```

透视投影：glm::perspective 实现。主要用于顶点着色器中进行透视投影，实现如人在观察事物时成像远近大小的逼真效果。45.0 这个角度值是指的视野角度，是按照经验设定的；最后两项分别是屏幕空间中距离相机最近、最远的距离值。

```
// 3.投影矩阵
glm::mat4 projection;
projection = glm::perspective(glm::radians(45.0f), (float)SCR_WIDTH / (float)SCR_HEIGHT, 0.1f, 100.0f);
```

进入裁剪空间之后，为了得到屏幕显示的图像，OpenGL 通过在一个顶点着色器最后自动执行透视除法，将 4D 裁剪空间坐标变换为 3D 标准化设备坐标。最后通过 glViewport 函数指定视口大小，得到屏幕坐标。

在顶点着色器中，三次矩阵坐标变换如下图：

```
{\n"
" gl_Position = projection * view * model * vec4(aPos.x, aPos.y, aPos.z, 1.0f);\n"
    //这里我们还要注意的是，这个地方还没有乘上如model view projection矩阵
```

三、纹理映射

如图，可以对各个物体表面添加纹理图案。

1.纹理坐标

以正方体为例，对于一个正方体的 OpenGL 渲染过程中，每一个面由两个等腰直角三角形构成，且两个三角形斜边的两点相同。进入顶点着色器渲染前，需要定义这个正方形的顶点坐标、纹理属性。

```
// 后面
// -----位置-------   --纹理坐标--
-0.5f, -0.5f, -0.5f,  0.0f, 0.0f,
 0.5f, -0.5f, -0.5f,  1.0f, 0.0f,
 0.5f,  0.5f, -0.5f,  1.0f, 1.0f,
 0.5f,  0.5f, -0.5f,  1.0f, 1.0f,
-0.5f,  0.5f, -0.5f,  0.0f, 1.0f,
-0.5f, -0.5f, -0.5f,  0.0f, 0.0f,
```

如图所示，每行代表一个顶点的所有属性值，前三个我们定义为位置属性 xyz 坐标，后面两个定义为纹理坐标属性。纹理坐标与顶点坐标需要有一一对应的关系。2D 纹理坐标是在 x 和 y 坐标上与顶点坐标对应。例如上图 6 行全为处于局部空间后面的顶点，而第一行顶点坐标值表示这个面的左下角，故纹理坐标（x、y 均从 0 开始计数）也是对应的左下角。其他顶点以此类推，需要对每一个坐标做一个纹理坐标的一一映射。当然，如果形状比较复杂的物体，其顶点坐标与纹理坐标的映射关系需要具体使用函数来实现，此处为了使得后续着色器中光照的实现更方便，故使用简单正方体，直接手工标注即可。

2.纹理映射与顶点着色器

步骤一：创建、绑定纹理对象

```
// 产生纹理对象(也是通过ID引用的！)
unsigned int texture;
glGenTextures(1, &texture); //  参数一：
// 绑定纹理对象
glActiveTexture(GL_TEXTURE0); // 在绑定纹
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, texture);
```

通过 ID 引用，使用 glGenTexures 函数生成纹理对象；绑定纹理对象使用 glBindTexture。在绑定对象之前，可能需要激活纹理单元，这与是否有多个纹理对象有关。

然后为当前绑定的纹理对象设置环绕、过滤方式。

```
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S, GL_REPEAT);
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_T, GL_REPEAT);
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MIN_FILTER, GL_LINEAR_MIPMAP_
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL_LINEAR);
```

上图前两行表示纹理环绕方式设置。表示当纹理坐标设置在 0,0 到 1,1 范围之外时，分别绕着 S、T 轴（类似于 X、Y 轴）进行重复纹理。后两行表示图像进行放大和缩小时可以设置纹理过滤，通常有线性过滤、临近过滤等方式。在此处第三行表示设置当纹理被缩小时生成多级渐远纹理，根据距离远近调整解析度。

步骤二：导入纹理图片并生成纹理

```
// 纹理图片导入
int width, height, nrChannels;
unsigned char *data = stbi_load("merry_christmas_mr_Lawrence.jpg", &width, &height, &nrChannels, 0);
// stbi_set_flip_vertically_on_load(true);
// 生成纹理
if (data)
{// 如果load成功了texture
    // 现在纹理已经绑定了，我们可以使用前面载入的图片数据生成一个纹理了。纹理可以通过glTexImage2D来生成：
    // para1:指定纹理目标，设置为2D意味着会生成与当前绑定的文理对象在同一个目标上的纹理
    // para2:为纹理指定多级渐远纹理的级别。可以单独手动设置多个级别。0为基本级别
    // para3:告诉OpenGL我们希望把纹理处理为什么格式。
    // para4、5:设置最终的纹理宽度和高度。由于之前加载图像的时候就保存了它们，故使用对应的变量
    // para6:总是设为0；para7、8:定义了源图的格式和数据类型，我们使用RGB值加载这个图像，并把它们存储为char(byte)数组，我
    // 最后一个参数是真正的图像数据。
    glPixelStorei(GL_UNPACK_ALIGNMENT, 1);
    glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, GL_RGB, width, height, 0, GL_RGB, GL_UNSIGNED_BYTE, data);
    // 下面这个函数可以在生成纹理后调用，作用是为当前绑定的纹理自动生成所有需要的多级渐远纹理
    glGenerateMipmap(GL_TEXTURE_2D);
}
```

使用了 stbi_load 库来将图片作为纹理样本。glTexImage2D 能够将图片数据生成一个纹理，glGenerateMipmap 能够实现上述的多级渐远纹理。

步骤三：渲染时送入着色器处理

