

PGR - GPU, Rendering pipeline, OpenGL

Tomáš Milet

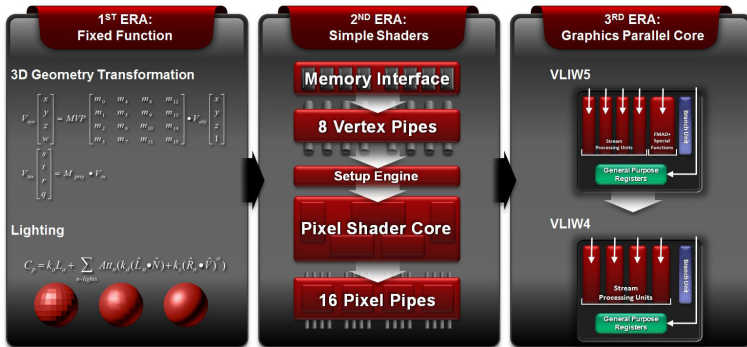
Brno University of Technology, Faculty of Information Technology
Božetěchova 1/2. 602 00 Brno - Královo Pole
imilet@fit.vutbr.cz



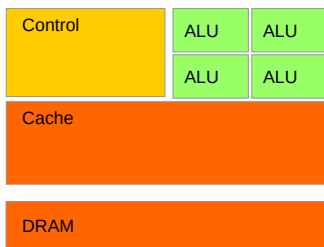
7. října 2021

Přehled architektury GPU

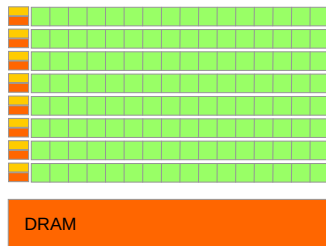
- Nejprve pouze 2D akcelerace
- Poté 3D akcelerace, specializovaný HW
- Dál částečně programovatelná pipeline
- Nyní velké množství výpočetních jednotek pro obecné výpočty (2D akcelerace emulovaná pomocí 3D)



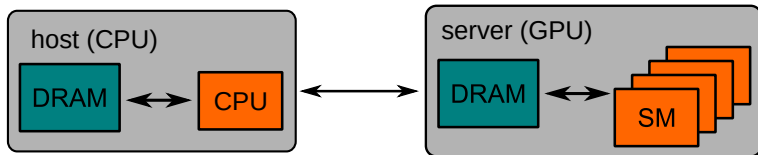
- CPU - málo, velmi výkonných výpočetních jednotek
- Velká keš, velké řízení, vykonávání instrukcí mimo pořadí, ...
- GPU - velké množství méně výkonných, jednodušších výpočetních jednotek
- Malé keše, malé řízení, víc tranzistorů pro výpočty, ...
- GPU - data parallel, náznak task parallel
- CPU - task parallel



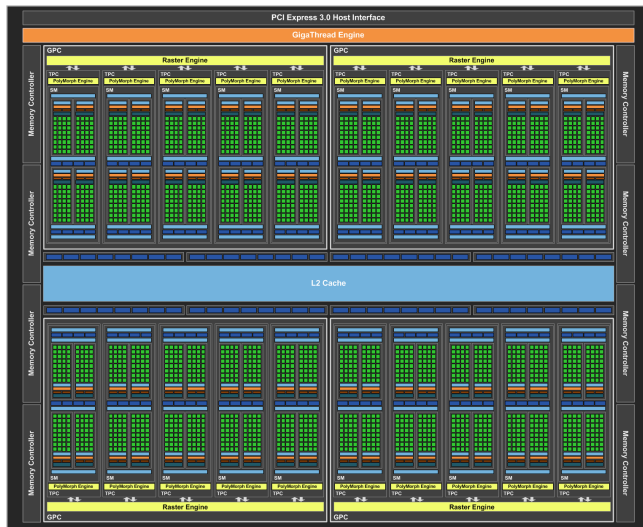
CPU



GPU

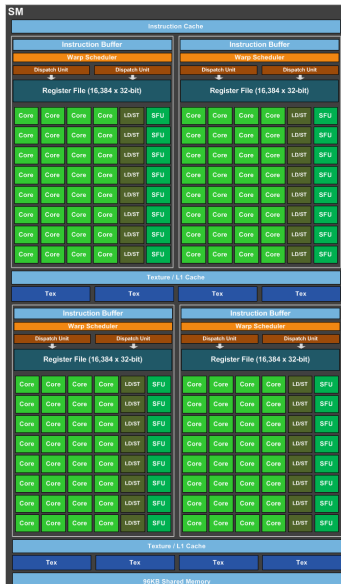


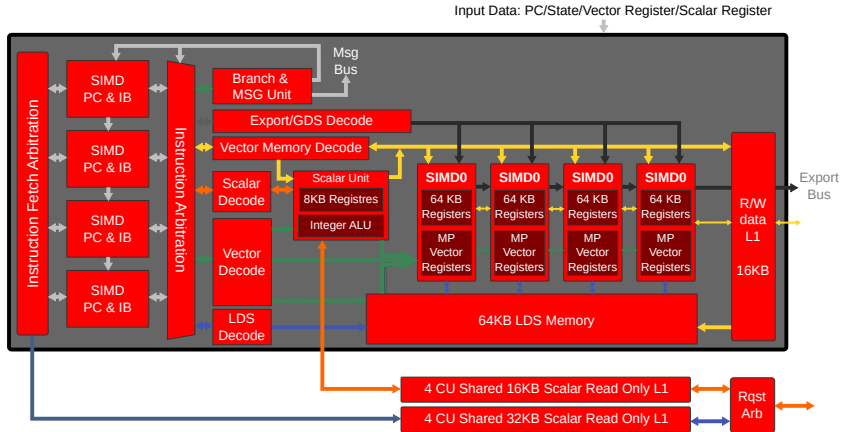
- Grafická karta je složena z několika multiprocesorů a grafické paměti.
- Nvidia - streaming multi processor (SM).
- AMD - compute unit (CU).
- Tento multiprocessor je dále složen z velkého množství jader a různých druhů pamětí.
- Akce, která běží na jednom multiprocesoru je nezávislá na akci, která běží na jiném multiprocesoru.
- Jádra bývají označována jako shader unit (AMD Radeon HD7970M 20xCU, 64 shader unit na CU, = 1280 shader unit).



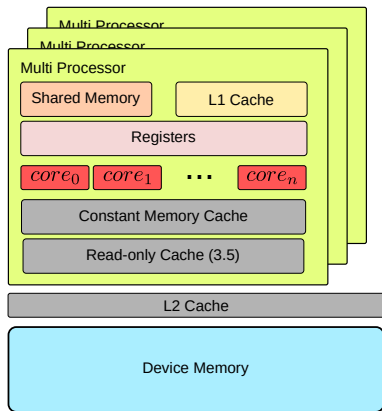








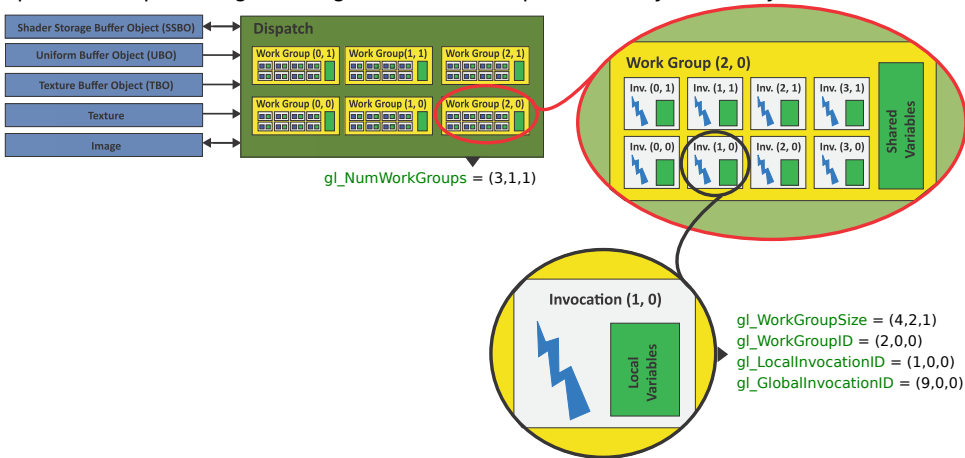
- Dnešní GPU jsou značně programovatelné
- Některé části stále zůstávají hardwarově zadrátované
- Rasterizace - převod trojúhelníků na fragmenty
- Tessellace - rozřezání polygonů na mnoho podpolygonů
- Texturovací jednoty - filtrování, opakování na okrajích, ...
- Depth buffer, Stencil buffer, ...
- A další
- Ke většině lze přistoupit pouze z některých API (OpenGL, Vulkan, DirectX)

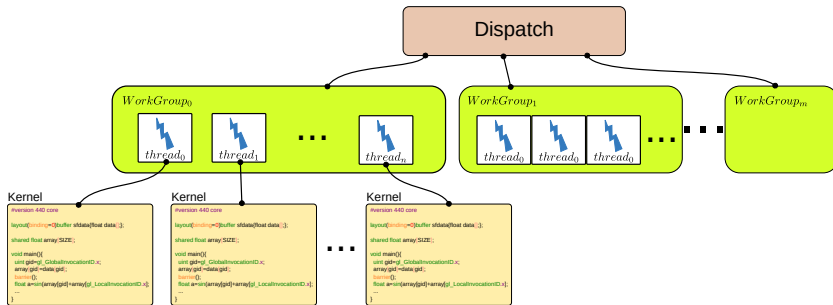


- Spousta různých pamětí s různou velikostí a rychlostí.
- Obecně platí, čím blíže k jádru, tím rychlejší a tím menší.
- Registry jsou nejrychlejší (na Kepleru jich je $65536 \times 32\text{bit}$).
- Sdílená paměť slouží pro komunikaci mezi vlákny.
- Device memory (global memory) je velká (2GB i více), ale pomalá paměť.

