مقدمه ای بر گرافیک کامپیوتر

احمد منصوری و **peter shirley**

December 21, 2009

چکیده

همزمان با پیدایش کامپیوتر ها، تلاش ها برای بهره بردن از توان آنها برای ابزار های Visualize و دیگر ابزار ها برای استفاده از این قابلیت در زمینه های نظامی، فیلم و انیمیشن، شبیه سازی و بازی سازی شروع شد، این ابزار ها یا به صورت اختصاصی برای استفاده در صنایع خاص طراحی می شوند یا به صورت عمومی تر برای کاربرد های وسیع تری طراحی و توسعه می یابند. طراحی و پیاده سازی موتور های گرافیکی به صورت کلی دارای پایه ها و دانشی یکسان از نحوه کار پردازنده ها و ریاضیات است.

فهرست مطالب

بخش اول

گرافیک

مقدمه

در بخش اول به معرفی و توضیح قسمت های مربوط به تصویر در پروژه می پردازم، این قسمت از موتور مسئولیت دریافت مدل های سه بعدی و اطلاعات مربوطه(**Textures**, **Normals**, **geometry**, ...) و نمایش آن ها در صفحه را برعهده دارد، در این قسمت ما با استفاده از ریاضیات مدل ها را در فضای سه بعدی شبیه سازی می کنیم.

تمامی ابزار های استفاده شده در این قسمت، در طول فصول و متناسب با بخشی که از آن ها استفاده شده معرفی می شوند.

هر فصل در این بخش مستقیما مربوط به یکی از قسمت های موتور در بخش گرافیک است، ابتدای هر فصل فایل های مربوطه به آن فصل ذکر خواهند شد.

فصل ۱

Renderer

پنجره ها و کانتکست ها

openGL

OpenGL یک ***api*** چند زبانه و کراس پلتفرم است که برای به تصویر کشیدن تصاویر دو بعدی و سه بعدی با استفاده از بردار ها اسفاده می شود، معمولا از ***OpenGL*** برای برقراری ارتباط با واحد پردازش گرافیکی ***GPU*** و بهره بردن از سرعت سخت افزار مخصوص برای رندر استفاده می شود.

همچنین *api* های دیگری نیز برای استفاده از قدرت سخت افزاری و پردازنده گرافیکی وجود دارند *Vulkan* نیز مانند *openGL* چند زبانی و چند سکویی است، *DirectX* به صورت انحصاری توسط مایکروسافت توسعه می یابد و در سیستم عامل ویندوز استفاده می شود ، شرکت **Apple** از *api* اختصاصی خود به نام *Metal* به صورت انحصاری پشتیبانی می کند، دلیل انتخاب*openGL* در این پروژه چندسکویی بودن و ساختار ساده تر برای پروژه های آموزشی در زمینه *real-time rendering* می باشد.

نباید *OpenGL* را با یک کتابخانه*(library)* اشتباه گرفت، **OpenGL** به صورت یک interface و یک قراداد انتزاعی در ورژن های مختلف ارائه می شود که فروشندگان و سازندگان*(vendor)* مختلف باید پیاده سازی ای منطبق با این قرارداد را انجام دهند. پس از نصب درایور مربوط به پردازنده گرافیکی، برنامه نویس قابلیت دسترسی به تابع های مختلف که توسط *vendor* پیاده سازی شده را خواهد داشت. برای استفاده از *OpenGl* نیاز به ابزار های دیگری نیز داریم، ابتدا نیاز داریم که یک *window* و یک *context* تعریف کنیم، برای این کار از **GLFW** استفاده می کنیم.

GLFW

یک کتابخانه برای ساختن *window* و *context* ها برای *openGL, openGL ES, Vulkan* است، این کتابخانه به زبان **C** نوشته شده و *binding* های مختلف آن به زبان های مختلف موجود است، این کتابخانه همچنین توانایی کنترل کردن ورودی های مختلف مثل *keyboard, mouse, joystick* را داراست، ما برای استفاده از *openGL* نیاز به این کتابخانه یا مشابه آن داریم زیرا openGL هیچگونه قابلیت پیشفرضی برای مدیریت window یا context ها یا مدیریت input ندارد. همچنین GLFW یک کتابخانه چندسکویی است و می توانیم آن را در سیستم عامل های مختلف استفاده کنیم، پروژه من نیز چندسکویی است، پس می توانیم از این کتابخانه سبک و چندسکویی استفاده کنیم. windows، پنجره ای است که GLFW به وسیله امکانات فراهم شده در سطح سیستم عامل برای ما فراهم می کند، همچنین یک context را می توانیم به عنوان یک شئ در نظر بگیریم که تمامی اطلاعات openGL را به همراه دارد، اطلاعاتی مانند state و framebuffersها . برای کنترل کردن ورودی ها، glfw از دو روش استفاده می کند، برای ورودی*mouse* از callback function ها استفاده می کند، اما برای ورودی keyboard می توانیم از تابع های کتابخانه استفاده کنیم و به صورت مستقیم ورودی را دریافت کنیم.

حالا که به window و context دسترسی داریم، باید دسترسی به تابع های opengl فراهم کنیم، برای این کار از **GLAD** استفاده می کنیم.

شکل ۱.۱: *glfw logo*

GLAD

کتابخانه ای برای *load* کردن pointer ها به توابع opengl در هنگام runtime. این کتابخانه یکی از کتابخانه هایOpenGL Loading Library است، برای کار با opengl ما حتما باید یکی از این کتابخانه هارا مورداستفاده قرار دهیم تا بتوانیم به توابع opengl دسترسی داشته باشیم، این کتابخانه ها هم ویژگی های Core که توسط opengl مشخص شده را load می کنند و هم ویژگی های extension که توسط Vendor ها به پیاده سازی آن ها از opengl اضافه شده، علاوه بر این دیگر نیازی به اضافه کردن فایل های مربوط به opengl نیست و این فایل ها به صورت خودکار همه موارد را تنظیم می کنند. Glad یک generator است که براساس پارامتر هایی که کاربر انتخاب می کند یک فایل حاوی تمامی تعریف های مربوط به constant و تابع ها و ... به ما ارائه می کند، بعد از دانلود این فایل و اضافه کردن به آن به پروژه از طریق کد زیر می توانیم تمامی opengl function poiter هارا در runtime بارگزاری کنیم.

برنامهٔ ۱.۱: *load opengl function pointer*

```
// glad: load all OpenGL function pointers
// ---------------------------------------
if (!gladLoadGLLoader((GLADloadproc)glfwGetProcAddress))
{
    std::cout << "Failed to initialize GLAD" << std::endl;
}
```

پس از ساختن پنجره و context و بارگزاری توابع، حالا آماده استفاده از openGL هستیم.

تصویر کردن داده ها

Vertex Data

برای *render* کردن تصاویر نیاز به اطلاعاتی داریم، با مثلث شروع می کنیم، مثلث در گرافیک کامپیوتری جایگاه ویژه ای دارد، مثلث ساده ترین شکلی است که تشکیل سطح میدهد، برای رسم کردن یک مثلث در صفحه نیاز سه نقطه داریم، با متصل کردن این سه نقطه به یکدیگر مثلث ساخته می شود، برای رسم مثلث در opengl نیز شرایط به همین شکل است، ما نیاز به سه نقطه داریم، تفاوت این نقاط با نقطه های روی صفحه در ابعاد آن است، تقاط روی صفحه دوبعدی بودند، opengl نقاط را به صورت سه بعدی دریافت می کند، هر کدام از این نقاط متشکل از سه مقدار برای *x, y,z* هستند، این نقاط را می توان به صورت بردار هایی در *Normalized Device Coordinates* نمایش داد، یک بردار در NDC را به شکل رو به رو نمایش می دهیم:

$$\vec{P} = (x, y, z)$$

مقادیر x, y, z در این مختصات باید بین $[-1, +1]$ باشند، اگر مقداری خارج از این بازه باشد بر روی صفحه قابل مشاهده نیست. هر کدام از این نقاط را یک *Vertex* می نامیم.

