UNIVERSITATEA ”ALEXANDRU-IOAN CUZA” DIN IAȘI

FACULTATEA DE INFORMATICĂ

LUCRARE DE LICENȚĂ

Game Engine 3D

propusă de

Alexandru-Ovidiu Scutaru

Sesiunea: Iulie 2019

Coordonator științific

drd.ing. Vlad Craciun, Prof. dr. Dorel Lucanu

UNIVERSITATEA ”ALEXANDRU-IOAN CUZA” DIN IAȘI

FACULTATEA DE INFORMATICĂ

Game Engine 3D

Alexandru-Ovidiu Scutaru

Sesiunea: Iulie 2019

Coordonator științific

drd.ing. Vlad Craciun, Prof. dr. Dorel Lucanu

Avizat,

Îndrumător lucrare de licență,

drd.ing. Vlad Craciun, Prof. dr. Dorel Lucanu.

Data: ..... Semnătura: ....

Declarație privind originalitatea conținutului lucrării de licență

Subsemnatul **Scutaru Alexandru-Ovidiu** domiciliat în **România, jud. Vaslui, mun. Vaslui, str. Husului, bl.153, sc. B, et. 3, ap. 6**, născut la data de **22 Nov 1994**, identificat prin CNP **1941122374523**, absolvent al Facultății de informatică, **Facultatea de informatică** specializarea **informatică**, promoția 2019, declar pe propria răspundere cunoscând consecințele falsului în declarații în sensul art. 326 din Noul Cod Penal și dispozițiile Legii Educației Naționale nr. 1/2011 art. 143 al. 4 și 5 referitoare la plagiat, că lucrarea de licență cu titlul **Game Engine 3D** elaborată sub îndrumarea domnului **drd.ing. Vlad Craciun, Prof. dr. Dorel Lucanu**, pe care urmează să o susțin în fața comisiei este originală, îmi aparține și îmi asum conținutul său în întregime.

De asemenea, declar că sunt de acord ca lucrarea mea de licență să fie verificată prin orice modalitate legală pentru confirmarea originalității, consimțind inclusiv la introducerea conținutului ei într-o bază de date în acest scop.

Am luat la cunoștință despre faptul că este interzisă comercializarea de lucrări științifice în vederea facilitării falsificării de către cumpărător a calității de autor al unei lucrări de licență, de diplomă sau de disertație și în acest sens, declar pe proprie răspundere că lucrarea de față nu a fost copiată ci reprezintă rodul cercetării pe care am întreprins-o.

Data: ..... Semnătura: .....

Declarație de consimțământ

Prin prezenta declar că sunt de acord ca lucrarea de licență cu titlul **Game Engine 3D**, codul sursă al programelor și celelalte conținuturi (grafice, multimedia, date de test, etc.) care însoțesc această lucrare să fie utilizate în cadrul Facultății de informatică.

De asemenea, sunt de acord ca Facultatea de informatică de la Universitatea ”Alexandru-Ioan Cuza” din Iași, să utilizeze, modifice, reproducă și să distribuie în scopuri necomerciale programele-calculator, format executabil și sursă, realizate de mine în cadrul prezentei lucrări de licență.

Absolvent **Alexandru-Ovidiu Scutaru**

Data: ..... Semnătura: .....

Cuprins

Introducere

Proiectul de față s-a născut din dorința mea de a înțelege și învăța cum este realizată grafica pe calculator, în special cea 3D. Ca limbaj de programare am ales să folosesc C++ pentru că în primul rând îl stăpânesc bine iar în al doilea rând este mult mai potrivit pentru astfel de proiecte care necesită performanță crescută. Pentru interacțiunea cu procesorul grafic am ales OpenGL pentru că este un API cross-platform.

Inițial am realizat un vizualizator de obiecte 3D, care doar încărca un singur obiect și îl randa. Nu am simțit ca este îndeajuns și astfel am decis să adaug mai multe funcționalități, ajungându-se la o librărie care faciliteaza dezvoltarea unor jocuri 3D simple, atât din punctul de vedere al codului scris cât și al proiectării grafice a nivelurilor.

Am amintit mai sus că am creat o librărie cu care se pot realiza jocuri simple, acest lucru se numeste Game Engine [7]. Ceea ce am realizat eu este doar un *minimum viable product*, deoarece dezvoltarea unui engine generic și complet este o sarcină dificila și de durată, de exemplu Unreal Engine [44], care este dezvoltat de zeci chiar sute de oameni încă din anul 1995.