```
// 绑定纹理，自动把纹理赋给片段着色器的采样器
glActiveTexture(GL_TEXTURE0); // 在绑定纹理之前先激活纹理单元
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, texture);
```

渲染时，需要如上图进行激活纹理单元并绑定对应的纹理对象，绑定后自动送入对应纹理单元的片段着色器的输入参数中。

```
"uniform sampler2D ourTexture;\n"    // 二维纹理采样器
```

在片段着色器中，我们将之前的纹理对象作为二维纹理采样器。我们在片段着色器对输入的片段进行色彩生成时，还需要使用从顶点着色器送来的纹理坐标。

```
TexCoord = vec2(aTexCoord.x, aTexCoord.y);\n"    // 为了有纹理图案
```

然后在片段着色器中使用内置的 texture 函数进行纹理采样，即得到纹理图案。

```
texture(ourTexture, TexCoord)
```

四、Phong、Blinn-Phong 光照

1.Phong 光照理解与实现

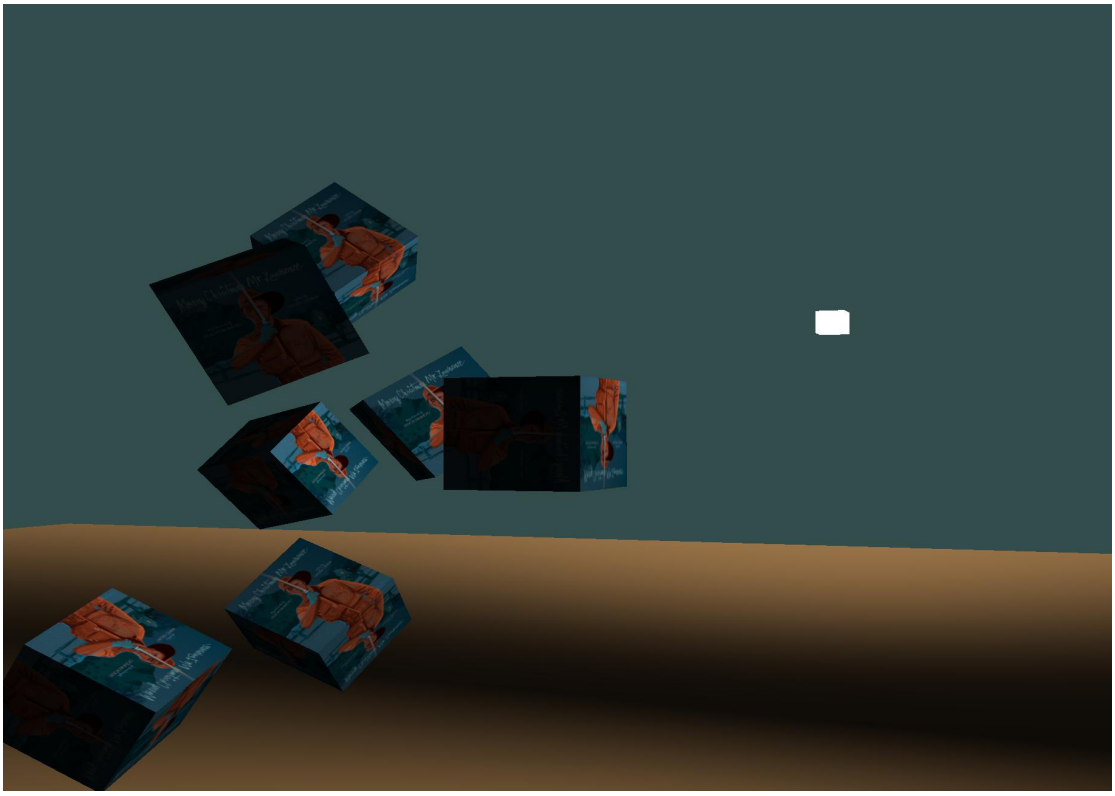
常见的光照模型 Phong 和 Blinn-Phong 光照的实现思路主要都产生于光的反射这个基本常识。

Phong 光照由环境光、漫反射、镜面光照构成。

（1）环境光：周围环境本身会反射微弱的均匀的光。一般来说，环境光的大小受周围环境材质、光照强度等因素有关，是许多分散的不同光源的共同作用产生的。由于全局光照实现起来较为困难，在片段着色器中，以一定常量比例均匀弱化该空间内的光线亮度。