بسته به درخواستی که از opengl می کنیم، نحوه برخورد با این نقاط و در نتیجه نحوه به تصویر کشیدن این نقاط روی صفحه تغییر می کند،به عنوان مثال می توانیم با این نقاط به شکل مثلث، نقطه یا خط و اشکال دیگری برخورد کنیم.

برای برقراری ارتباط با opengl از زبان برنامه نویسی *C* استفاده می کنیم، برای رسم کردن مثلث در این مرحله آرایه زیر را تعریف می کنیم:

برنامهٔ ۲.۱: *points for a triangle*

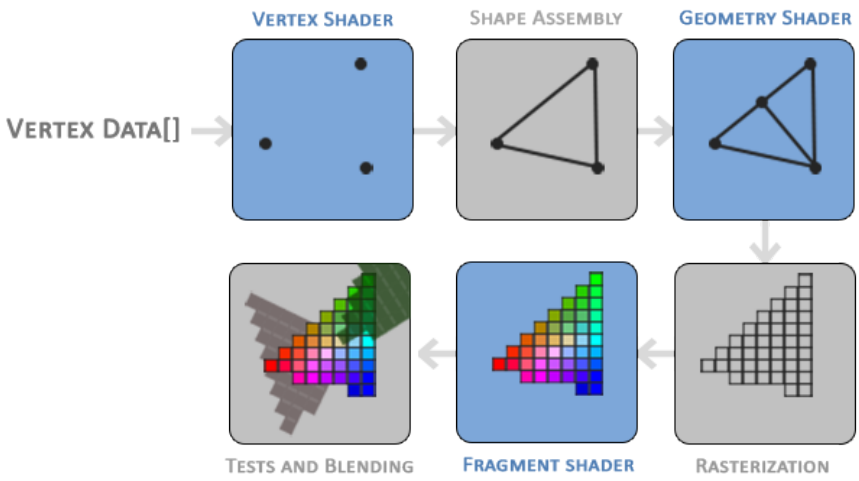
```
float vertices[] = {
    // x   ,  y,     z
    -0.5f, -0.5f, 0.0f, //p1
     0.5f, -0.5f, 0.0f, //p2
     0.0f,  0.5f, 0.0f  //p3
};
```

در قطعه کد بالا از ۹ عدد که همگی در بازه مشخص شده برای NDC هستند استفاده کردیم، توجه کنید که اعداد در یک آرایه و یه صورت پشت سر هم به برنامه داده شده اند، هیچگونه جداسازی یا طبقه بندی بر اساس نقاط مختلف صورت نگرفته و همچنین این مقادیر هنوز بر روی Gpu آپلود نشده اند، دسته بندی کردن این اطلاعات خام و آپلود بر روی Gpu در دو فصل بعد شرح داده خواهد شد. آرایه ای که تعریف کردیم تنها شامل مختصات نقاط مثلث بود، ما می توانیم هر گونه اطلاعاتی را به همین صورت در این آرایه اضافه کنیم و دسته بندی آن ها را مشخص کنیم و از آنها استفاده کنیم، برای مثال می توانیم اطلاعات مربوط به Color, Normal, Texture Coordinate, ... را اضافه کنیم.

برای آپلود کردن داده ها بر روی پردازنده گرافیکی راه های مختلفی بسته به نیاز های مختلف وجود دارد، در بخش های بعدی چند نوع از این روش هارا می بینیم، برای تعریف کردن اطلاعاتی که باید بر روی Gpu آپلود شود باید آن ها را در برنامه های به نام Shader ها مشخص کنیم، در بخش بعدی درباره این برنامه ها صحبت می کنیم.

Shaders

کارت های گرافیک امروزی، تشکیل شده از تعداد بسیار زیادی از هسته های پردازشی هستند که وظیفه اجرای برنامه های کوچکی به نام *Shader* ها را بر عهده دارند.
Shader ها بیانگر Graphic Pipeline بر روی کارت های گرافیک هستند، این ابزار به ما قابلیت کنترل و کدنویسی هر کدام از این مراحل را می دهند، بر روی کارت گرافیک های امروزی تمامی shader ها به جز دو نوع از آن ها به صورت پیشفرض وجود دارد، این دو Vertex shader و Fragment shader هستند که حتما باید توسط برنامه نویس به کارت گرافیک داده شوند.



شکل ۲.۱: Graphic pipeline: from learnopengl.com

به طور کلی وظیفه *Vertex Shader* انتقال یک نقطه از فضای NDC به فضای دیگر است، غالبا این فضا همان جهان بازی یا برنامه سه بعدی است، برای Transform کردن فضای بازیبه فضایی دیگر از ماتریس ها استفاده می شود، به طوری که هر فضا دارای یک Transformation Matrix است، برای رسم کردن مثلث ما نیازی به تغییر فضا نداریم و در NDC ادامه می دهیم. یک Vertex shader ساده به صورت زیر است:

برنامهٔ ۳.۱: *basic vertex shader*

```
#version 330 core
layout (location = 0) in vec3 aPos;

void main()
{
    gl_Position = vec4(aPos.x, aPos.y, aPos.z, 1.0);
}
```

کد بالا ساده ترین مدل برای استفاده از vertex shader است، این کد به زبان GLSL(OpenGL Shading Language) نوشته شده است، در خط اول ما نوع ویژگی ها را که پیش تر توضیح داده بودیم را مشخص کرده ایم، خط ۲ یک متغیر از نوع vec3 به اسم aPos تعریف کرده ایم، با استفاده از *layout (location = 0)* در این خط مشخص کرده ایم که این متغیر در حافظه در چه موقعیتی قرار میگیرد، این ویژگی برای وقتی که بخواهیم مقادیر دیگری به جز مختصات نقطه، در یک آرایه ذخیره کنیم و به کارت گرافیک دهیم کارایی دارد. در نهایت متغیر (gl_Position) که نشان دهنده مکان این نقطه که در حال پردازش است می باشد را به وسیله مقادیری که از کد C خواندیم و مقدار ۱ مقداردهی کردیم، مقدار چهارم در این فضا کاربردی ندارد اما در فضای سه بعدی و در perspective view به کار ما می آید.

مرحله بعد ساختن یک Fragment shader است، وظیفه این بخش از pipeline انجام محاسبات و تعیین رنگ پیکسل می باشد، تمامی محاسبات مربوط به نور، سایه، بازتاب و افکت های گرافیکی غالبا در این مرحله انجام می شود، البته این مقادیر در مراحل بعد ممکن است تغییر کنند. یک fragment shader ساده به صورت زیر است:

برنامهٔ ۱.۴: *basic fragment shader*

```
#version 330 core
out vec4 FragColor;

void main()
{
    FragColor = vec4(1.0f, 0.5f, 0.2f, 1.0f);
}
```

کد بالا مقدار خروجی برای رنگ این fragment را برابر با مقداری ثابت قرار می دهد، نوع متغیر FragColor از نوع vec4 تعریف شده و مقادیری که دریافت کرده به ترتیب معنی red, green, blue, alpha را می دهند، مقادیر باید بین صفر و یک باشند.

