

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

اول گرافیک ۴

۱ **Renderer** ۶

۷ پنجره ها و کاتکست ها

۹ تصویر کردن داده ها

دوم فیزیک ۲۹

۲ **Physics** ۳۱

۱.۲ Particles ۳۱

۲.۲ Rigid Bodies ۳۱

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 مستقیماً 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 استفاده 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 مانند **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 قرارداد 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 چندسکوپی است و می توانیم آن را در سیستم عامل های مختلف استفاده کنیم، پروژه من نیز چندسکوپی است، پس می توانیم از این کتابخانه سبک و چندسکوپی 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 شیء در نظر بگیریم که تمامی اطلاعات *OpenGL* را به همراه دارد، اطلاعاتی مانند *state* و *framebuffers* ها. برای کنترل کردن ورودی ها، *glfw* از دوروش 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 های *OpenGL Loading Library* است، برای کار با *opengl* ما حتما باید یکی از این کتابخانه ها را مورد استفاده 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 pointer* ها را در *runtime* بارگزاری کنیم.

برنامه ۱۰.۱: *load opengl function pointer*

```
1 // glad: load all OpenGL function pointers
2 // -----
3 if (!gladLoadGLLoader((GLADloadproc)glfwGetProcAddress))
4 {
5     std::cout << "Failed to initialize GLAD" << std::endl;
6 }
```

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، نقاط 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:

برنامه ۲.۱: *points for a triangle*

```

1 float vertices[] = {
2     // x , y, z
3     -0.5f, -0.5f, 0.0f, //p1
4     0.5f, -0.5f, 0.0f, //p2
5     0.0f, 0.5f, 0.0f //p3
6 };

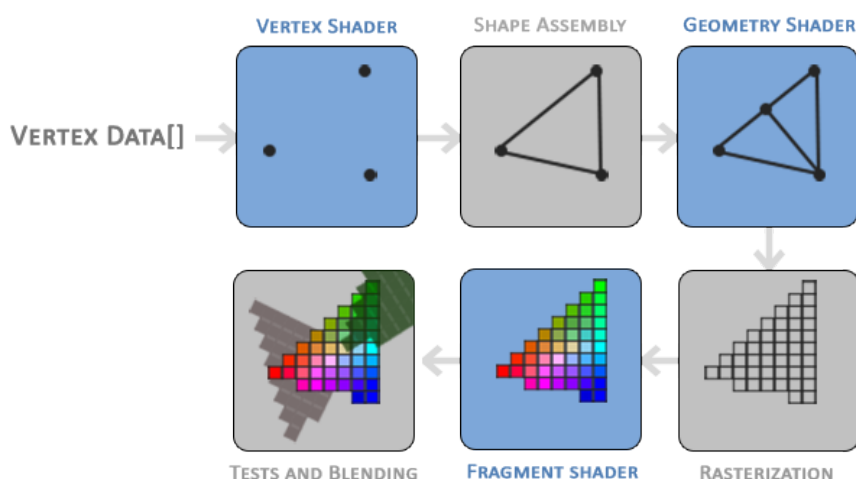
```

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 ها را 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 بازی به 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:

برنامه ۳.۱: *basic vertex shader*

```

1 #version 330 core
2 layout (location = 0) in vec3 aPos;
3
4 void main()
5 {
6     gl_Position = vec4(aPos.x, aPos.y, aPos.z, 1.0);
7 }

```

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 غالباً در این مرحله انجام می شود، البته این مقادیر در مراحل بعد ممکن است تغییر کنند. یک fragment shader ساده به صورت زیر است:

برنامه ۴.۱: *basic fragment shader*

```

1  #version 330 core
2  out vec4 FragColor;
3
4  void main()
5  {
6      FragColor = vec4(1.0f, 0.5f, 0.2f, 1.0f);
7  }
```

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 کدهای بالا را *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.

برنامه ۵.۱: *compile and link shaders to shader program*

```

1  // hold Vertex shader ID
2  unsigned int vertexShader;
3  // create a shader of vertex type
4  vertexShader = glCreateShader(GL_VERTEX_SHADER);
5  // upload source code
6  glShaderSource(vertexShader, 1, &vertexShaderSource, NULL);
7  // compile vertex shader source
8  glCompileShader(vertexShader);
9  // -----
10 // hold Fragment shader ID
11 unsigned int fragmentShader;
12 //create a shader of fragment type
```

```

13 fragmentShader = glCreateShader(GL_FRAGMENT_SHADER);
14 // upload source
15 glShaderSource(fragmentShader, 1, &fragmentShaderSource, NULL);
16 // compile fragment shader source
17 glCompileShader(fragmentShader);
18 // -----
19 // hold shader program ID
20 unsigned int shaderProgram;
21 // create a shader program
22 shaderProgram = glCreateProgram();
23 // attach vertex shader to program
24 glAttachShader(shaderProgram, vertexShader);
25 // attach fragment shader to program
26 glAttachShader(shaderProgram, fragmentShader);
27 glLinkProgram(shaderProgram); // link the program

```

حالا می‌توانیم از این **shader program** برای تصویر کردن داده‌ها استفاده کنیم،
در بخش بعد داده‌ها را بر روی **Gpu** بارگزاری می‌کنیم.