```
//  环境光光照ambient
//  定义环境光强度为0.1，较小的值以模拟环境的微光
" float ambientStrength = 0.1;\n"
" vec3 ambient = ambientStrength * lightColor;\n"
```

其效果如下图，可以看到，在完全背离光的面上仍然会有一点点亮度，这就是环境光的作用。



（2）漫反射光照

漫反射基本思路是计算物体表面的片段对应的法向量与光线方向夹角，夹角越小则说明该片段能够获得更多的亮度。因此计算的核心就是计算片段的法向量和光线的夹角。

之前我们定义了正方体作为物体，就是因为此处漫反射需要计算每一个片段的法向量较为复杂，为了尽可能简化法向量的计算而将精力集中在光照的实现上，我们可以在定义正方体的顶点集合时新增顶点的属性，即该顶点所在面的法向量。例如下图：

```
// 后面
// -----位置-------    --纹理坐标-- ---手工指定的法向------
-0.5f, -0.5f, -0.5f,  0.0f, 0.0f,  0.0f,  0.0f, -1.0f,
 0.5f, -0.5f, -0.5f,  1.0f, 0.0f,  0.0f,  0.0f, -1.0f,
 0.5f,  0.5f, -0.5f,  1.0f, 1.0f,  0.0f,  0.0f, -1.0f,
 0.5f,  0.5f, -0.5f,  1.0f, 1.0f,  0.0f,  0.0f, -1.0f,
-0.5f,  0.5f, -0.5f,  0.0f, 1.0f, 0.0f,  0.0f, -1.0f,
-0.5f, -0.5f, -0.5f,  0.0f, 0.0f,  0.0f,  0.0f, -1.0f,
```

对于正方体的后面，若定义法向方向均为从物体内部指向表面以外，则其法向方向是沿 z 轴负半轴。标准化的法向长度为 1。

获得法向后，要计算光线，使用两点坐标之差即为一个向量的方法，再通过标准化，获得光线的单位方向向量。定义光源在世界坐标系中的坐标为全局变量三维坐标：

```
// 光源在世界坐标的位置（平移向量）
glm::vec3 lightPos(0.5f, 1.0f, 2.0f);
```

计算光线方向，是指的从片段到光源的方向。

```
//  漫反射光照diffuse: 取决于法向+光向
//  首先计算片段到光源的方向 与 片段表面的法向量的夹角
" vec3 normal_dir = normalize(NormalVec);\n"    // 对法线方向进行标准化
" vec3 light_dir = normalize(lightPosition - FragPosition);\n"  // 从片元到发光点的向量标准化
```

然后使用单位向量点积，表示漫反射的强弱。因为点积越大则说明两个向量夹角越趋近于 0，则光应该最大。我们通过标准化得到的单位向量再内积，是为了直接得到漫光照的强度比例因子。同时考虑到可能内积为负的情况，即光线根本不会反射的情况，所以要剪去这部分负值。进而得到了漫反射光的强度。

```
    // 用单位向量点积来表示漫反射强弱，范围为[-1,1]
    // 如果点积结果为负，表示光线本应该照不到片段表面，应该舍弃
" float diffStrength = max(dot(normal_dir, light_dir), 0.0f);\n"
" vec3 diffuse = diffStrength * lightColor;\n"
```

需要注意的是，由于我们之前定义的正方体可能会在顶点着色器中对其进行 model 变换，在这种情况下法线方向也是有变化的。但是向量直接进行 model 变换是不能得到正方体进行旋转后得到的法向。针对这个问题，通过查阅资料，得到了一个证明结论：**如果在 model 变换阶段不进行缩放操作的话，那么 model 这个 4*4 矩阵仅需要求逆再求转置，然后与法向向量的 4 元向量进行乘积，得到的就是法向在物体进行了 model 变换后的方向。**在顶点着色器中需要这样操作：

```
" NormalVec = vec3(transpose(inverse(model)) * vec4(aNormalVec, 1.0f));\n" //
```

（3）镜面反射

镜面反射除了需要考虑光线方向、片段表面/法线方向，还需要考虑视线方向。如果视线方向与光线经过正反射得到的方向相同的话，则反射光强度最大。而镜面反射还与光源、物体片段本身属性有关，这个将用一个常量参与数学计算来表示其意义。我们定义这个镜面反射常量为 128。这个常量能够很好地表现出镜面反射的特点。下面计算方向：

首先，计算反射光线：根据光线方向和法线方向，用 OpenGL 内置函数 reflect 计算反射方向。