- Na GPU použijeme instance kernelů - vlákna.
- Kernel je program složený z instrukcí (podobně jako shader) a běží ve vlákně.
- Instrukce v kernelu jsou spouštěny v mnoha instancích na jádrech SM.
- Vlákna (thread, invocation, work-item) jsou seskupovány do pracovních skupin (work-group).
- Vlákna v pracovních skupinách mohou být na sobě závislá.
- Skupiny mohou být 1D, 2D, 3D (určuje pořadí vláken a jejich index).
- Mnoho work-group tvoří dispatch (také může být 1D, 2D, 3D).
- Terminologie se liší (OpenCL, Cuda, Compute Shader, ...).

OpenGL Compute Programming Model and Compute Memory Hierarchy

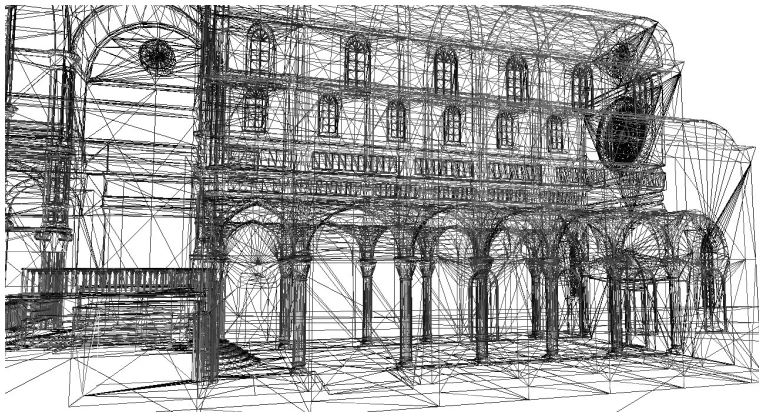




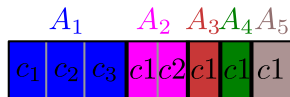
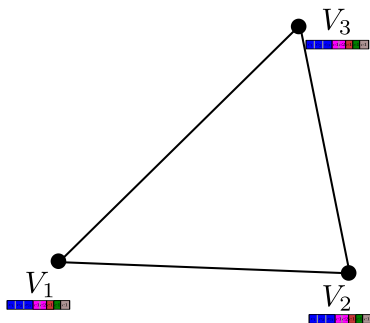
- Vlákna jsou seskupena do skupin work-group.
- Work-group může být 1D, 2D, 3D.
- Work-groupy jsou seskupeny do dispatch.
- Dispatch může být také 1D, 2D, 3D.
- Na jeden SM se může pustit vícero Work-group, pokud na to vystačí zdroje (registry, sdílená paměť)!

Reprezentace modelu

- Povrchová reprezentace - vektorová data.



- OpenGL pracuje s vrcholy - Vertexy
- Jeden Vertex může obsahovat několik různých atributů (pozice, barva, čas, hmotnost, texturovací koordináty,...)
- Několik Vertexů tvoří jedno primitivum - bod, úsečka, trojúhelník,...



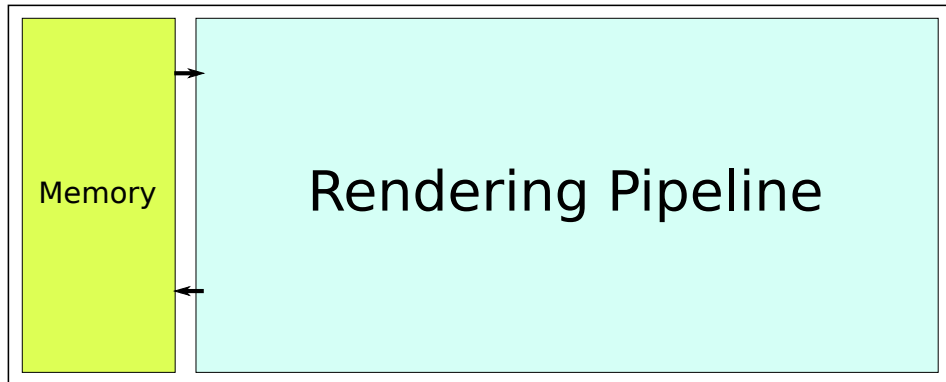
**Jeden Vertex
obsahuje 5 atributů
1. atribut je složen ze 3
složek**



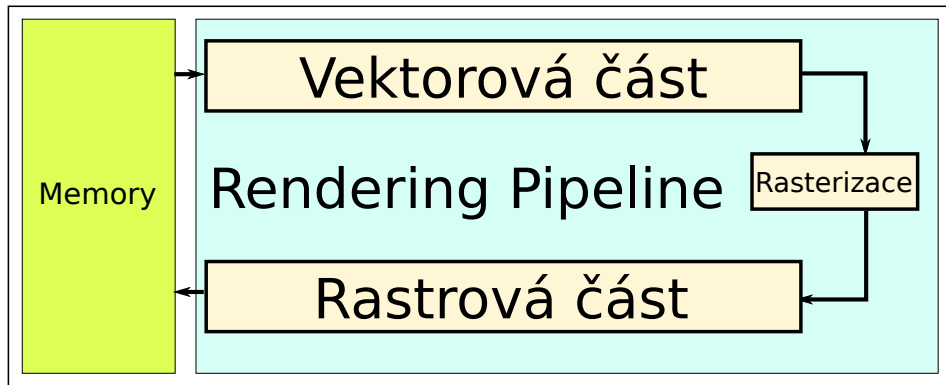
**Vertex Buffer Object (VBO)
obsahuje seznam Vertexů**

Zobrazovací řetězec

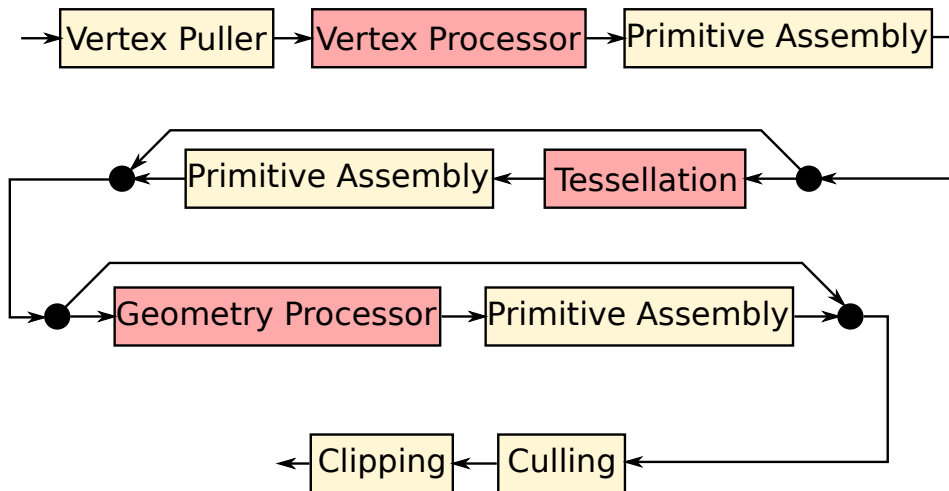
- GPU je rozděleno na paměť a vykreslovací řetězec.