Upload Data to GPU

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

برنامه ۶.۱: *creating a buffer object*

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

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

برنامه ۷.۱: *binding to target gl_array_buffer*

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

حالا که بافر bind شده است، می‌توانیم داده‌هایی که در آرایه vertices تعریف کردیم را به gpu memory منتقل کنیم:

برنامه ۸.۱: *uploading data for static draw*

```
1 glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER,
2             sizeof(vertices),
3             vertices,
4             GL_STATIC_DRAW);
```

حالا داده‌های ما بر روی gpu قرار گرفته‌اند، 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 = [
    a vertex    - 0.5 , - 0.5 ,  0.0 ,
    a vertex    0.5 , - 0.5 ,  0.0 ,
    a vertex    0.0 ,  0.5 ,  0.0
]
```

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 (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 ۹.۱: *link vertex attribute to vertex data*

```
1 glVertexAttribPointer(
2     0, // layout (location = 0)
3     3, // 3 value for this vertex exists
4     GL_FLOAT, // type of each value in vertex
5     GL_FALSE, // no need to normalize data
6     3 * sizeof(float), // 3 (size of) float in each vertex
7     (void*)0 //no offset
8 );
9
10 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

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

برنامه ۱۰.۱: *link vertex attribute to vertex data*

```

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

```

حالا می‌توانیم با استفاده از shader program که vao مثلث را بر روی صفحه رسم کنیم، این کار را در بخش بعدی انجام می‌دهیم.

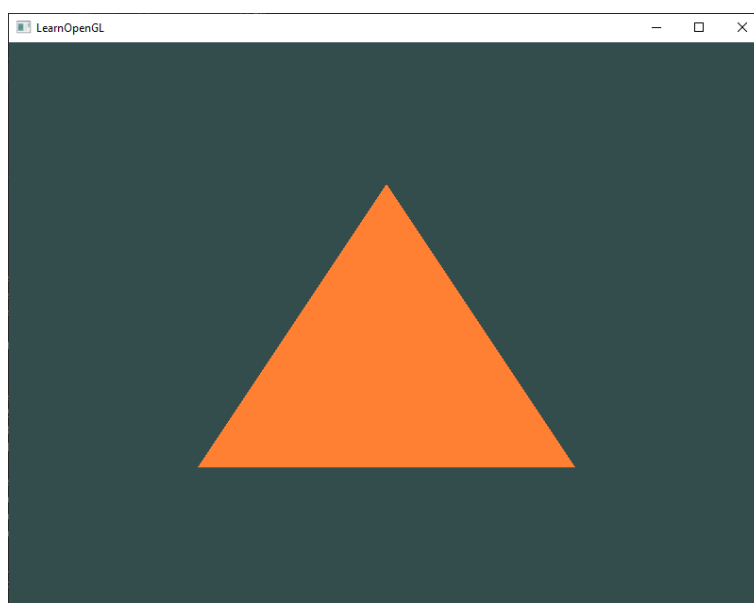
Render Loop

حالا برای رسم کردن مثلث نیاز به کدهای زیر داریم:

برنامه ۱۱.۱: *link vertex attribute to vertex data*

```
1 glUseProgram(shaderProgram);  
2 glBindVertexArray(VAO);  
3 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 ویژگی‌های مدل‌ها را به Gpu ارسال کنیم و از آن‌ها استفاده کنیم می‌توانیم از چند `attribute` یا از نوعی از متغیرها به اسم `uniform` استفاده کنیم، در ابتدا برای افزودن رنگ به هر کدام از `vertex`‌ها از `attribute`‌های `vertex shader` استفاده می‌کنیم، برای این کار کد `vertex shader` را به شکل زیر تغییر می‌دهیم:

برنامه ۱۲.۱: *declare and use aColor*

```
1 #version 330 core
2 layout (location = 0) in vec3 aPos;
3 layout (location = 1) in vec3 aColor
4
5 out vec3 ourColor;
6
7 void main()
8 {
9     gl_Position = vec4(aPos, 1.0);
10    ourColor = aColor
11 }
```

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

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