حالا هر کدام از کد های بالارا compile می کنیم و سپس به برنامه اصلی که روی Gpu قرار می گیرد متصل می کنیم، این برنامه را shader program می نامیم، قطعه کد پایین مراحل compile و link کردن shader program را نشان می دهد.

برنامهٔ ۱.۵: *compile and link shaders to shader program*

```
// hold Vertex shader ID
unsigned int vertexShader;
// create a shader of vertex type
vertexShader = glCreateShader(GL_VERTEX_SHADER);
// upload source code
glShaderSource(vertexShader, 1, &vertexShaderSource, NULL);
// compile vertex shader source
glCompileShader(vertexShader);
// ------------------------------------------------
// hold Fragment shader ID
unsigned int fragmentShader;
//create a shader of frament type
```

```
fragmentShader = glCreateShader(GL_FRAGMENT_SHADER);
// upload source
glShaderSource(fragmentShader, 1, &fragmentShaderSource, NULL);
// compile fragment shader source
glCompileShader(fragmentShader);
// ------------------------------------------------
// hold shader program ID
unsigned int shaderProgram;
// create a shader program
shaderProgram = glCreateProgram();
// attach vertex shader to program
glAttachShader(shaderProgram, vertexShader);
// attach fragment shader to program
glAttachShader(shaderProgram, fragmentShader);
glLinkProgram(shaderProgram); // link the program
```

حالا می توانیم از این shader program برای تصویر کردن داده ها استفاده کنیم، در بخش بعد داده ها را بر روی Gpu بارگزاری می کنیم.

Upload Data to GPU

برای استفاده از مشخصات نقاطی که تعریف کردیم باید آن هارا روی memory کارت گرافیک آپلود کنیم، انتقال اطلاعات بین cpu و gpu نسبتا کند است، پس سعی می کنیم اطلاعات هر چه بیشتری را در یک بار انتقال منتقل کنیم، برای مدیریت حافظه بر روی کارت گرافیک از vbo(vertex buffer object) استفاده می کنیم، این بافر ها قابلیت نگهداری تعداد زیادی از داده ها را داند، برای ساختن یک buffer در opengl و نگهداری مشخصه بافر ایجاد شده به صورت زیر عمل می کنیم:

برنامهٔ ۱.۶: *creating a buffer object*

```
unsigned int VBO;
glGenBuffers(1, &VBO);
```

برای استفاده کردن از این بافر و ارسال اطلاعات باید آن را bind کنیم:

برنامهٔ ۱.۷: *binding to target gl_array_buffer*

```
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, VBO);
```

حالا که بافر bind شده است، می توانیم داده هایی که در آرایه vertices تعریف کردیم را به gpu memory منتقل کنیم:

برنامهٔ ۱.۸: *uploading data for static draw*

```
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER,
             sizeof(vertices),
             vertices,
             GL_STATIC_DRAW);
```

حالا داده های ما بر روی gpu قرار گرفته اند، آرگومان آخری که به تابع بالا دادیم به

این معنی است که این داده ها مستعد تغییر نیستند، یعنی نوشتن بر روی آن ها زیاد صورت نمی گیرد اما باید برای خوانده شدن به سرعت در دسترس باشند زیرا به مراتب خوانده می شوند، این به گرافیک کمک می کند تا داده هارا در جایی از حافظه قرار دهد تا این ویژگی ها را داشته باشد.

داده هایی که بر روی کارت گرافیک دادیم داده خام هستند، باید برای vertex shader مشخص کنیم که به چه صورت باید داده هارا تفسیر کند، برای استفاده از ویژگی attribute ها در vertex shader باید نوع تفسیر داده هارا نیز به صورت دستی مشخص کنیم، به اینکار Linking Vertex Attribute می گویند.

```
float vertices = [
    -0.5, -0.5, 0.0,   // a vertex
     0.5, -0.5, 0.0,   // a vertex
     0.0,  0.5, 0.0    // a vertex
]
```

شکل ۳.۱: Graphic pipeline: from learnopengl.com

برای انجام اینکار باید مقدار چند ویژگی را بدانیم:

۱. اولین آرگومان برابر با مقداری است که برای متغیر aPos در vertex shader به وسیله layout (location = 0) مشخص کردیم که در این مورد برابر با صفر است.

۲. آرگومان دوم مشخص کننده تعداد متغیر های است که باید به عنوان یک vertex شناسایی شوند، این مقدار برای مثال ما برابر ۳ است.

۳. این آرگومان مشخص کننده نوع داده هایی است که بارگزاری شده، در این مورد float است.

۴. مشخص می کند که داده ها نیاز به نرمال سازی دارند یا خیر.

۵. این مقدار مشخص می کند چند byte داده باید برای این vertex خوانده شود، به این مقدار stride می گویند.

۶. مقدار آخر در مورد مثال ما کاربرد ندارد، در مثال های بعدی می بینیم که مقادیر مربوط به رنگ و دیگر ویژگی های یک نقطه را در به صورت پیوسته در آرایه vertices اضافه می کنیم، آنگاه باید از offset برای مشخص کردن هر کدام از این ویژگی ها استفاده کنیم.

شکل ۱.۳ متناسب با توضیحات ساخته شده.

برنامه ۱.۹: *link vertex attribute to vertex data*

```
glVertexAttribPointer(
    0, // layout (location = 0)
    3, // 3 value for this vertex exists
    GL_FLOAT, // type of each value in vertex
    GL_FALSE, // no need to normalize data
    3 * sizeof(float), // 3 (size of) float in each vertex
    (void*)0  //no offset
    );

glEnableVertexAttribArray(0);
```

در پروژه های بزرگ تر انجام دادن این عملیات برای تک تک اشیاء موجود در بازی بیهوده و زمان گیر است، برای همین از یکی دیگر از انواع بافر ها به اسم vertex array object استفاده می کنیم، این بافر تمامی مراحل قبل و فعال سازی vertex attribute ها را ذخیره

می کند و دفعات بعد نیازی به انجام تمامی این مراحل نیست و ما فقط باید VAO را bind کنیم:

برنامهٔ ۱۰.۱: *link vertex attribute to vertex data*

```
unsigned int VAO;
glGenVertexArrays(1, &VAO);
// 2. copy our vertices array in a buffer for OpenGL to use
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, VBO);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(vertices), vertices,
    GL_STATIC_DRAW);
// 3. then set our vertex attributes pointers
glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 3 * sizeof(float
    ), (void*)0);
glEnableVertexAttribArray(0);
```

حالا می توانیم با استفاده shader program که vao مثلث را بر روی صفحه رسم کنیم، این کار را در بخش بعدی انجام می دهیم.