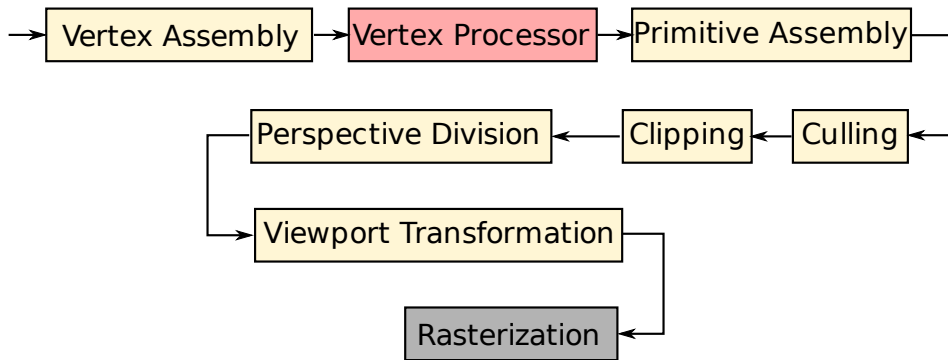
- Zobrazovací řetězec je rozdělen na 2 části - vektorovou a rastrovou.
- Dělicím prvkem je rasterizace.



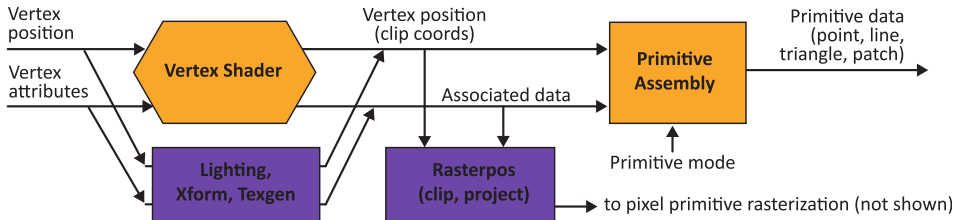
- Vektorová část řetězce je složena z mnoha bloků.
- Některé bloky jsou programovatelné a některé vynechatelné.



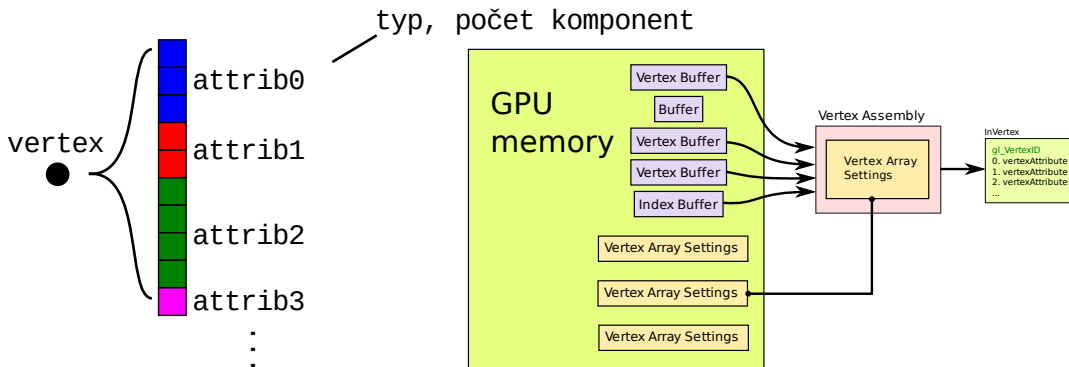
- Pokud vynecháme volitelné bloky, zůstane zjednodušená vektorová část řetězce.



- Vertex Assembly sestavuje vrcholy
- Vertex processor transformuje vrcholy
- Primitive assembly sestavuje primitiva.

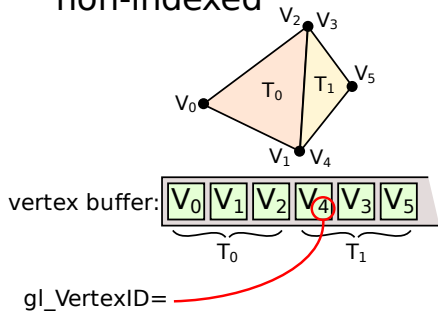


- Vertex je kolekce atributů
- Vertex Assembly jednotka se stará o sestavování vrcholů z bufferů.

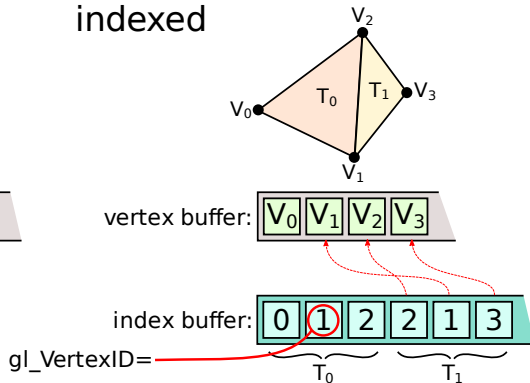


- Vertex Assembly může využít indexování
- Vertex Cache

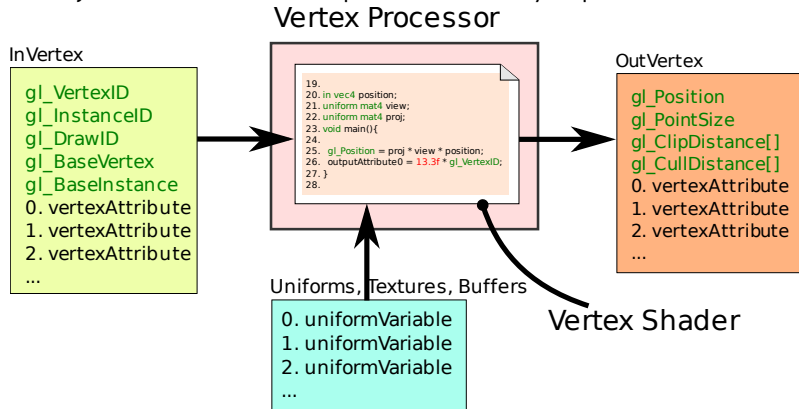
non-indexed



indexed

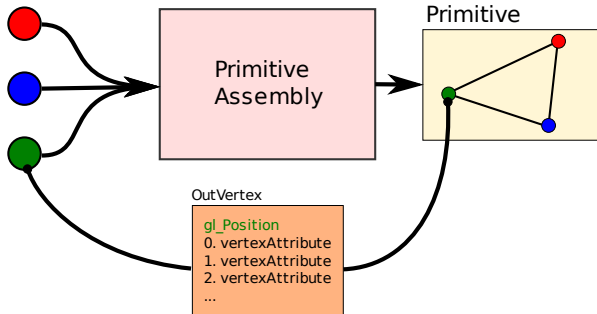


- Ve Vertex Processoru běží vertex shader.
- Vertex Shader je uživatelem specifikovaný program.
- Cílem je transformovat vstupní vrchol na výstupní vrchol.

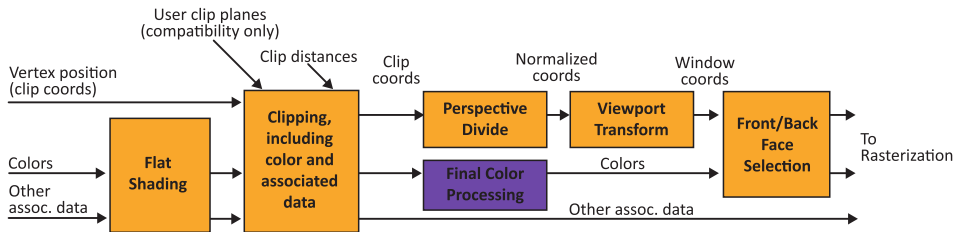


- Primitive Assembly jednotka sestavuje primitiva.
- Cílem je podle nastavení sestavovat trojúhelníky, úsečky, vrcholy.
- Základní primitiva (trojúhelník, úsečka) mohou být součástí složitějších primitive.
- Triangle Strip, Triangle Fan, Line Strip, Triangle Adjacency, Patch, ...

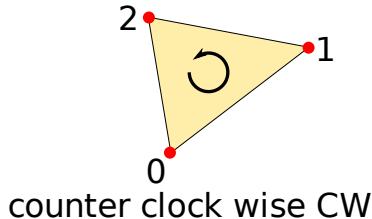
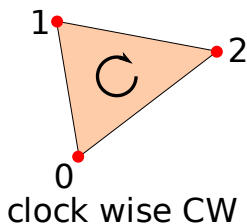
Out Vertices



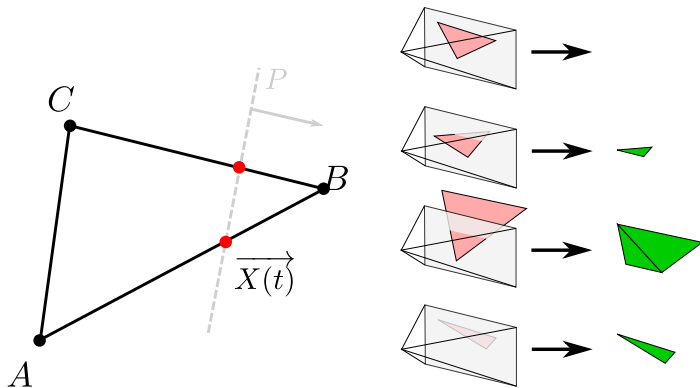
- Těsně před rasterizací se zahazují odvrácené trojúhelníky a zbylé se ořezávají pohledovým frustrem.