```
" vec3 reflect_dir = reflect(-light_dir, normal_dir);\n"
```

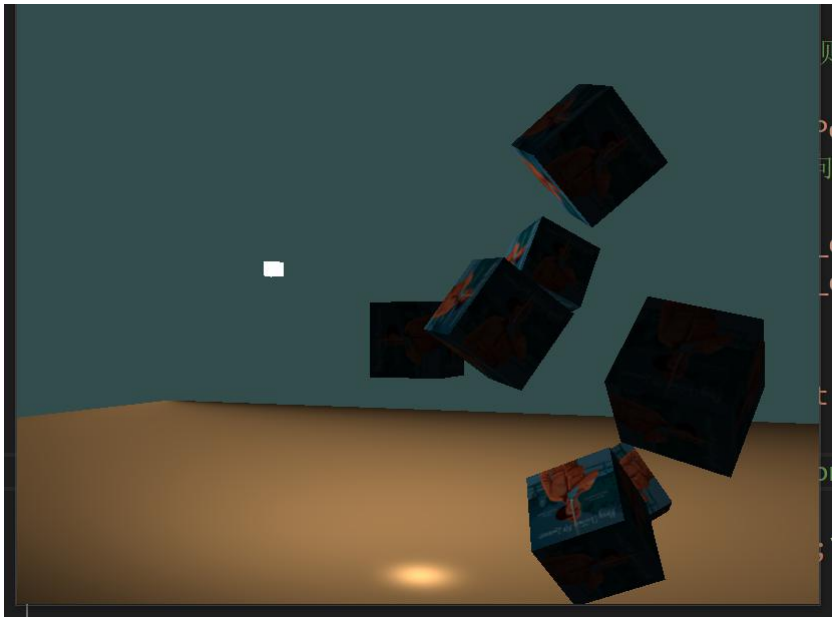
其次，视线方向：

```
//  计算片段到的视角方向
" vec3 view_dir = normalize(viewPosition - FragPosition);\n"
```

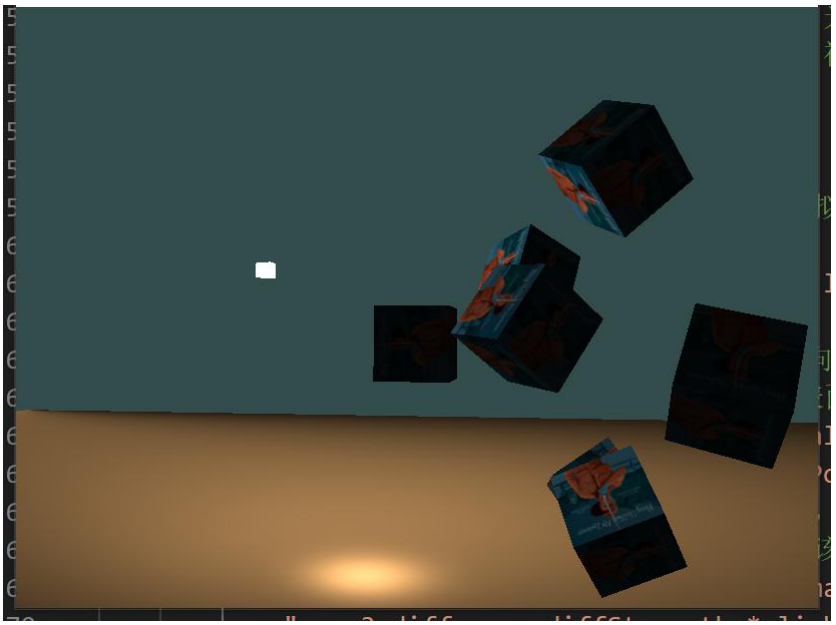
最后，与漫反射一样，用标准化的方向的内积作为反射光强比例因子，并保留非负部分。