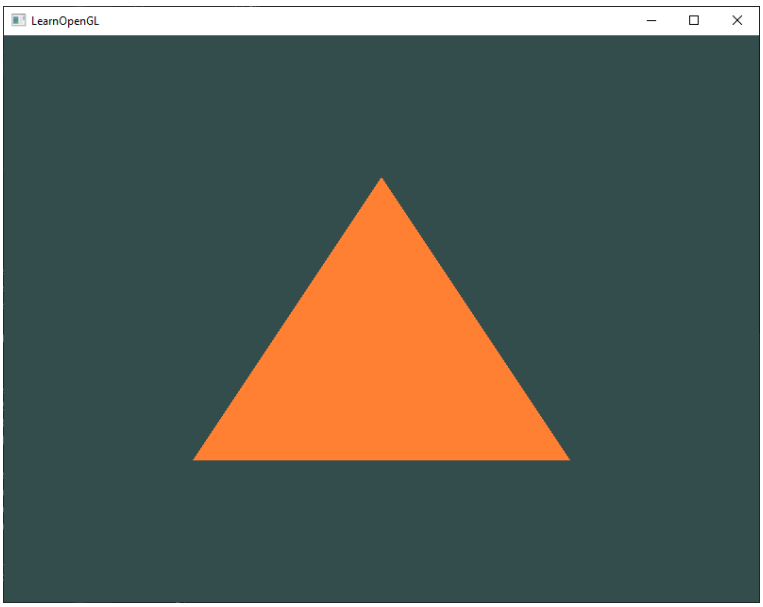
Render Loop

حالا برای رسم کردن مثلث نیاز به کدهای زیر داریم:

برنامهٔ ۱.۱.۱: *link vertex attribute to vertex data*

```
glUseProgram(shaderProgram);
glBindVertexArray(VAO);
glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, 3);
```

ابتدا shader program را فعال می کنیم، سپس VAO که ساختیم را bind می کنیم، حالا تمامی داده ها و تفسیر ها آماده هستند، برای رسم از تابع خط آخر می خواهیم که با داده ها تشکیل مثلث بدهد، ابتدای و انتهای بایت هایی که باید از vertex array بخواند را مشخص می کنیم، پس کامپایل کردن و اجرای برنامه با شکل زیر رو به رو می شویم.



شکل ۱.۴: hello triangle

برای اینکه بتوانیم دیگر ویژگی های مدل هارا به Gpu ارسال کنیم و از آن ها استفاده کنیم می توانیم از چند attribute یا از نوعی از متغیر ها به اسم uniform استفاده کنیم، در ابتدا برای افزودن رنگ به هر کدام از vertex ها از attribute های vertex shader استفاده می کنیم، برای این کار کد vertex shader را به شکل زیر تغییر می دهیم:

برنامهٔ ۱۲.۱: *declare and use aColor*

```
#version 330 core
layout (location = 0) in vec3 aPos;
layout (location = 1) in vec3 aColor

out vec3 ourColor;

void main()
{
    gl_Position = vec4(aPos, 1.0);
    ourColor = aColor
}
```

و کد fragment shader را به شکل زیر می نویسیم تا بتوانیم از مقادیر رنگ استفاده کنیم:

برنامهٔ ۱۳.۱: *render fragment with color from vertex shader*

```
#version 330 core
out vec4 FragColor;
in vec3 ourColor;

void main()
{
```

```
    FragColor = vec4(ourColor, 1.0);
}
```

حالا داده های مربوط به رنگ هر vertex را در انتهای داده های مربوط به همان vertex اضافه می کنیم، کد به شکل زیر تغییر می کند:

برنامه ۱.۱۴: *position and color data in one array*

```
float vertices[] = {
    // positions         // colors
     0.5f, -0.5f, 0.0f,  1.0f, 0.0f, 0.0f,   // bottom right
    -0.5f, -0.5f, 0.0f,  0.0f, 1.0f, 0.0f,   // bottom left
     0.0f,  0.5f, 0.0f,  0.0f, 0.0f, 1.0f    // top
};
```

داده هارا به شکل قبل به VBO اضافه می کنیم، سپس VAO را bind می کنیم، یک مرحله جدید در link vertex attribute برای رنگ ها اضافه شده است، این مرحله به شکل زیر است:

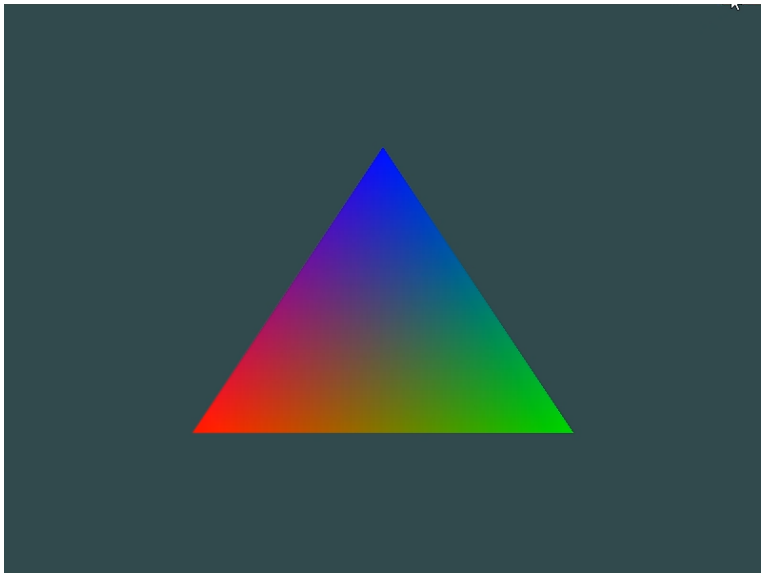
برنامه ۱.۱۵: *position and color data in one array*

```
// position attribute
glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 6 * sizeof(float
    ), (void*)0);
glEnableVertexAttribArray(0);
// color attribute
glVertexAttribPointer(1, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 6 * sizeof(float
    ), (void*)(3* sizeof(float)));
glEnableVertexAttribArray(1);
```

همانطور که می بینیم در این مرحله متغیر های مربوط stride و offset به شکل جدید

برای استفاده از و تفسیر تمام داده برای gpu تغییر کرده اند، در خط ۵ کد بالا متغیر offset نشان دهنده این است که برای خواندن سه مقدار برای رنگ، باید offset را برابر ۳ قرار دهیم تا سه مقدار اول که برای داده های مکان نقطه تعریف کرده ایم در نظر نگیرد، همچنین متغیر stride را برابر با شش قرار دادیم، این به معنی این است که هر ۶ مقدار در آرایه بیانگر ویژگی ها برای یک نقطه متفاوت است.

رنگ مثلث به صورت زیر تغییر می کند:



شکل ۵.۱: colorful triangle

در مثال بالا opengl مقدار رنگ سه نقطه را از ما دریافت کرد و به صورت خودکار مقدار رنگ بین این نقاط را به صورت خطی interpolate کرد.

این روش برای مدل ها و اشیاء سه بعدی نه تنها کاربردی نیست بلکه هزینه زیادی دارد، روش بهتر برای مقدار دهی به رنگ و ایجاد جزئیات برای اشیاء استفاده از texture ها است، در بخش بعد درباره تکسچرها توضیح می دهم.

Textures

تصور کنید می خواهیم یک دیوار را شبیه سازی کنیم، دیوار را می توانیم با چهار نقطه با استفاده از EBO(element buffer object) بسازیم، این چهار نقطه برای ما تشکیل یک مربع یا مستطیل(دو مثلث که از وتر بر روی یکدیگر قرار گرفته اند) بسته به موقعیت نقاط می دهند. مرحله بعدی اضافه کردن جزئیات رنگ یعنی شکل آجر ها بر روی دیوار است، این کار به سادگی امکان پذیر نیست، زیرا ما فقط قابلیت تعیین چهار رنگ برای چهار نقطه را داریم، پس نمی توانیم با چهار رنگ و linear interpolation که opengl بین این رنگ ها انجام می دهد یک دیوار آجری رندر کنیم، راه حل این مشکل استفاده از یک texture است، به صورت ساده می توانیم عکس یک دیوار آجری را به opengl بدهیم و بخواهیم که به ازای هر fragment از یکی از pixel های عکسی که ما به عنوان texture آپلود کرده ایم استفاده کند. برای استفاده از یک texture ما باید مراحل زیر را انجام دهیم.