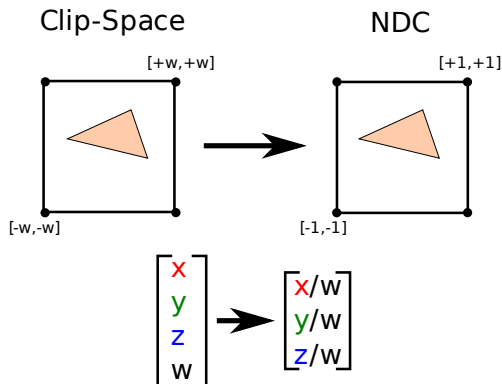
- Culling se stará o zahazování odvrácených trojúhelníků.
- Odvrácenost je rozhodnuta na základě pořadí vrcholů.
- Je možné nastavit, jestli je trojúhelník přivrácený nebo odvrácený, pokud jsou vrcholy po nebo proti směru hodinových ručiček.



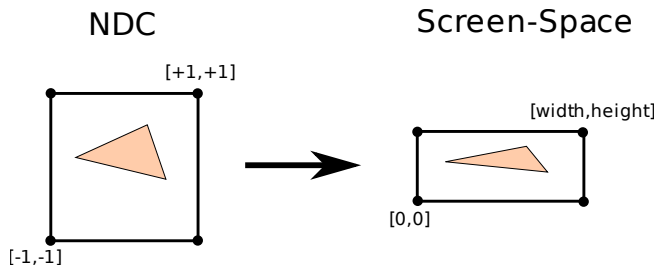
- Pokud je primitivum jen částečně uvnitř pohledového jehlanu, je potřeba jej oříznout.
- Obvykle stačí oříznout pomocí blízké ořezové roviny (near-plane).
- Pokud vznikne čtyřúhelník, je možné jej nahradit dvěma trojúhelníky.



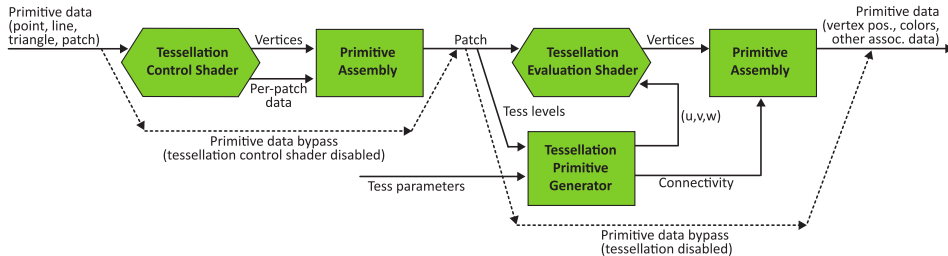
- Blok perspektivního dělení převádí homogenní souřadnice na kartézské.
- Dělí se pomocí W , ve kterém je uložena hloubka. Tím se zmenšují objekty, které jsou dál od kamera.
- Po perspektivním dělení všechny vrcholy leží v rozsahu $[-1, +1]$ - normalized device coordinates.



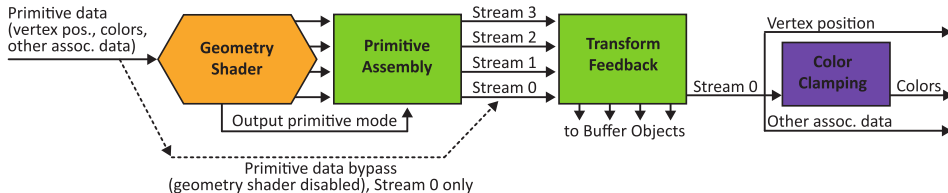
- Blok viewport transformace transformuje normalizované souřadnice na rozlišení plátna.



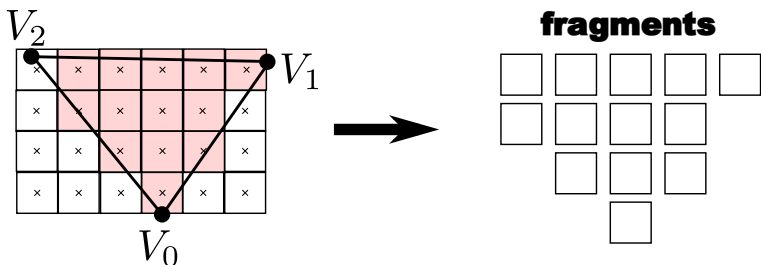
- Tessellace je složená zde 2 programovatelných processorů a hardwarového generátoru primitiv.



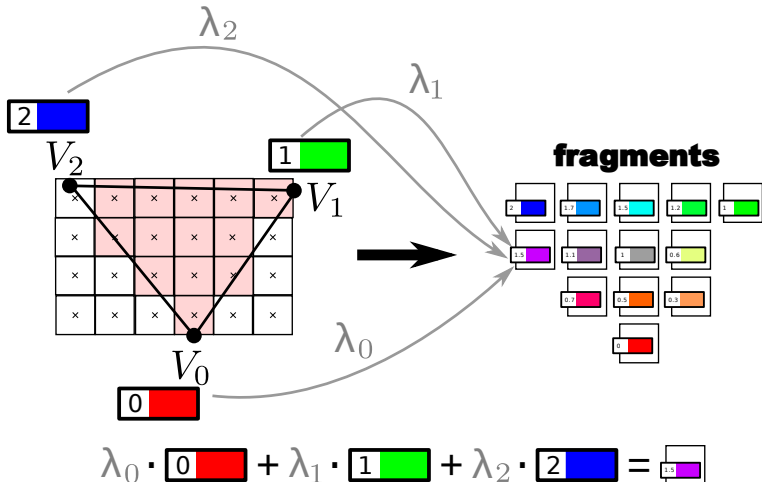
- Geometry processor transformuje primitiva.
- Transform feedback může primitiva přeposlat zpět do bufferu.

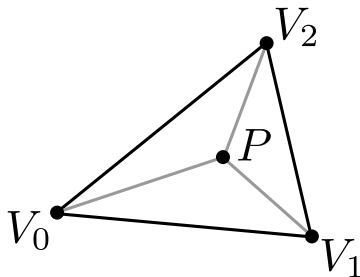


- Rasterizace produkuje fragmenty.
- Fragment je datová struktura, která vznikne na pozici vzorku (sampling point).
- Vzorkovací bod je obvykle uprostřed pixelu.
- Situace je komplikovanější při využití multi-samplingu.
- Pokud leží vzorkovací bod uvnitř trojúhelníku, vznikne fragment pro daný pixel.



- Vertexy jsou před rasterizací popsány pomocí n-tice atributů
- Rasterizace produkuje fragmenty, pokud jejich střed leží uvnitř primitiva
- Po rasterizaci jsou tyto atributy vloženy do fragmentů pomocí interpolace

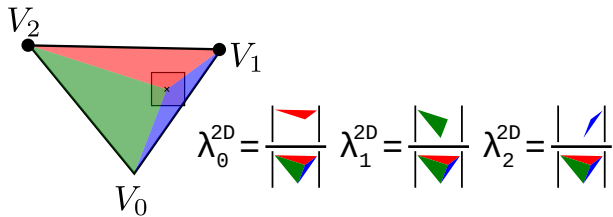




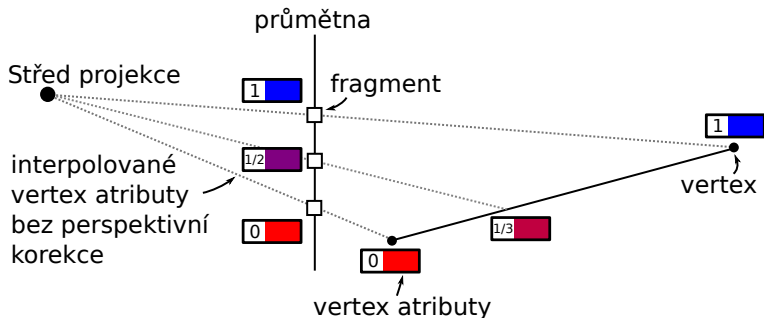
$$P = V_0 \cdot w_0 + V_1 \cdot w_1 + V_2 \cdot w_2$$