```
//  普通冯氏光照
// " float specularStrength = specularStrengthConst * pow(max(dot(view_dir, reflect_dir), 0.0f), Shininess);\n"
```

冯氏光照效果如下：



可以看到，普通的冯氏光照在地面上镜面反射光十分明显。下面将调整参数，进一步观察规律。



与第一张图（镜面反射常量为 128）相比，第二张图（常量为 32）的镜面反射区域强烈程度下降，光线更加柔和。

2.Blinn-Phong 光照

当 Phong 光照反光度很低时，会出现断层现象。主要问题是 Phong 算法计算镜面反射的时候，当光源在视角以下时，镜面反射的光线为 0，而其他反光度又无法补充，所以会出现很黑的情况。

为了解决这个问题，Binn-Phong 方法使用半程向量与法向的夹角取代反射光线与视线的夹角。半程向量是一个单位向量，其方向是光线方向和观察向量的中线方向。其计算可以由光线方向和观察向量相加（因为都是单位向量，相加后结果即为中线方向），再标准化，得到半程向量。如下图：

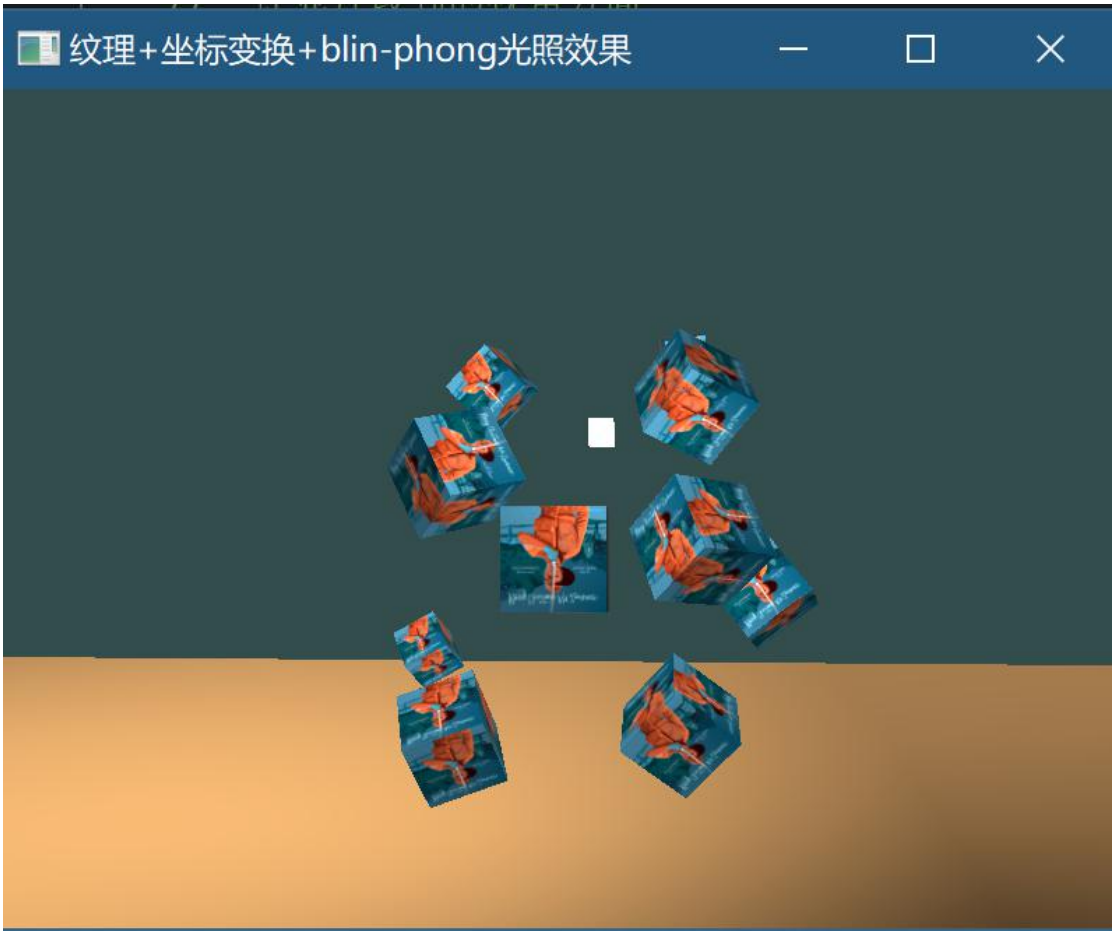
```
" vec3 halfway_dir = normalize(light_dir + view_dir);\n"
```

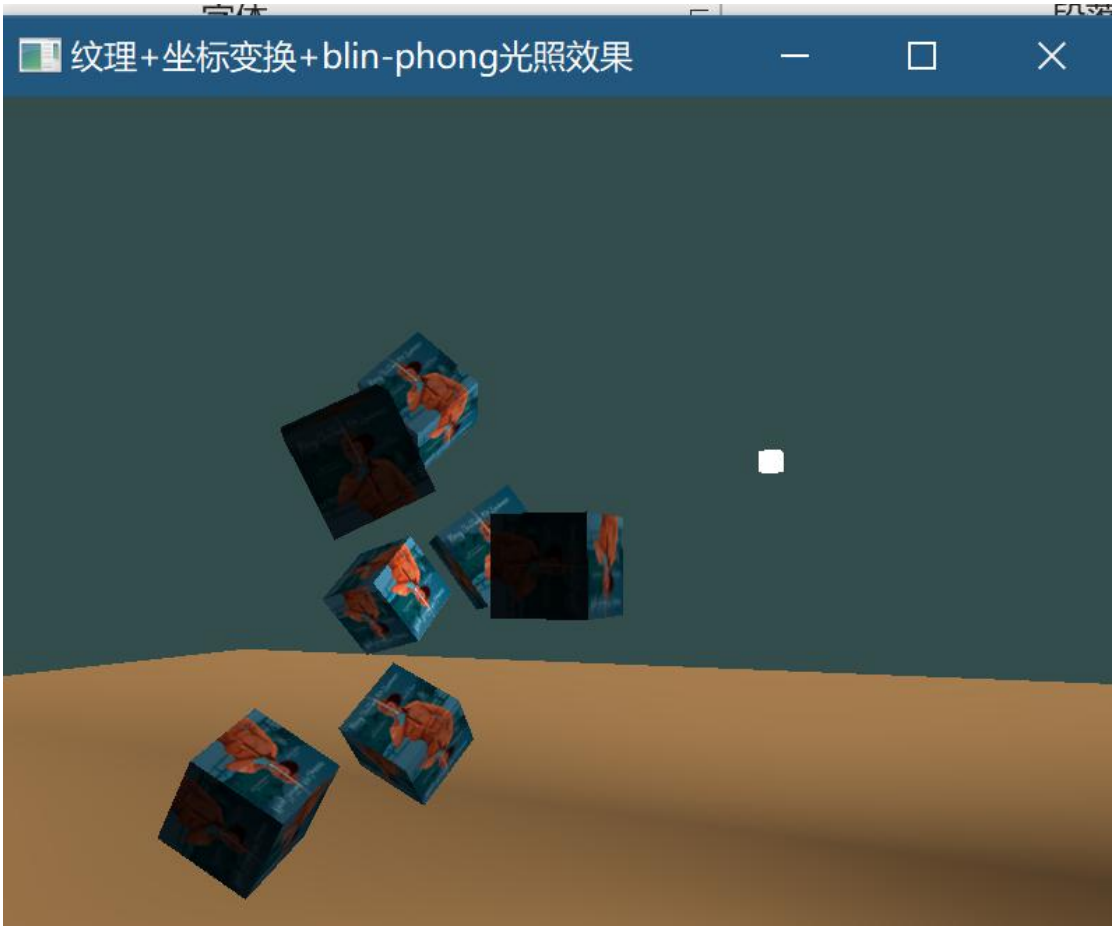
```
//  blinn-phong光照
" float specularStrength = specularStrengthConst * pow(max(dot(view_dir, halfway_dir), 0.0f), Shininess);\n"