۱. اضافه کردن texture coordinates به آرایه داده ها و آپلود آن بر روی ver-tex attribute.

۲. خواندن عکس از حافظه و آپلود کردن آن بر روی Gpu.

۳. تنظیم کردن حداقل برخی از ویژگی های تکسچر که به صورت پیشفرض مقداری ندارند.

۴. استفاده از توابع GLSL برای sample کردن texture

در مرحله اول مقادیر texture coordinate را به آرایه داده ها اضافه می کنیم:

برنامه ۱۶.۱: *position and color data in one array*

```
float vertices[] = {
    // positions          // colors           // texture coords
     0.5f,  0.5f, 0.0f,   1.0f, 0.0f, 0.0f,   1.0f, 1.0f,
     0.5f, -0.5f, 0.0f,   0.0f, 1.0f, 0.0f,   1.0f, 0.0f,
    -0.5f, -0.5f, 0.0f,   0.0f, 0.0f, 1.0f,   0.0f, 0.0f,
    -0.5f,  0.5f, 0.0f,   1.0f, 1.0f, 0.0f,   0.0f, 1.0f
};
```

دقت کنید که باید مراحل linking vertex attribute را برای مقادیر جدید انجام دهیم.

حالا عکس را از دیسک می خوانیم، برای این کار از **stbi_image** استفاده می کنیم، این کتابخانه به صورت single header library در دسترس است، این گونه کتابخانه در یک فایل نوشته شده اند و استفاده درست از آن ها با استفاده از define است.

پس از بازکردن عکس در کد باید یک texture بسازیم، ابتدا یک شیtexture می سازیم و سپس می توانیم داده های عکسی که خواندیم را بر روی تکسچری که ساختیم upload کنیم، اینکار به شیوه زیر انجام می گیرد:

برنامه ۱۷.۱: *load and upload data to gpu*

```
unsigned int texture; // hold texture ID
glGenTextures(1, &texture); // create texture object on gpu
// bind texture to 2d_texture target
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, texture);
// upload image data to texture that is bound i.e texture
    variable
glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, GL_RGB, width, height,
```

```
7       0, GL_RGB, GL_UNSIGNED_BYTE, data); // data is the Image
8   // generating mip maps for this texture
9   glGenerateMipmap(GL_TEXTURE_2D);
```

نیاز داریم که برخی مقادیر را برای texture تنظیم کنیم وگرنه با یک تکسچر سیاه رو به رو می شویم، مقادیر زیر برای تنظیم تکرار شدن تصویر در جهات مختلف و مشخص کردن الگوریتم مناسب برای زمان کوچک نمایی یا بزرگ نمایی تصویر است، به صورت زیر این مقادیر را تنظیم می کنیم:

برنامهٔ ۱.۱۸: *set minimum setting for a texture*

```
1   glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_S, GL_REPEAT);
2   glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_WRAP_T, GL_REPEAT);
3   glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MIN_FILTER,
        GL_LINEAR_MIPMAP_LINEAR);
4   glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL_LINEAR)
        ;
```

مختصات تکسچر را در vertex shader به صورت یک vertex attribute جدید تعریف می کنیم و به مرحله fragment shader می فرستیم، ارسال این داده ها بین مراحل مختلف pipeline را با استفاده از متغیر هایی که با in, out تعریف می شوند انجام می دهیم، به این صورت که متغیر را در مرحله ای که زودتر انجام می شود(در این مورد vertex shader) به صورت out تعریف می کنیم و در مرحله بعد آن را با in تعریف می کنیم، دقت کنید باید نام متغیر دقیقا برابر باشد، کد زیر به vertex shader اضافه می کنیم:

برنامهٔ ۱.۱۹: *vertex shader to use texture*

```
1   layout (location = 2) in vec2 aTexCoord;
2   out vec2 TexCoord; // vec2 because of 2d image
```

```
...
void main()
{
    ....
    TexCoord = aTexCoord;
}
```

در قمست fragment shader نیز کد به شکل زیر تغییر می کند:

برنامه ۲۰.۱: *fragment shader to use texture*

```
#version 330 core
out vec4 FragColor;
...
in vec2 TexCoord;

uniform sampler2D ourTexture;

void main()
{
    //built in texture function for sampling texture to fragment
    FragColor = texture(ourTexture, TexCoord);
}
```

نتیجه به شکل زیر در می آید:

شکل ۱.۶: colorful triangle

دوربین و حرکت در جهان

Transformations

می توانیم با دو مثلث یک مربع درست کنیم، و با شش مربع یک مکعب تشکیل دهیم، و با استفاده از یک حلقه و چند draw call چند مکعب بسازیم، اما در حال حاظر این کار فایده ای ندارد چون تمامی مکعب ها بر روی یکدیگر قرار می گیرند و. ما فقط یک مکعب را به صورت دو بعدی می بینیم، برای دیدن یک مکعب به یک محیط که شبیه ساز سه بعد باشد نیاز داریم، می توانیم مختصات مکعب هارا در حلقه تغییر دهیم و در قسمت های مختلف صفحه رندر کنیم، به این کار translate کردن می گوییم، این عمل را با استفاده از یک ماتریس $4x4$ انجام می دهیم، یک translation matrix به شکل زیر است:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

مقادیر (x, y, z) به ترتیب نشان دهنده تغییرات بر بردار متناسب با خود هستند، می توانیم هر کدام از نقاط مدل خود را توسط ماتریس بالا به نقطه جدید خود منتقل کنیم، ماتریس های rotation و scale نیز به ترتیب برای چرخش حول محور های مشخص و تغییر مقیاس استفاده می شوند، به حاصل ضرب این سه جزء یک model matrix می گویند.

پس از ضرب کردن model در مختصات هر نقطه از شکل خود، اصطلاحا مختصات نقاط را در local space به world space برده ایم.

برای انجام عملیات ریاضی مربوط به opengl بر روی cpu از کتابخانه **GLM** استفاده می کنیم، این کتابخانه دارای کلاس ها و توابعی است که نمایانگر ساختار های ریاضیاتی مانند

vector ها و matrix ها است، همچنین تعداد دیگری از توابع را داراست که برای ساده سازی کار ما فراهم شده اند، یکی از این توابع glm::LookAt است، می توانیم از این کلاس برای تشکیل یک view matrix استفاده کنیم که نشانگر **Camera** است.