$$w_0, w_1, w_2 \in \langle 0, 1 \rangle$$

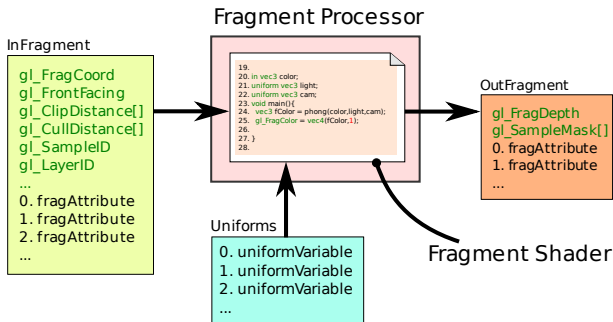
$$w_0 + w_1 + w_2 = 1$$

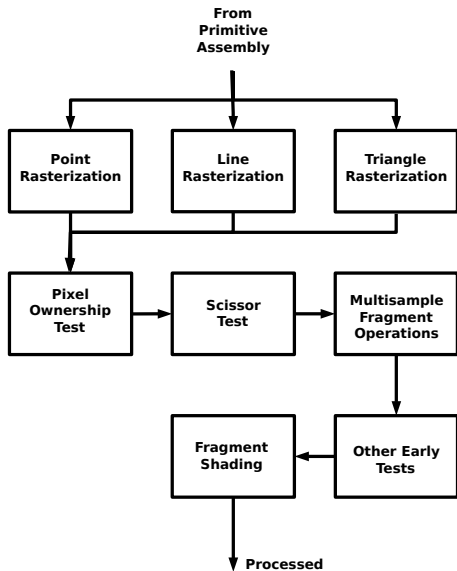


- Vertex atributy se mohou interpolovat v rovině průmětny nebo v prostoru scény
- Aby se mohlo interpolovat v prostoru scény, musí se provést perspektivní korekce (v OpenGL automaticky/lze vypnout)

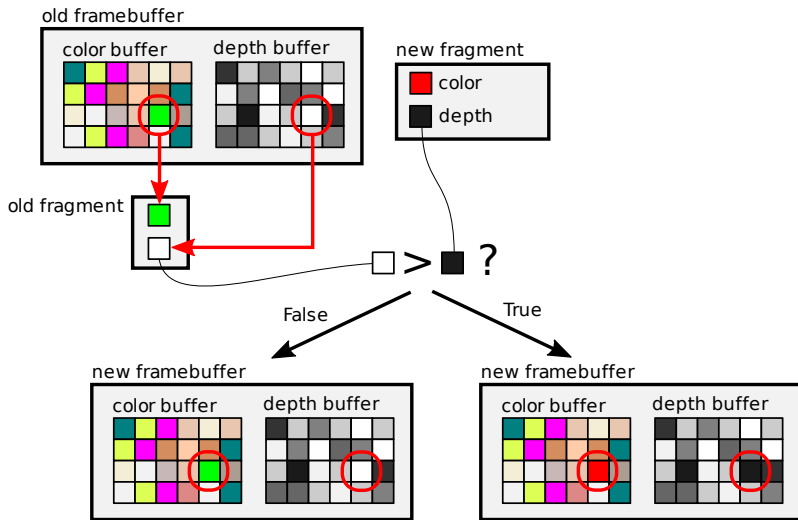


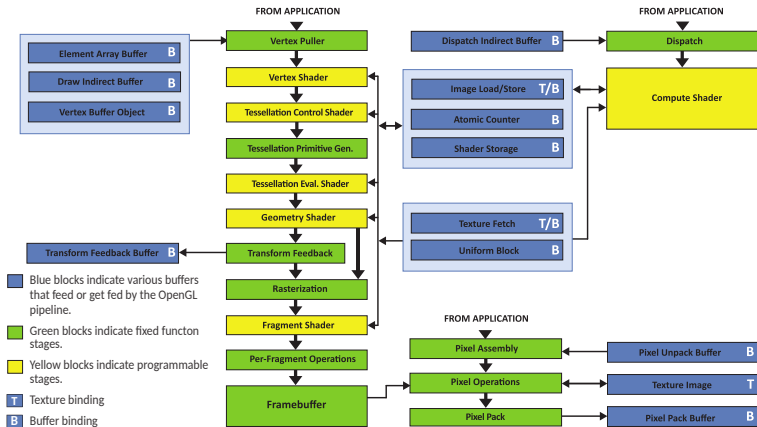
- Ve Fragment Processoru běží fragment shader.
- Fragment Shader je uživatelem specifikovaný program.
- Cílem je transformovat vstupní fragment na výstupní fragment.
- Multiple Render Target.





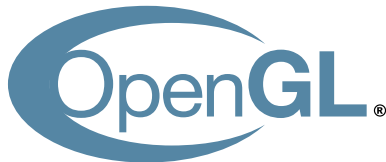






OpenGL

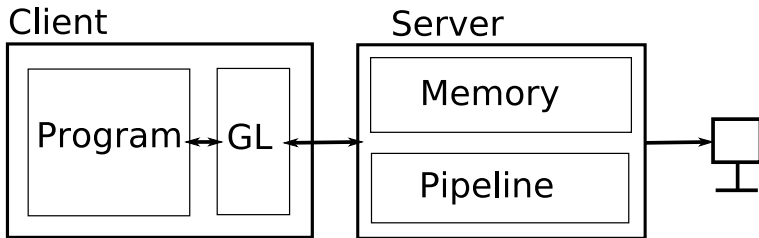
- OpenGL Open Graphics Language (Library)
- OpenGL je API pro 3D grafiku
- Vychází z IrisGL od SGI
- Platformně nezávislé
- Použitelné skoro z každého jazyka
- Slouží pro převod scény popsané primitivy (body, čáry trojúhelníky) na 2D rastr obrazovky.
- V novější verzi (4.3) i pro GPGPU
- Obsahuje vlastní jazyk GLSL pro programování GPU



- OpenGL je multiplatformní - Linux, Window, Mac Os X, Android,...
- OpenGL lze použít téměř z každého jazyka - C, C++, Python, Java, Javascript, ...
- OpenGL je zpětně kompatibilní
- OpenGL je nízkoúrovňové
- OpenGL má jednoduché API
- OpenGL je rychlé
- OpenGL je otevřený industriální standard
- WebGL

- OpenGL
 - 1.x - fixní pipeline
 - **2.x** - programovatelná pipeline
 - 3.x - geometry shader, **Deprecation**
 - 4.x - Hardwarová tessellace, dvojitá přesnost
 - 4.3 - Compute shadery
 - 4.5 - Direct State Access
- OpenGL ES
 - Vestavěné systémy, mobily, tablety
 - 1.x - fixní pipeline
 - **2.x** - programovatelná pipeline
 - 3.x - Occlusion queries, 3D textury, transform feedback
- WebGL
 - OpenGL ve webovém prohlížeči
 - **Velmi podobné OpenGL ES**

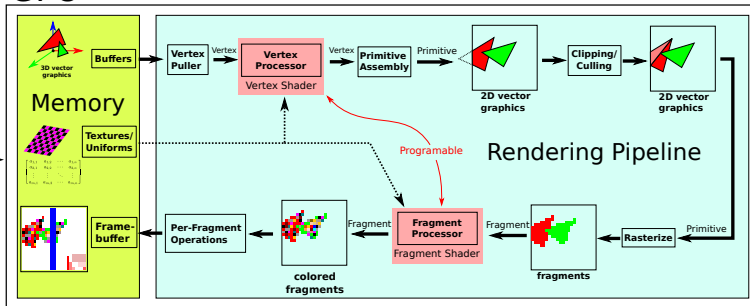
- OpenGL je architektura klient server
- Aplikace běží na CPU a využívá OpenGL pro přístup k GPU



CPU

1. upload data to buffers
2. prepare shaders
3. setup vertex puller
4. setup uniforms
5. execute draw call

GPU



- Jednoduché rozhraní
 - Pouze C funkce
 - Data jsou jen čísla a pole
 - Žádné struct, class
- Stavový stroj
 - Většina příkazů nastavuje stav pipeline
 - Stav se sám nemění
- OpenGL (Rendering) Context
 - Hlavní objekt OGL
 - Mimo OpenGL (WGL/GLX)
 - Zapouzdřuje data, stav, napojení na výstup

`glNameNT(...)`

- N - počet parametrů
- T - typ parametrů

b	8b integer	signed char	GLbyte	GLvoid
s	16b integer	short	GLshort	
i	32b integer	long	GLint, GLsizei	
f	32b float	float	GLfloat, GLclampf	
d	64b float	double	GLdouble, GLclampd	
ub	8b unsigned	unsigned char	GLubyte, GLboolean	
us	16b unsigned	unsigned short	GLushort	
ui	32b unsigned	unsigned long	GLuint, GLenum, GLbitfield	
*v	Ukazatel a *			

`glUniform2f(GLuint, GLfloat, GLfloat); GLvoid glUniform2fv(GLuint, GLfloat*);`

OpenGL příkazy lze rozdělit do několika skupin

- **Příkazy pro správu OpenGL objektů (10 hlavních OpenGL objektů)**
- **Exekuční příkazy (kreslicí a výpočetní příkazy)**
- **Stavové příkazy (nastavují globální stav OpenGL, příkazy pro zjištění stavu)**
- Debugovací příkazy
- Operace s framebufferem
- Příkazy pro synchronizaci (glFinish)
- Utilitní příkazy

```
GLvoid glGenObjects(GLsizei n, GLuint * objects);
```

```
GLvoid glDeleteObjects(GLsizei n, const GLuint * objects);
```

