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*

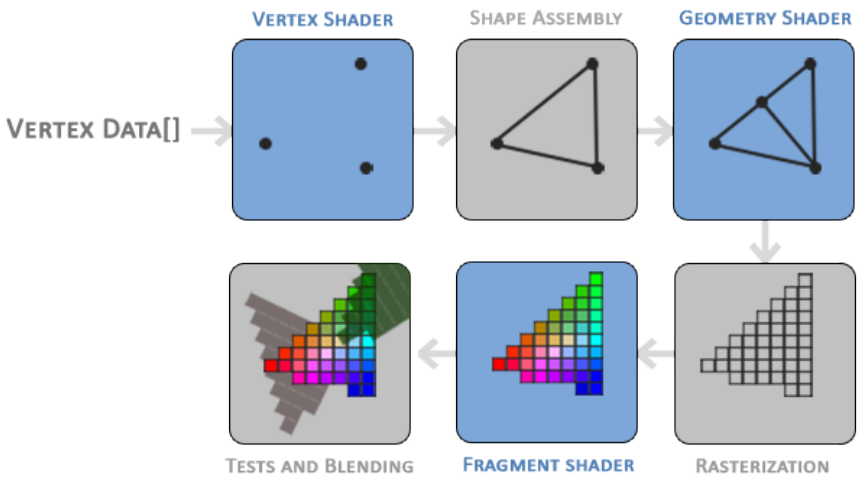
```
float vertices[] = {
    // x   ,  y,     z
    -0.5f, -0.5f, 0.0f, //p1
     0.5f, -0.5f, 0.0f, //p2
     0.0f,  0.5f, 0.0f  //p3
};
```

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.

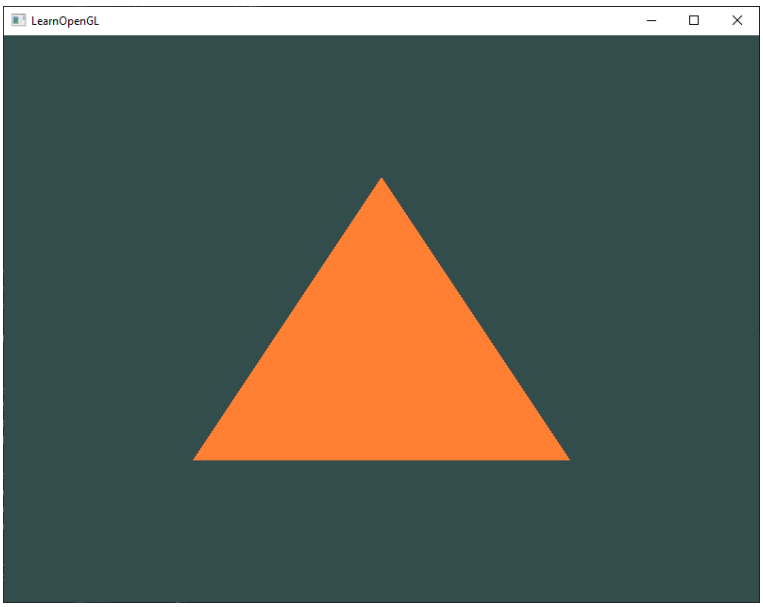
Render Loop

حالا برای رسم کردن مثلث نیاز به کدهای زیر داریم:

برنامه ۱.۱.۱۱: *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: Graphic pipeline: from learnopengl.com

بخش دوم

فیزیک

فصل ۲

Physics

۱.۲ Particles

۲.۲ Rigid Bodies