Camera

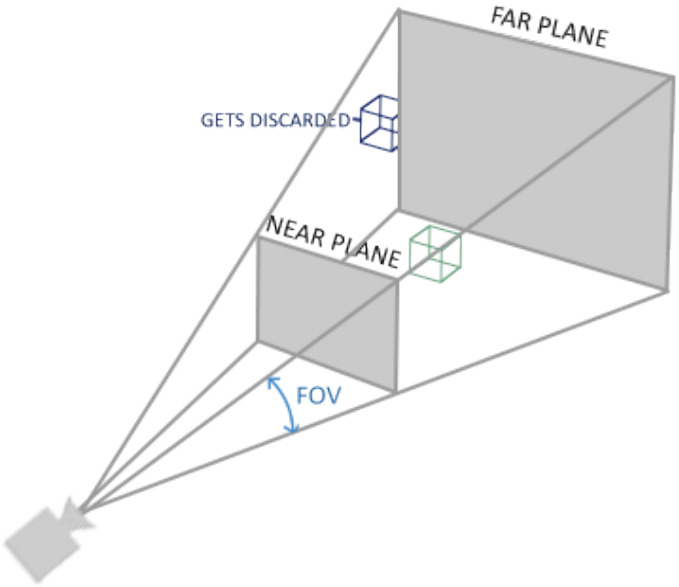
در دنیای واقعی اگر جسمی از ما فاصله بیشتری داشته باشد کوچکتر دیده می شود، این تعریف بسیار ساده و مختصری از perspective view است، نور بازتاب شده از اجسام به مرکز چشم ما برمیگردد و اجسامی که نزدیک تر هستند بزرگتر دیده می شوند، در مقابل این مدل orthographic views قرار دارند، در این مدل که در طراحی های صنعتی بیشتر کاربر دارد و در دنیای واقعی وجود ندارد، هر کدام از pixel های صفحه پرتویی به صورت جداگانه از خود ساطع می کنند، همه این پرتوها موازی هستند و در نتیجه فاصله جسم از بیننده در نحوه دیدن شکل تاثیری ایجاد نمی کند، ما برای داشتن یک فضای سه بعدی واقع گرایانه از perspective projection استفاده می کنیم، برای ساختن این ماتریس از GLM به شکل زیر استفاده می کنیم:

برنامهٔ ۱.۱.۲: *fragment shader to use texture*

```
glm::mat4 proj = glm::perspective(
    glm::radians(45.0f),
    (float)width/(float)height,
    0.1f, 100.0f);
```

آرگومان اول مقددار fov (field of view) است، این مقدار به نحوی مقدار بزرگنمایی تصویر ما را مشخص می کند، آرگومان دوم aspect ratio دوربین و مقادیر سوم و چهارم به ترتیب فاصبه صفحه نزدیک و دور را مشخص می کنند، این مشخصات تشکیل یه فضای سه بعدی می دهند که هر چه خارج از آن باشد قابل مشاهده نیست، همچنین دید perspective

را به ما ارائه می کنند. شکل زیر بیانگر این موضوع است:



شکل ۷.۱: perspective frustum

حالا که سه ماتریس model، view و projection را در اختیار داریم می توانیم با ضرب کردن مقدار x, y, z, 1 برای هر نقطه آن نقطه را به clip space ببریم، به ترتیب با ضرب کردن هر یک از ماتریس هایی که پیش تر گفت شد به world space سپس view space و در آخر به clip space می رویم، همچنین projection matrix در نهایت تمامی مقادیر را به NDC نیز منتقل می کند.

مقدار تمامی ماتریس های بالا را با استفاده از متغیر های uniform به vertex shader انتقال می دهیم، مقادیری از این سه ماتریس را که نیاز باشد در هر اجرا از render loop دوباره بارگزاری می کنیم.vertex shader به شکل زیر در می آید:

برنامهٔ ۱.۲۲: going 3D

```
#version 330 core
layout (location = 0) in vec3 aPos;
...
uniform mat4 model;
uniform mat4 view;
uniform mat4 projection;

void main()
{
    // note that we read the multiplication from right to left
    gl_Position = projection * view * model * vec4(aPos, 1.0);
    ...
}
```

به صورت پیش فرض opengl نمی تواند مشخص کند که کدام قسمت از مدل هایی که رندر کرده در تصویر نهایی جلوتر یا عقب تر باید باشند، یعنی امکان دارد قسمت پشتی مکعب به جای قسمت جلوی آن رندر شود، در واقع هر کدام از fragment ها که دیر تر رندر شوند، بر دیگر fragment هایی که در آن پیکسل از قبل رندر شده اند پیروز می شوند و نمایش داده می شوند، برای حل این مشکل از z-buffer استفاده می کنیم، GLFW به صورت پیش فرض این buffer را برای ما ساخته، برای فعال سازی آن دستور زیر را پیش از render loop قرار می دهیم:

برنامهٔ ۱.۲۳: enabling depth buffer

```
glEnable(GL_DEPTH_TEST);
```

و در انتهای render loop نیز دستور زیر را قرار می دهیم:

برنامهٔ ۲۴.۱: *clearing depth buffer for next frame*

```
1 glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);
```

خروجی به شکل زیر خواهد بود:

شکل ۸.۱: cubes in 3D

نورپردازی و سایه ها

به صورت کلی در این پروژه سه مدل light casterپیاده سازی شده است که نور هایDirectional، point و spot می باشند.

Directional Lights

به صورت ساده این گونه از نور را مشابه به نوری در نظر می گیریم که منبع آن در بی نهایت قرار دارد، این فرض باعث می شود که تمامی پرتو های آن تقریبا با هم موازی باشند، خورشید را به همین صورت یک directional light در نظر می گیریم. برای بیان کردن این مدل از نور تنها نیاز به سه مولفه (x, y, z) داریم تا بتوانیم یک جهت را در فضای سه بعدی مشخص کنیم که همان جهت پرتو های نور می باشد.

انواع دیگر نور به این شکل ساده نیستند و از ویژگی های دیگری نیز برخوردارند، برای مثال point light دارای یک مولفه سه بعدی position است، همچنین برای این که attenuation یا میرایی نور را شبیه سازی کنیم از سه مقدار دیگر به عنوان constant، linear و quadratic نیز استفاده می کنیم تا بتوانیم تقریبا میرایی نور به نسبت فاصله از منبع نور را شبیه سازی کنیم. به همین صورت مقادیر دیگری از جمله direction را نیز داراست تا به کمک cut off بتواند یک نور که میرایی دارد و در جهت و زاویه خاصی در حال تابیدن است شیسه سازی کند.

Lighting models

پیاده سازی و شبیه سازی رفتار واقعی نور کاری بسیار پیچیده است که قدرت سخت افزاری و هزینه زیادی را در بردارد، برای همین ما از روش هایی استفاده می کنیم که به صورت تقریبی بتوانند رفتار نور را به صورتی که ما از فیزیک می دانیم شبیه سازی کنند، برای شبیه سازی رفتار نور و برخورد آن با محیط از روش هایی مانند lambertian و blinn-

phong استفاده می شود.

Lambertian

این روش بر اساس زاویه تابش نور با سطح جسم عمل می کند، بدینگونه که اگر سطح عمود به جعت نور باشد تقریبا تمام انرژی نور را دریافت می کند، اگر سطح به صورت موازی با جهت نور قرار داشته باشد مقدار انرژی دریافتی از منبع نور برابر صفر خواهد بود، بقیه حالات قرارگیری این دو نسبت به بسته به $\cos\theta$ مقدار دهی می شود. این روش مستقل از مکان تماشاگر است، در دنیای واقعی معمولا بسته به material استفاده شده در جشم امکان بازتاب و بازتاب بیشتر نور از سطح در زاویه های به خصوصی وجود دارد، روش phong و بعد تر blinn این ویژگی را در خود جای دادند.