- Jméno objektu - GLuint, všechny objekty jsou v API reprezentovány integerem
- 0 rezervována pro prázdný objekt

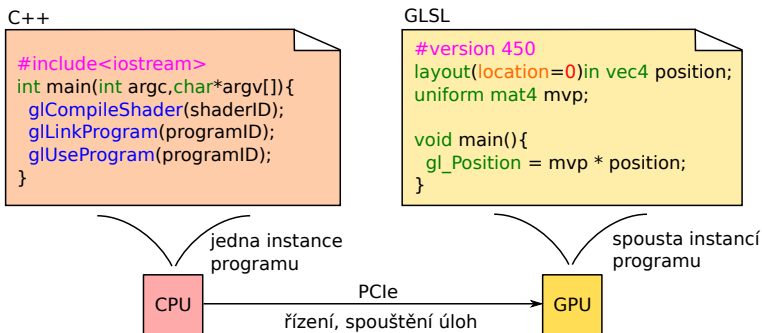
Objekty:

- **Program**
- **Shader**
- **Buffer**
- **Vertex Array Object**
- Texture
- Framebuffer
- Renderbuffer
- Sampler
- Asynchronous Query
- ProgramPipeline

- Pro vykreslení grafiky pomocí OpenGL je potřeba inicializovat několik objektů
- Shader Program(y), Buffer(y), Vertex Array Object(y)
- Inicializace spočívá v kompilaci a likování programů
- Alokaci a kopírování dat na GPU
- Konfigurace stavů OpenGL a konfigurace čtení z GPU paměti
- Spuštění kreslení pomocí vykreslovacích příkazů

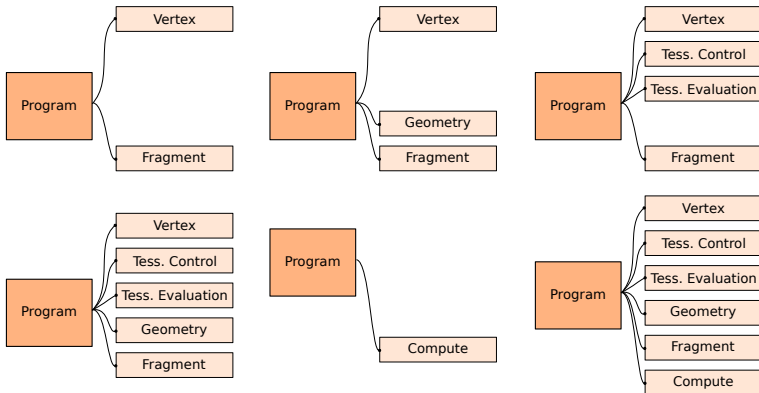
Příprava programů a shaderů pro GPU

- OpenGL standard popisuje i jazyk GLSL
- Jazyk GLSL popisuje programy, které běží na GPU
- Programátor 3D grafiky píše aplikaci vždy ve 2 jazycích



- Program, který běží na GPU se v OpenGL označuje jako Shader Program
- Shader Program je složen z několika částí (stages), které se nazývají Shader
- Existuje 6 typů shaderů: **vertex**, **fragment**, geometry, tessellation control, tessellation evaluation a compute shader.
- Program nemusí obsahovat všechny typy shaderů.
- Jednotlivé shadery lze sdílet mezi vícero programy.
- Shadery se kompilují (za běhu aplikace)
- Programy se linkují (za běhu aplikace)

Validní a často používané kombinace shaderů:



```
template<typename...ARGS>
GLuint compileShader(GLenum type, ARGS... sources){
    std::vector<std::string>str = {std::string(sources)...};
    std::vector<const GLchar*>ptr;
    for(auto const&x:str)ptr.push_back(x.c_str());

    //reserve shader id
    GLuint id = glCreateShader(type);

    //set shader sources
    glShaderSource(id, (GLsizei)ptr.size(), ptr.data(), nullptr);

    //compile shader
    glCompileShader(id);

    //get compilation log
    GLint bufferLen;
    glGetShaderiv(id, GL_INFO_LOG_LENGTH, &bufferLen);
    if(bufferLen>0){
        char*buffer = new char[bufferLen];
        glGetShaderInfoLog(id, bufferLen, nullptr, buffer);
        std::cerr<<buffer<<std::endl;
        delete[]buffer;
        return 0;
    }
    return id;
}
```

```
template<typename...ARGS>
GLuint createProgram(ARGS...args) {
    //reserve program id
    GLuint id = glCreateProgram();

    //attach all shaders
    auto dummy0 = {(glAttachShader(id,args),0)...};
    (void) dummy0;

    //link program
    glLinkProgram(id);

    //get linking log
    GLint bufferLen;
    glGetProgramiv(id, GL_INFO_LOG_LENGTH, &bufferLen);
    if (bufferLen > 0) {
        char* buffer = new char[bufferLen];
        glGetProgramInfoLog(id, bufferLen, nullptr, buffer);
        std::cerr << buffer << std::endl;
        delete[] buffer;
        glDeleteProgram(id);
        id = 0;
    }
    //mark shaders for deletion
    auto dummy1 = {(glDeleteShader(args),0)...};
    (void) dummy1;
    return id;
}
```

```
#include<iostream>
#include<fstream>

std::string loadFile(std::string fileName){
    std::ifstream f(fileName.c_str());
    if(!f.is_open()){
        std::cerr<<"file: "<<fileName<<" does not exist!"<<std::endl;
        return 0;
    }
    std::string str((std::istreambuf_iterator<char>(f),
        std::istreambuf_iterator<char>()));
    f.close();
    return str;
}

int main(int32_t argc, char*argv[]){
    ...
    GLuint program = createProgram(
        compileShader(GL_VERTEX_SHADER ,loadFile("flag.vp")),
        compileShader(GL_FRAGMENT_SHADER,loadFile("usefulFunctions.fp"),
            loadFile("flag.fp")));
    ...
}
```

- GLSL - OpenGL Shading Language
- Slouží pro popis programů, které běží na GPU
- Je odvozený od C
- Neobsahuje rekurzi, třídy, výjimky, std knihovny
- Obsahuje vektorové a maticové typy, vestavěné funkce, vestavěné proměnné, synchronizační funkce, typové kvalifikátory, rozšířené adresování vektorů
- Každý shader musí obsahovat main funkci
- Každá main funkce je vykonávána v mnoha instancích v dané části pipeline
- Některé části pipeline mají speciální nastavení


```
#version 450

void main() {
    //32 bit integer
    int a;
    //32 bit unsigned integer
    uint b;
    //32 bit float
    float c;
    //vector of 4 ints
    ivec4 d;
    //vector of 3 floats
    vec3 e = vec3(1,2,3);
    //matrix 3x3 of floats
    mat3 m;
    //zeroth element of e
    e[0] == e.x == e.r;
    //swizzling
    vec2 f = e.xy; // (1,2)
    f = e.zz; // (3,3)
    //matrix vector multiplication
    e = m*e;
    //constructing ivec4 from vec3 and scalar
    d = ivec4(c,4);
    d = ivec4(c.xx,c.yy);
}
```

```
abs acos acosh asin asinh atan atanh ceil cos cosh degrees exp exp2 floor fract inversesqrt
log log2 max min mod modf pow radians round roundEven sign sin sinh sqrt tan tanh trunc
clamp cross distance dot floatBitsToInt floatBitsToUint fma frexp intBitsToFloat isinf
isnan ldexp length mix normalize smoothstep step
```

```
packDouble2x32 packSnorm4x8 packUnorm2x16 packSnorm2x16
packUnorm4x8 uintBitsToFloat unpackDouble2x32 unpackSnorm4x8 unpackUnorm2x16
unpackSnorm2x16 unpackUnorm4x8 packHalf2x16 unpackHalf2x16
```

```
all any bitCount bitfieldExtract bitfieldInsert bitfieldReverse determinant equal
faceforward findLSB findMSB greaterThan greaterThanEqual imulExtended inverse lessThan
lessThanEqual matrixCompMult not notEqual outerProduct reflect refract transpose uaddCarry
umulExtended usubBorrow
```

```
textureSize textureQueryLod texture textureProj textureLod
textureOffset texelFetch texelFetchOffset textureProjOffset textureLodOffset textureProjLod
textureProjLodOffset textureGrad textureGradOffset textureProjGrad textureProjGradOffset
textureGather textureGatherOffset textureGatherOffsets textureQueryLevels
```

```
dFdx dFdy fwidth
interpolateAtCentroid interpolateAtOffset interpolateAtSample
```

```
noise1 noise2 noise3 noise4
```

```
EmitStreamVertex EndStreamPrimitive EmitVertex EndPrimitive
```

```
barrier memoryBarrier
memoryBarrierAtomicCounter memoryBarrierBuffer memoryBarrierImage memoryBarrierShared
groupMemoryBarrier
imageSize
```

```
atomicAdd atomicMin atomicMax atomicAnd atomicOr atomicXor atomicExchange atomicCompSwap
```

```
imageSize imageLoad imageStore imageAtomicAdd imageAtomicMin imageAtomicMax
imageAtomicAnd imageAtomicOr imageAtomicXor imageAtomicExchange imageAtomicCompSwap
```

```
#version 450

//promenna a je plnena predchazejici shader stage nebo
//z bufferu GL_ARRAY_BUFFER
//read only
in vec4 a;

//hodnota b bude viditelna v dalsi shader stage nebo
//ve framebufferu
//write only
out vec4 b;

//hodnoty promennych a,b se meni s kazdou invokaci shaderu

//promenna m je ulozena v konstantni pameti, lze ji vycist
//ve vseh shader stage
//read only
uniform mat4 m;

//hodnota m je nemenna pro vsechny invokace shaderu

//promenna d je typu textury (obrazek), je to opaque type, ktery
//lze cist jen pomoci specialnich funkci
//read only
uniform sampler2D d;

//promenna e je lokalni, je ulozena v registru, kazda
//invokace shaderu ma svoji vlastni
vec4 e = vec4(0,1,2,3);

void main(){
    b = e + m * texture(d,a.xy);
}
```