" vec3 specular = specularStrength * lightColor;\n" // 镜面高光
```

最后，将三种类型的光组合起来，得到光照效果。

```
// 将三个光源的光相加得到总光源
" vec3 result = (ambient + diffuse + specular);"
// 计算总光照下的纹理显示
" FragColor = vec4(result, 1.0f) * texture(ourTexture, TexCoord) * vec4(objectColor, 1.0f);\n"
```





五、阴影映射

1.阴影映射的理解

以光源的视角看物体，一条光线射线上的最近片段可以被看见，其他片段均在阴影中。核心是找到从光线视角出发的各点的深度关系。主要由两步构成，第一步是渲染深度贴图，第二步是将生成的深度贴图用来判断是否某个片段是否应该处于阴影之中。

2.深度贴图

从光的透视图里面可以渲染出深度纹理。而这个纹理不包含颜色信息，仅包含深度值。具体操作时需要创建 2D 纹理对象 depthMap，然后提供给帧缓冲的深度缓冲使用。

```
GLuint depthMap;    // 2D纹理对象，深度映射
glGenTextures(1, &depthMap);
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, depthMap); // 绑定纹理对象

// ***核心：因为只关心深度值，所以纹理格式要设定为GL_DEPTH_COMPONENT
glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, GL_DEPTH_COMPONENT, // 1.目标为2D贴图；2.纹理格式要设定为GL_DE
// 5.纹理格式要设定为GL_DEPTH_COMPONENT，  6.数据类型为float
             SHADOW_WIDTH, SHADOW_HEIGHT, 0, GL_DEPTH_COMPONENT, GL_FLOAT, NULL);
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MIN_FILTER, GL_NEAREST);  // 近邻过滤
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL_NEAREST);
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S, GL_REPEAT);
glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_T, GL_REPEAT);

// 将上面生成的深度纹理 作为 帧缓冲的深度缓冲
glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, depthMapFBO); // 绑定帧缓冲对象到指定位置
glFramebufferTexture2D(GL_FRAMEBUFFER, GL_DEPTH_ATTACHMENT, GL_TEXTURE_2D, depthMap, 0);
glDrawBuffer(GL_NONE);  // 读缓冲：显式地告诉OpenGL不去渲染颜色数据
glReadBuffer(GL_NONE);  // 绘制缓冲：不去绘制颜色
glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, 0);
```

然后，在渲染阶段，我们需要首先渲染深度纹理贴图。由于这一步需要以光源为视角，所以需要计算世界坐标到光源坐标的变换矩阵。具体又分为计算光源的投影矩阵和光源作为视角的 View 矩阵。