Blinn-Phong

این مدل متشکل از سه بخش اصلی است:

ambient: همانطور که در مدل lambertian دیدیم، اگر بردار نرمال سطحی عمود بر جهت نور باشد، آن سطح هیچ مقداری از نور را دریافت نمی کند و کاملا تاریک خواهد ماند، این حالت در جهان واقعی نیز در نکان های کاملا بسته اتفاق می افتد و در دیگر حالات مقدار کمی نور از منابع مختلف باعث دیده شدن جسم می شوند، ما در این مدل مقداری از رنگ هر جسم را بدون توجه به زاویه تابش نور به آن جسم می دهیم، این باعث می شود که اجسام کاملا تاریک به وجود نیایند، به این مقدار ambient color می گوییم.

diffuse: این مقدار برابر با همان مقداری است که در مدل lambertian نیز محاسبه کرده بودیم، بسته به جهت بردار نرمال سطح و جهت نور مقداری انرژی توسط هر سطح جذب می شود و باعث روشن شدن سطح می گردد.

specular این مقدار باعث به وجود آمدن درخشندگی و بازتاب بیشتر نور نسبت به مکان ناظر می شود، این مقدار مستقل از مکان ناظر نیست، اگر بردار view direction در جهت بردار بازتاب نور باشد از حداکثر درخشندگی و highlight برخوردار می شود، برای محاسبه کردن جهت بازتاب از تابع reflect در GLSL استفاده می کنیم، سپس برای

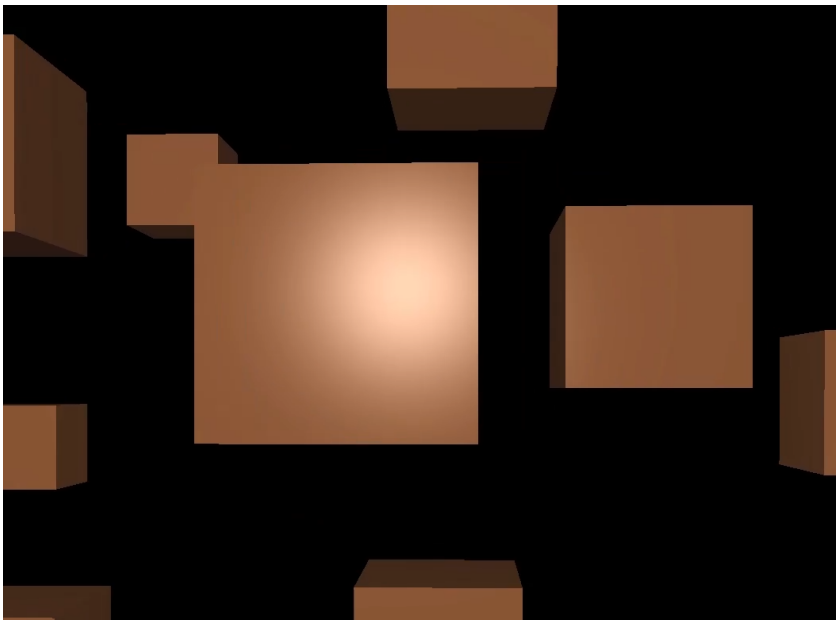
محاسبه مقدار بازتاب از ضرب داخلی بین بردار view direction و reflectDir استفاده می کنیم، همچنین برای اینکه از منفی شدن مقادیر جلوگیری کنیم از تابع max نیز استفاده می کنیم:

برنامه ۱.۲۵: *calculating specular component*

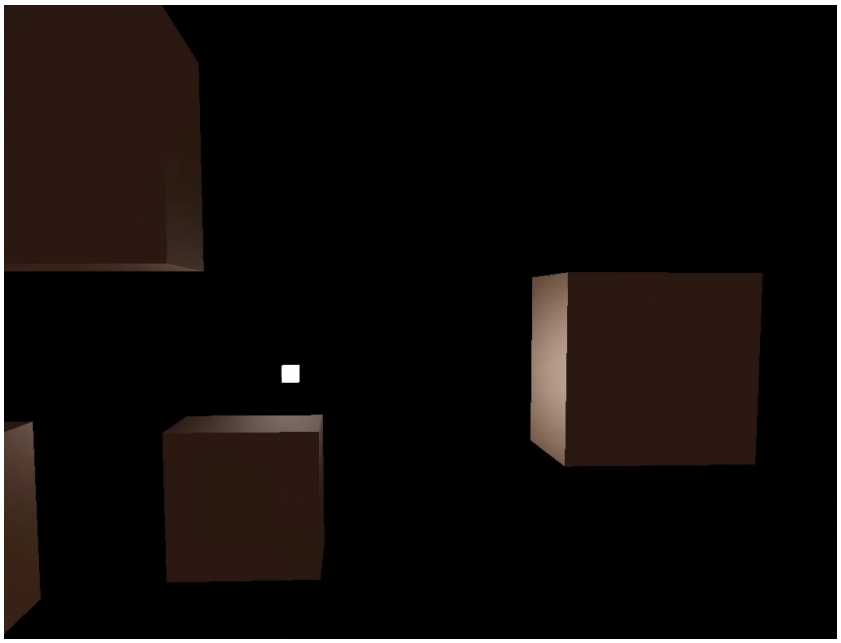
```
vec3 viewDir = normalize(viewPos - FragPos);
vec3 reflectDir = reflect(-lightDir, norm);
float spec = pow(max(dot(viewDir, reflectDir), 0.0), 32);
```

مقدار ۳۲ در کد بالا را مقدار shininess می گویند، هر چقدر این مقدار بیشتر باشد درخشش بازتاب در آن نقطه بیشتر می شود.

در نهایت با جمع بستن این سه مقدار می توانیم تقریبی از رفتار نور در دنیای واقعی داشته باشیم، در این پروژه از روش blinn-phong استفاده شده. نتیجه استفاده از این روش به شکل زیر است:



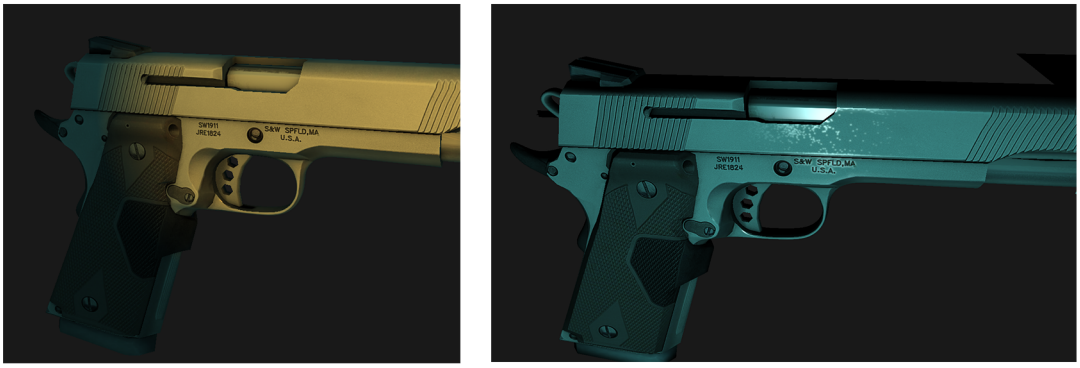
شکل ۱.۹: blinn-phong shading



شکل ۱۰.۱: blinn-phong shading

در حال حاظر تمام سطوح مقداری که بازتاب می کنند تنها به میزان زاویه با منبع نور بستگی دارد، برای این که بتوانیم این بازتاب را کنترل کنیم و سطوحی با میزان بازتاب متفاوت را تشکیل دهیم، در اینجا نیاز به جزئیات بیشتر نسبت به یک سطح داریم، همانگونه که قبل تر از texture ها برای ایجاد جزئیات روی سطوح استفاده کردیم این بار نیز از نوع دیگری از تکسچر ها برای اینکار استفاده می کنیم، به این تکسچر ها specular map می گوییم، برای گرفتن مقادیر برای هر پیکسل دقیقا مانند texture ها کار می کنیم، یک نمونه از specular map به شکل زیر است:

بعد از استفاده از این specular map برای مدل اسلحه نتیجه به شکل زیر در می آید، می بینید که مقدار بازتاب در همه نقاط یکسان نیست:



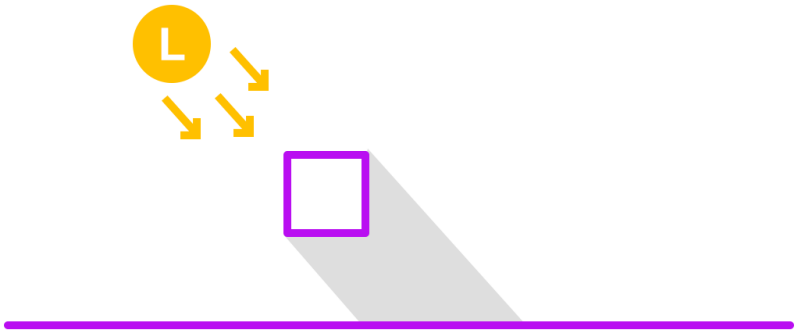
شکل ۱۱.۱: phong shaded gun

شکل ۱۲.۱: a gun specular map

Shadows

الگوریتم های زیادی برای تولید سایه وجود دارند، برخی از این الگوریتم ها مناسب real-time نیستند و به همین دلیل مورد بحث ما نیستند، این الگوریتم ها غالبا از روش های ray-tracing سرچشمه می گیرند، در الگوریتم های ray-tracing به صورت خودکار سایه ها تولید می شوند، دلیل آن نیز نرسیدن پرتو های نور به نقاط است.

روش هایی که برای تولید سایه در real-time استفاده می کنیم شباهت زیادی از لحاظ تعریف به روش بالا دارند، باید سطوحی را پیدا کنیم که نور به آن ها نمی رسد، یکی از این روش ها shadow mapping نام دارد، این روش و مشتقات آن در بازی کامپیوتری مورد استفاده قرار می گیرند. shadow mapping روشی ساده است که در مراحلی که در زیر شرح می دهم قابل تولید است: اساس کار ایجاد نقشه ای است که با استفاده از آن می توانیم مشخص کنیم که نور به چه جسمی زودتر برخورد کرده و چه جسمی به نور نزدیک تر است



شکل ۱۳.۱: absence of light - shadow

همانگونه که در شکل بالا نیز پیداست، سایه به دلیل نرسیدن نور و غیاب نور در نقطه پدید می آید، در روش shadow mapping ابتدا صحنه را از دید منبع نور به صورت ساده رندر می کنیم، در این عملیات ما fragment shader را خالی می گذاریم، زیرا نیازی به خروجی آن نداریم، تنها کاری که باید انجام شود پر شدن depth buffer است، این کار به صورت خودکار انجام می شود پس ما نیازی به نوشتن کد در fragment shader

ندارایم، depth buffer تشکیل شده را به یک تکسچر متصل می کنیم، به این صورت shadow map ما آماده است.

بعد از اینکه shadow map آماده شد، حالا صحنه را از اول و با تمام جزئیات موردنیاز رندر می کنیم، و در fragment shader تصمیم می گیریم که آیا این نقطه نزدیک ترین نقطه در برخورد با پرتو نور است یا خیر، برای اینکار نیاز داریم که نقطه ای که در حال پردازش هست را به light space ببریم، این کار در مرحله vertex shader و توسط light Space Matrix انجام می شود، مقدار این ضرب به مرحله fragment shader فرستاده می شود و آن جا به شکل زیر برای محاسبه نور استفاده می شود:

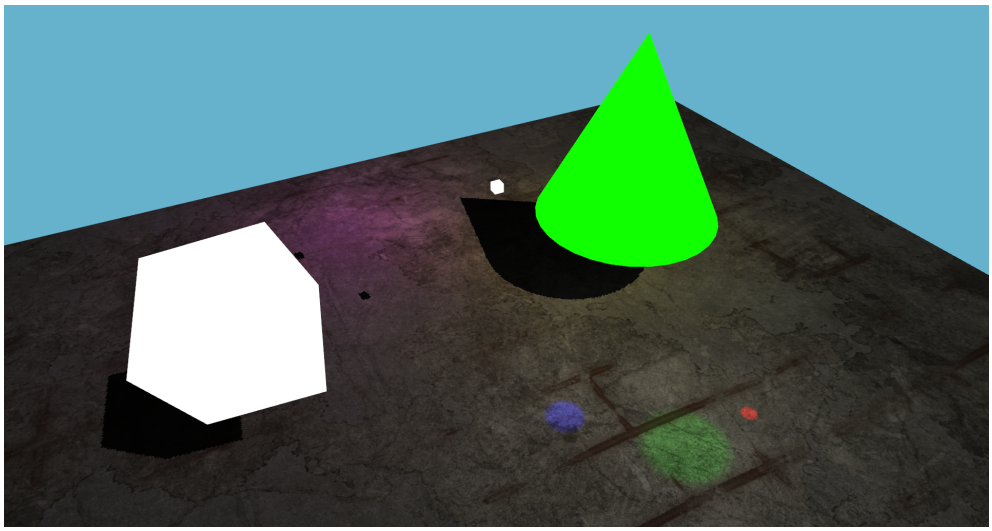
برنامهٔ ۲۶.۱: *calculate shadow*

```
float ShadowCalculation(vec4 fragPosLightSpace)
{
    // perform perspective divide
    vec3 projCoords = fragPosLightSpace.xyz / fragPosLightSpace.
        w;
    // transform to [0,1] range
    projCoords = projCoords * 0.5 + 0.5;
    // get closest depth value from light's perspective (using
        [0,1] range fragPosLight as coords)
    float closestDepth = texture(shadowMap, projCoords.xy).r;
    // get depth of current fragment from light's perspective
    float currentDepth = projCoords.z;
    // check whether current frag pos is in shadow
    float shadow = currentDepth > closestDepth  ? 1.0 : 0.0;

    return shadow;
}
```

در تابع بالا ابتدا مقادیر $[x, y, z]$ تقسیم بر مقدار w می شوند زیرا light space

matrix به صورت orthogonal محاسبه شده بود، زیرا همانطور که پیش تر گفتیم پرتو های نور با یکدیگر موازی هستند و اگر بخواهیم از دید منبع نور جهان را رندر کنیم باید از view matrix ای استفاده کنیم که orthogonal باشد، حالا اما برای استفاده در رندر نهایی نیاز به perspective view داریم، برای همین این تقسیم را انجام می دهیم. در مرحله بعد مقادیر را به بازه $[0-1]$ می آوریم، از پیش میدانیم که مقادیر بین $[-1, 1]$ هستند پس با تقسیم کردن به دو و جمع با ۰.۵ به بازه دلخواه ما منتقل می شوند. در مرحله بعد مقدار closest depth را از تکسچری که در مرحله قبل رندر کرده بودیم دریافت می کنیم، این مقدار، نزدیک ترین جسم به نور است، در خط بعد این مقدار را با عمق نقطه فعلی در نظر مقایسه می کنیم، اگر عمق فعلی از نزدیک ترین عمقی که داریم بیشتر باشد پس این پیکسل در سایه است پس مقدار ۰.۱ به معنی True برمی گردانیم. حاصل کارهای بالا به ساختن سایه منجر می شود:



شکل ۱۴.۱: scene with shadow

بخش دوم

فیزیک

فصل ۲

Physics

۱.۲ Particles

۲.۲ Rigid Bodies