Vertex Shader obsahuje několik důležitých vestavěných proměnných

```
#version 450

void main() {
    //vystupni promenna, sem se zapisuje pozice vrcholu
    //po perspektivni projekci
    vec4 gl_Position;

    //cislo vrcholu
    in int gl_VertexID;
    //cislo instance
    in int gl_InstanceID;
    //cislo draw callu
    in int gl_DrawID;
    //velikost primitiva typu bod
    out float gl_PointSize;
    out float gl_ClipDistance[];
    out float gl_CullDistance[];
}
```

Fragment Shader obsahuje několik důležitých vestavěných proměnných. Výstup fragment shaderu si specifikuje programátor pomocí vlastní výstupní proměnné.

```
#version 450

//vlastni vystup, namapuje se na 0. barevny framebuffer
layout(location=0)out vec4 fColor;

void main(){
    //koordinaty fragmentu ve viewportu
    in vec4 gl_FragCoord;

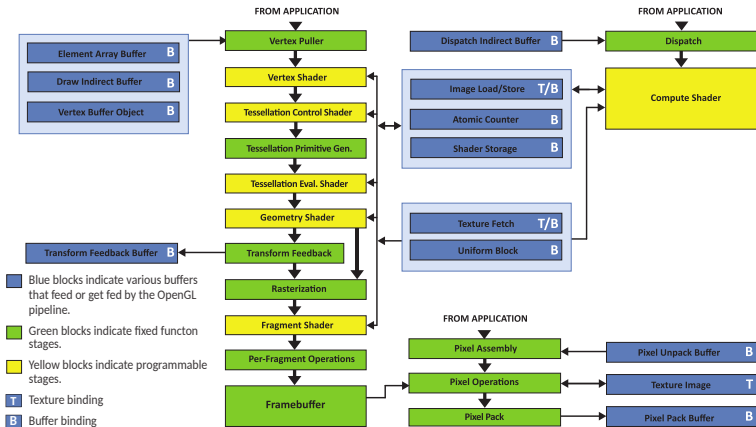
    //vznikl fragment z privracene strany primitiva
    in bool gl_FrontFacing;

    //pro modifikaci hloubky fragmentu
    //pri zapisu vypina brzky depth test
    out float gl_FragDepth;

    in float gl_ClipDistance[];
    in float gl_CullDistance[];
    in int gl_PrimitiveID;
}
```

Příprava bufferů

- Buffer je objekt zastřešující lineární paměť na GPU
- Může obsahovat jakákoliv data
- Nejčastěji se používá pro uložení vrcholů geometrie (a jejich vlastností), indexů na vrcholy a materiálů
- Buffer lze připojit na několik přípojných míst OpenGL pipeline (binding points)
- Binding point udává sémantiku bufferu
- Pro vrcholy se používá `GL_ARRAY_BUFFER`, buffer se pak nazývá Vertex Buffer Object (VBO)
- Pro indexy se používá `GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER`, Element Buffer Object (EBO)
- Pro obecná data se používá `GL_SHADER_STORAGE_BUFFER`



Vytvoření bufferu.

```
float data[]={1,2};//data, která budeme vkladat do bufferu  
GLuint vbo;//identifikátor VBO  
glCreateBuffers(1,&vbo);  
//alokujeme buffer a nahrajeme do něj data  
glNamedBufferData(vbo, sizeof(data), data, GL_STATIC_DRAW);
```

Změna dat ve VBO.

```
float*ptr;//ukazatel na data  
ptr=(float*)glMapNamedBuffer(vbo, GL_READ_WRITE);//namapujeme buffer  
ptr[0]=0.5;//nastavíme hodnotu prvního prvku  
glUnmapNamedBuffer(vbo);//odmapujeme buffer, komitujeme změny do GPU
```

Nebo pomocí glNamedBufferSubData.

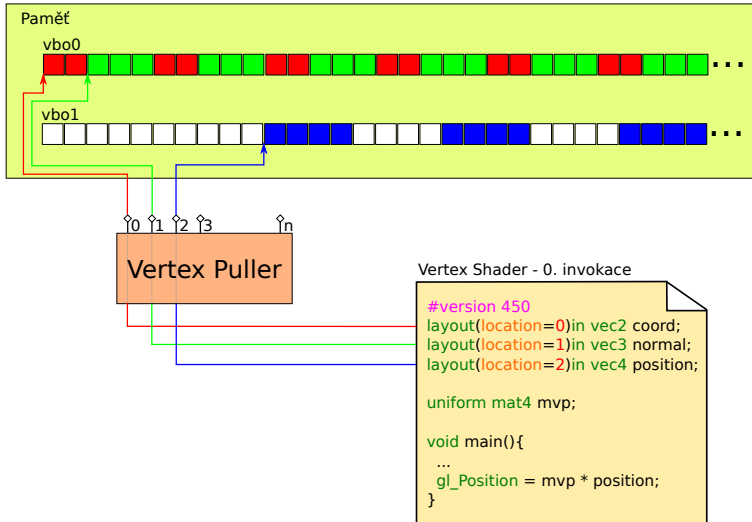
```
glNamedBufferSubData(vbo,  
    sizeof(float),//nahrajeme nová s offsetem jeden float  
    sizeof(float),//nahrajeme jen jeden float  
    data);//data
```

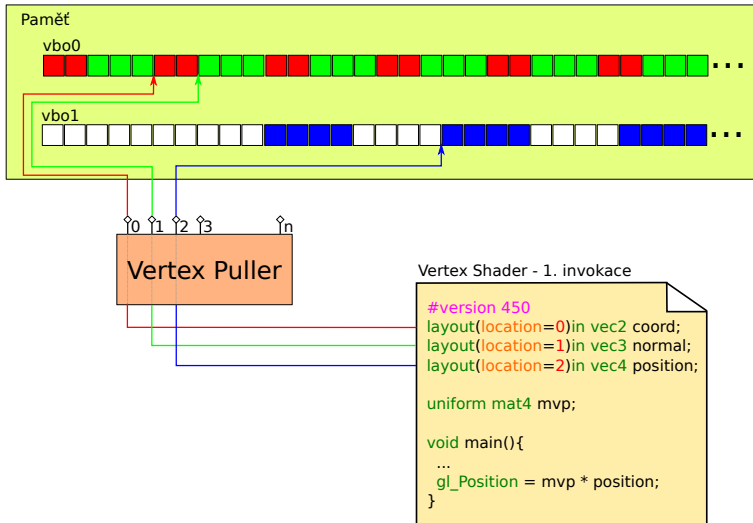
Nabindování bufferu.

```
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vbo);
```