```
1 #version 330 core
2 out vec4 FragColor;
3 in vec3 ourColor;
4
5 void main()
6 {
```

```
7     FragColor = vec4(ourColor, 1.0);
8 }
```

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 ۱۴.۱: *position and color data in one array*

```
1 float vertices[] = {
2     // positions      // colors
3     0.5f, -0.5f, 0.0f,  1.0f, 0.0f, 0.0f,  // bottom right
4     -0.5f, -0.5f, 0.0f, 0.0f, 1.0f, 0.0f,  // bottom left
5     0.0f,  0.5f, 0.0f,  0.0f, 0.0f, 1.0f   // top
6 };
```

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:

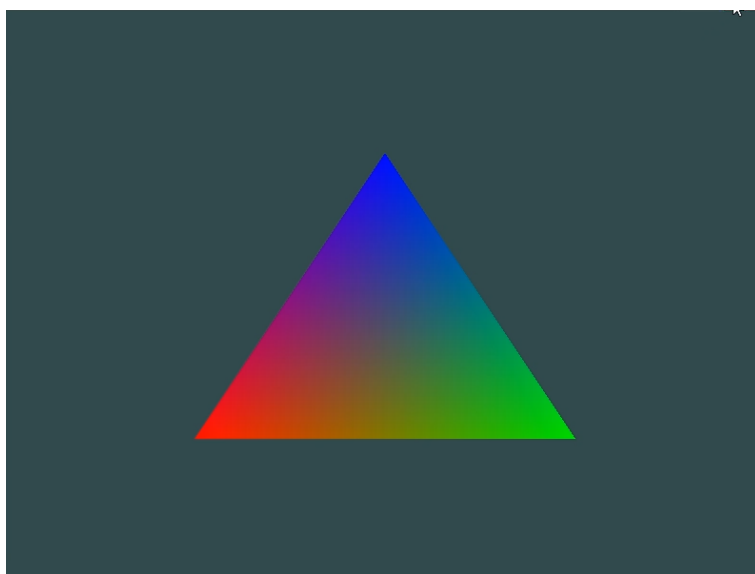
برنامه ۱۵.۱: *position and color data in one array*

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

همانطور که می بینیم در این مرحله متغیر های مربوط offset و stride 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 دهیم.

Textures

تصور کنید می خواهیم یک دیوار را شبیه سازی کنیم، دیوار را می توانیم با چهار نقطه با استفاده از (element buffer object) EBO 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 vertex 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 پیش فرض 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*

```
1 float vertices[] = {
2     // positions           // colors           // texture coords
3     0.5f,  0.5f, 0.0f,    1.0f, 0.0f, 0.0f,    1.0f, 1.0f,
4     0.5f, -0.5f, 0.0f,    0.0f, 1.0f, 0.0f,    1.0f, 0.0f,
5     -0.5f, -0.5f, 0.0f,    0.0f, 0.0f, 1.0f,    0.0f, 0.0f,
6     -0.5f,  0.5f, 0.0f,    1.0f, 1.0f, 0.0f,    0.0f, 1.0f
7 };
```

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 شی texture 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*

```
1 unsigned int texture; // hold texture ID
2 glGenTextures(1, &texture); // create texture object on gpu
3 // bind texture to 2d_texture target
4 glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, texture);
5 // upload image data to texture that is bound i.e texture
  variable
6 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 با بزرگ نمایی تصویر است، به صورت زیر این مقادیر را تنظیم می کنیم:

برنامه ۱۸.۱: *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,
4     GL_LINEAR_MIPMAP_LINEAR);
5 glTexParameteri(GL_TEXTURE_2D, GL_TEXTURE_MAG_FILTER, GL_LINEAR);
6 ;
```

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 دقیقاً برابر باشد، کد زیر به vertex shader اضافه می کنیم:

برنامه ۱۹.۱: *vertex shader to use texture*

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

۲۷

```
3 ...
4 void main()
5 {
6     ....
7     TexCoord = aTexCoord;
8 }
```

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

برنامه ۲۰.۱: *fragment shader to use texture*

```
1 #version 330 core
2 out vec4 FragColor;
3 ...
4 in vec2 TexCoord;
5
6 uniform sampler2D ourTexture;
7
8 void main()
9 {
10     //built in texture function for sampling texture to fragment
11     FragColor = texture(ourTexture, TexCoord);
12 }
```

نتیجه به شکل زیر در می آید:



شکل ۱.۶: colorful triangle

بخش دوم

فیزیک

فصل ۲

Physics

Particles ۱.۲

Rigid Bodies ۲.۲