```
// 计算世界空间->光源视角的裁剪空间的变换矩阵：先view再proj
// 1.首先，使用正向投影，所以正交投影矩阵
GLfloat near_floor = 1.0f, far_floor = 17.0f;
    // 光源的投影矩阵
glm::mat4 lightProjection = glm::ortho(-10.0f, 10.0f, -10.0f, 10.0f, near_floor, far_floor);
// glm::mat4 lightProjection = glm::perspective(glm::radians(90.0f), (float)SHADOW_WIDTH / (f
    // 利用lookAt函数生成view矩阵
glm::mat4 lightView = glm::lookAt(lightPos, glm::vec3(0.0f), glm::vec3(0.0f, 1.0f, 0.0f));
    // 从世界坐标转换到光源向外投影裁剪的复合变换矩阵
glm::mat4 lightSpaceMatrix = lightProjection * lightView;
```

渲染深度纹理贴图需要构建新的着色器：

顶点着色器：主要进行位置变换到光空间中。（片段着色器无操作）

```
// 深度贴图着色器：将顶点渲染到以光源为camera视角的着色器
const char *depthVertexShaderSource = "#version 330 core\n"
                                      "layout (location = 0) in vec3 position;\n"
                                      "uniform mat4 lightSpaceMatrix;\n"
                                      "uniform mat4 model;\n"
                                      "void main()\n"
                                      "{\n"
                                      "gl_Position = lightSpaceMatrix * model * vec4(position, 1.0f);\n"
                                      "}\n\0";
```

在渲染了深度纹理贴图后，要使用原来的渲染物体的着色器来渲染立方体和地面。

```
glUseProgram(depthShaderProgram);
// 第一步，启用对场景的第一个着色程序即 深度着色器
GLint lightSpaceMatrixLocation = glGetUniformLocation(depthShaderProgram, "lightSpaceMatrix");
// 第二步，将前面已经计算得到的光源变换矩阵，传入深度着色器
glUniformMatrix4fv(lightSpaceMatrixLocation, 1, GL_FALSE,  glm::value_ptr(lightSpaceMatrix));
// 第三步，设置屏幕控制空间显示的大小（裁剪空间）
// 因为阴影贴图经常和我们原来渲染的场景（通常是窗口分辨率）有着不同的分辨率，我们需要改变视口（viewport）
glViewport(0, 0, SHADOW_WIDTH, SHADOW_HEIGHT);
// 第四步，绑定深度缓冲对象到指定位置
glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, depthMapFBO);
// 第五步，清除之前的深度信息
glClear(GL_DEPTH_BUFFER_BIT);
// something

// 第六步，渲染立方体+地板
glBindVertexArray(VAO);
// 渲染10个正方体
for(unsigned int i = 0; i < 10; i++)
{
    // 各个正方体先创建model矩阵
    glm::mat4 model = glm::mat4(1.0f);
    model = glm::translate(model, cubePositions[i]);    // 平移
    float angle = 20.0f * i;
    model = glm::rotate(model, glm::radians(angle), glm::vec3(1.0f, 0.3f, 0.5f));   // 旋转
    int modelLoc = glGetUniformLocation(shaderProgram, "model");
    glUniformMatrix4fv(modelLoc, 1, GL_FALSE, glm::value_ptr(model));

    // 画一个正方体
    glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, 36);
}
```

```
// 画地板
model = glm::mat4(1.0f);    // 画地板的时候也要注意，这个地方需要把模型变换矩阵给保持不变
// view和projection都需要保持不变，因为这是在camera的视角下的！
int modelLoc_floor = glGetUniformLocation(shaderProgram, "model");
glUniformMatrix4fv(modelLoc_floor, 1, GL_FALSE, glm::value_ptr(model));
glBindVertexArray(floorVAO);
glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, 6);

// 第七步，清空Framebuffer
glBindFramebuffer(GL_FRAMEBUFFER, 0);
```

而渲染正方体和地面的顶点着色器需要传入变换到光空间的矩阵，并输出片段在光空间的坐标。