Konfigurace Vertex Pulleru/Vertex Array Object

- Vertex Array Object (VAO) obsahuje konfiguraci Vertex Puller jednoty.
- Vertex Puller čte data z bufferů a plní je do vstupních proměnných v prvním shaderu (vertex shader)
- VAO obsahuje nastavení propojení Shader Programu a Bufferů
- V novějších verzích OpenGL je povinný
- Obsahuje sadu nastavení pro každý Vertex Attribut a nastavení pro indexový buffer
- Jeden Vertex Attribut je napojen na jednu vstupní proměnnou ve Vertex Shaderu
- Mezi nastavení Vertex Attributu patří: číslo bufferu, velikost a typ datové položky, prokládání (stride), offset





```
GLuint vao;
glCreateVertexArrays(1,&vao);//vygenerovani jmena VAO
//nyni nastavime buffery a atributy

glVertexArrayAttribBinding(vao,0,0);
glEnableVertexArrayAttrib(vao,0);
glVertexArrayAttribFormat(vao,
    0,//cislo vertex atributu
    2,//pocet polozek pro cteni (vec2)
    GL_FLOAT,//typ polozek
    GL_FALSE,//normalizace
    0);//relativni offset
glVertexArrayVertexBuffer(vao,0,
    vbo,
    sizeof(float)*5,//stride
    (GLvoid*)(sizeof(float)*0));//offset

glVertexArrayAttribBinding(vao,1,1);
glEnableVertexArrayAttrib(vao,1);
glVertexArrayAttribFormat(vao,1,3,GL_FLOAT,GL_FALSE,0);
glVertexArrayVertexBuffer(vao,1,vbo,sizeof(float)*5,
    (GLvoid*)(sizeof(float)*2));

glVertexArrayAttribBinding(vao,2,2);
glEnableVertexArrayAttrib(2);
glVertexArrayAttribFormat(2,4,GL_FLOAT,GL_FALSE,0);
glVertexArrayVertexBuffer(vao,2,vbo,sizeof(float)*8,
```

```
glVertexArrayAttribBinding(GLuint vao, GLuint attribIndex, GLuint bindingIndex);  
glVertexArrayAttribFormat(GLuint attribIndex, GLint size, GLenum type, GLboolean normalized, GLuint relativeoffset);
```

Vertex Shader

```
layout(location = 0) vec4 position;  
layout(location = 2) ivec2 gridId;  
layout(location = 7) float velocity;  
  
void main(){  
  ...  
}
```

Vertex Array Object

$BindingIndex_0$
 $BindingIndex_1$
⋮
 $BindingIndex_n$
 $ElementBuffer$

States

Buffer, Offset, Stride
Buffer, Offset, Stride
⋮
Buffer, Offset, Stride

```
glBindVertexBuffer(GLuint bindingIndex, GLuint buffer, GLintptr offset, GLsizei stride);  
...
```

Kreslení a uniformní proměnné

- Uniformní proměnné jsou uloženy v konstantní paměti
- Narozdíl od vertex atributů se v průběhu kreslení nemění
- Každá invokace shaderu adresuje stejnou hodnotu
- Uniformní proměnné lze využít ve všech shader stage
- Uniformní proměnné jsou vhodné například pro uložení matic, barvy, světla
- Stejně jako objekty v OpenGL zastupuje integerová hodnota, tak i každá uniformní proměnná má svoje integerové jméno
- Toto jméno lze získat z Shader Programu pomocí specializovaných funkcí

- 1 Vytvoření Shader Programu
- 2 Získání integerového jména pomocí jména proměnné v shaderu
- 3 Aktivování Shader Programu
- 4 Nahrání dat pomocí vhodné OpenGL funkce

```
GLuint program = 0;
GLint colorUniform = -1;
void init() {
    //sestaveni programu
    program = createProgram(
        compileShader(GL_VERTEX_SHADER, loadFile("flag.vp")),
        compileShader(GL_FRAGMENT_SHADER, loadFile("flag.fp")));
    //ziskani integeroveho jmena z promenne "color" v shaderu
    colorUniform = glGetUniformLocation(program, "color");
}
```

```
#version 450

layout(location=0) out vec4 fColor;
uniform vec3 color; //uniformni promenna
void main() {
    fColor = vec4(color, 1);
}
```

- 1 Aktivování programu
- 2 Nastavení uniformních proměnných
- 3 Aktivování Vertex Array Objectu
- 4 Zavolání vykreslovacího příkazu

```
void draw() {
    //vymazani barevneho framebuffer
    glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);

    //aktivovani program
    glUseProgram(program);

    //nastaveni uniformni promenne
    glProgramUniform3fv(program, colorUniform, 1, 0, 0);

    //aktivovani vao
    glBindVertexArray(vao);

    glDrawArrays(GL_TRIANGLES, //vykresleni
        0, //typ primitiva
        3); //prvni Vertex
    //pocet Vertexu pro vykresleni 3 -> 1 trojuhelnik

    //deaktivovani vao
    glBindVertexArray(0);
}
```

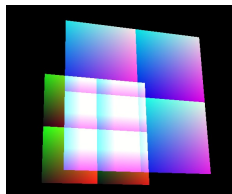
Per fragment operace

- Po fragment shaderu jsou na fragmenty aplikovány Per fragment operace
- Nejzákladnější operací je řešení viditelnosti pomocí depth testu
- Viditelnost se v OpenGL řeší pomocí Depth Buffer (paměť hloubky)
- Další testy jsou Stencil test a Scissor test
- Mezi jiné operace patří Blending, který se využívá pro průhledné objekty

- Depth test řeší viditelnost pomocí Depth Bufferu a to na úrovni fragmentů
- Různé způsoby nastavení
- Přesnost depth bufferu není nekonečná (většinou 24 bitů)
- Častý problem depth bufferu je jev známý jako depth Fight
- Brzký depth test - depth test může předběhnout vykonávání fragment shaderu
- Brzký depth test se provádí tehdy, pokud se ve fragment shaderu nemodifikuje hloubka fragmentu
- Brzký depth test může značně urychlit kreslení

```
glEnable(GL_DEPTH_TEST); //zapneme depth test - nastavi se stav pipeline
glDepthFunc(GL_EQUAL); //fragment s mensi nebo stejnou hloubkou projde
glDepthMask(GL_TRUE); //maskovani zapisu do depth bufferu
```

- Blending umožňuje kombinovat novou barvu s již zapsanou barvou ve framebufferu
- Blending je řízen pomocí blendovací operace, source a destination faktorů
- Blendovací operace jsou sčítání, odčítání, min, max, ...
- Source faktor se aplikuje na barvu fragmentu
- Destination faktor se aplikuje na barvu již uloženou ve framebufferu
- Nutnost kreslit ve správném pořadí



```
glEnable(GL_BLEND); //zapneme blending
glBlendEquation(GL_FUNC_ADD); //barvy se budou scitat
glBlendFunc(GL_SRC_ALPHA, GL_ONE_MINUS_SRC_ALPHA); //nastavime zpusob michani
```

OpenGL kontext, knihovny

SDL - Simple Directmedia Layer

- IO, okna, zvuky, vlákna, ...

GLM - GL mathematics

- Práce s vektory a maticemi

GLEW - OpenGL Extension Wrangler

- OpenGL rozšíření

GLUT - GL Utility Toolkit (IO, okna, ...)

GLEE - GL Easy Extension library

GLAUX - GL Auxiliary Library (IO, okna, ...)

GLFW - (IO, okna, ...)

- `glxext.h`
- `void* wglGetProcAddress(const char* name);`
- `void* glXGetProcAddress(const char* name);`
- `PFNGLNECOPROC glNeco=(PFN...)wglGetProcAddress("glNeco");`
- `glGetString(GL_EXTENSIONS);`
- `GL_XYZ_name`
- `GL_ARB_multisample`
- `GL_EXT_blend_func_separate`
- `IBM,NV,ATI,SGIS,...`
- `GLEE/GLEW`

- OpenGL kontext zapouzdřuje vškeré nastavení OpenGL
- Zastřešuje všechny objekty (buffer, programy, textury, ...)
- Po jeho uvolnění, nejsou již data na GPU přístupná
- OpenGL kontext není popsán v OpenGL specifikaci a lze jej vytvořit z externích knihoven
- Kontext má svoji verzi (vertex OpenGL), možnost aktivovat debugging, a různé profily

```
//vytvoreni okna v SDL2
unsigned version = 450; //context version
unsigned profile = SDL_GL_CONTEXT_PROFILE_CORE; //context profile
unsigned flags = SDL_GL_CONTEXT_DEBUG_FLAG; //context flags
SDL_Init(SDL_INIT_VIDEO); //init. video
SDL_GL_SetAttribute(SDL_GL_CONTEXT_MAJOR_VERSION, version/100 );
SDL_GL_SetAttribute(SDL_GL_CONTEXT_MINOR_VERSION, (version%100)/10);
SDL_GL_SetAttribute(SDL_GL_CONTEXT_PROFILE_MASK ,profile );
SDL_GL_SetAttribute(SDL_GL_CONTEXT_FLAGS ,flags );

SDL_Window*window = SDL_CreateWindow("sdl2",0,0,1024,768,
    SDL_WINDOW_OPENGL|SDL_WINDOW_SHOWN);
SDL_GLContext context = SDL_GL_CreateContext(window); //create context

glewExperimental=GL_TRUE;
glewInit(); //initialisation of gl* functions
```

Thank you for your attention! Questions?