```
"#version 330 core\n"  //这个地方是3.3版本核心模式，所以设置为330core即可
"layout (location = 0) in vec3 aPos;\n"
"layout (location = 1) in vec2 aTexCoord;\n"
"layout (location = 2) in vec3 aNormalVec;\n"
"out vec2 TexCoord;\n"     // 传给片段着色器纹理坐标
"out vec3 FragPosition;\n"     // 计算并传给片段着色器，该片段所在的世界坐标
"out vec3 NormalVec;\n"    // 传给片段着色器法线方向
"out vec4 FragPosLightSpace;\n"    // 将世界坐标系下的坐标转化到光源视角下
"uniform mat4 model;\n"
"uniform mat4 view;\n"
"uniform mat4 projection;\n"
"uniform mat4 lightSpaceMatrix;\n"
"void main()\n"
"{\n"
" gl_Position = projection * view * model * vec4(aPos.x, aPos.y, aPos.z, 1.0f);\n" //顶点着色器首先要传出去的必须是位置
   //这里我们还要注意的是，这个地方还没有乘上如model-view-projection矩阵。
   //如果有需要，需要乘这个矩阵。 另外，我们将vec3再加上1，是为了形成四元表示
" TexCoord = vec2(aTexCoord.x, aTexCoord.y);\n"    // 为了有纹理图案
" FragPosition = vec3(model * vec4(aPos, 1.0f));\n"    // 有了顶点坐标，那么根据该顶点的四元坐标进行Model变换即可得到世界
" NormalVec = vec3(transpose(inverse(model)) * vec4(aNormalVec, 1.0f));\n" // 传递给片段着色器予以处理漫反射光照
// 因为仅包含平移和旋转，这种条件下可以根据法线矩阵定理使用model的逆的转置并取其前3*3子矩阵进行操作
" FragPosLightSpace = lightSpaceMatrix * vec4(FragPosition, 1.0f);\n"
"}\0";
```

而片段着色器中需要传入刚刚得到的片段的光空间坐标。这个光空间坐标的作用是获取这个坐标的深度 z。将该片段的深度 z 与之前渲染得到的深度纹理贴图（本质还是深度）映射值进行比较。若该片段深度比相同的屏幕空间 x,y 的最近深度更大，说明该

片段不应显示，而是在阴影之中。若在阴影之中，可以设置阴影变量，进而控制漫射光、镜面反射光等。

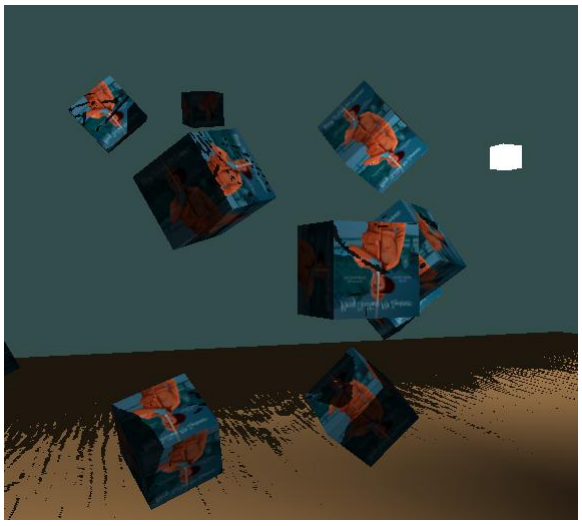
```
"vec3 coords = FragPosLightSpace.xyz / FragPosLightSpace.w;\n"
    // 再将coords线性映射到0,1之间
    "coords = coords * 0.5 + 0.5;\n"
    // 取得跟当前片段相同的xy对应的最近点的深度(使用[0,1]范围下的fragPosLight当坐标)
    "float closestDepth = texture(shadowMap, coords.xy).r;\n"
    // 得到当前片段在光空间（光源的视角下的深度值）
    "float depth = coords.z;\n"
    // 比较最近点和当前片段的深度

    "if(depth > closestDepth)\n"    // 不是最近点，则返回shadow=1
    "{\n"
    "    shadow = 1.0f;\n"
    "}\n"
    "else\n"
    "{\n"
    "    shadow = 0.0f;\n"
    "}\n"
```

计算获取阴影的代码如上。其中第一行意思是进行透视除法，这对透视投影来说是必须的，目的是让 w 位于-1 到 1 之间。

获得了阴影之后，就可以设置阴影值对光源光照的影响。

```
// 将三个光源的光相加得到总光源    1-shadow表示若shadow越大，则光照影响越小
" vec3 result = (ambient + (1.0f - shadow) * (diffuse + specular));\n"
// 计算总光照下的纹理显示
" FragColor = vec4(result, 1.0f) * texture(ourTexture, TexCoord) * vec4(objectColor, 1.0f);\n"  // 使用GLSL内建的t
```



阴影的效果图

六、展望与改进

在纹理映射方面需要尝试更多的纹理环绕方式、过滤方式，以获取更加美观、真实的效果。

光照部分不足之处有：1.环境光照由于没有设置真实环境下各个光源的计算，而是设置常量一笔带过，不够真实。2.整个光照部分仅考虑了反射角、观察角等而没有考虑光源距离带来的光照明亮度影响。

阴影映射的效果不好，其中比较核心的部分是深度纹理映射的投影矩阵的生成，难点在于要根据自己设定的形状、位置，来调整生成 lightProjection 矩阵的参数，如平截头体的左右坐标、顶部底部坐标、远近平面。因为这里使用的是定向投影，而没有用透视投影，可能因此地面、部分正方体等阴影效果并不是很好。可以进一步改进。