Un astfel de program este o agregare de componente complexe precum:

- modul core: creare fereastră, preia input-ul de la tastatură și de la mouse, încarcă informația pentru randare în memoria plăcii video etc

- grafică: desenarea lumii virtuale, a elementelor de interfața grafică

- fizică: simularea gravitației, coliziunea dintre obiecte

- sunet: muzica de fundal, sunet spațial (ce poate fi localizat 3D), efecte

- suport scriptare: unele acțiuni din joc (o platforma care urca și coboară etc.) pot fi încărcate la runtime sub formă de scripturi, scrise în LUA [22] de exemplu.

Am încercat să trec prin toate modulele de mai sus, însă accentul a căzut în principal pe partea grafică.

Acest proiect este alcătuit din alte trei sub-proiecte:

- **Engine-ul propriu-zis**: oferă un api abstractizat pentru a facilita interacțiunea cu componentele de mai sus

- **WorldEditor**: este o aplicație cu interfața grafică pentru a crea harți ce vor fi folosite de jocul final

- **Jocul rezultat**: inițial este un proiect de tip boilerplate care oferă un exemplu minimal de joc, care poate fi imbunătățit.

În capitolele următoare voi prezenta fiecare sub-proiect în parte.

Contribuții

Proiectul reprezintă o agregare de componente disparate, care folosite împreună ușurează munca dezvoltării de jocuri video 3D.

O parte din aceste componente sunt gata implementate iar eu doar le folosesc. Acestea sunt engine-ul de fizică (ReactPhysics3D), librăria care se ocupă de crearea ferestrei și de input-ul de la utilizator (SDL2), librăria cu care este realizată interfața grafică (ImGUI), sunet (SDL_mixer) și partea care se ocupă de interpretarea de scripturi în LUA (binarele de la LUA împreună cu LuaBridge).

Componenta majora a proiectului, cea care se ocupă de randare este realizată de mine folosind OpenGL, detaliile implementării în capitolele urmatoare. Arhitectura și modul în care acestea interacționează este realizată de mine, la fel și exemplele de jocuri ce se pot dezvolta cu acest Engine.

Capitolul 1

Engine

Acest sub-proiect ofera un API ce facilitează utilizarea componentelor majore: grafică, audio, fizică, loader de resurse, input handler etc. Acesta este compilat ca o librărie statică (.lib pe Windows) și este folosit de celelalte două sub-proiecte.

1.1 Funcționalitați core

1.1.1 Crearea ferestrei

Pentru a afișa grafică pe ecran este nevoie de o fereastră. Se poate deshide o fereastră folosind API-ul platformei pe care rulează aplicația, dar dacă în viitor s-ar dori utilizarea și pe alte sisteme de operare este o idee bună să se folosească o librarie care oferă un API care face abstracție de sistem, precum cel oferit de librării ca SDL2, Glut sau GLFW. Eu am ales SDL2 (Simple DirectMedia Library ver. 2) [38].

Listing 1.1: creare fereastră

```
SDL_Init(SDL_INIT_VIDEO);

SDL_GL_SetAttribute(SDL_GL_RED_SIZE, 8);
SDL_GL_SetAttribute(SDL_GL_GREEN_SIZE, 8);
SDL_GL_SetAttribute(SDL_GL_BLUE_SIZE, 8);
SDL_GL_SetAttribute(SDL_GL_ALPHA_SIZE, 8);

SDL_GL_SetAttribute(SDL_GL_BUFFER_SIZE, 32);
SDL_GL_SetAttribute(SDL_GL_DEPTH_SIZE, 16);
SDL_GL_SetAttribute(SDL_GL_STENCIL_SIZE, 8);

SDL_GL_SetAttribute(SDL_GL_DOUBLEBUFFER, 1);

m_sdlWindow = SDL_CreateWindow(
```

```
    name.c_str(),
    SDL_WINDOWPOS_CENTERED,
    SDL_WINDOWPOS_CENTERED,
    width,
    height, a
    SDL_WINDOW_OPENGL
);

m_glContext = SDL_GL_CreateContext(m_sdlWindow);

SDL_GL_SetSwapInterval(1);
```

sursa: `https://wiki.libsdl.org/SDL_GL_SetAttribute`

Mai sus este prezentat modul în care se folosește SDL2 pentru a crea o fereastră.

Se inițializează librăria SDL2 cu un apel al funcției *SDL_Init*. Ca parametru este dat un flag ce specifică ce modul să folosească. Implicit este activat și cel ce se ocupă de input-ul de la tastatură (*SDL_INIT_EVENTS*).

Se setează atribute ce specifică dimensiunea în biți a fiecărei componente a culorii pixelilor (roșu, verde, albastru și alfa) rezultând 32 de biți per pixel. Analog se setează dimensiunea unor diverși bufferi, folosiți de OpenGL in procesul de randare.

În SDL2 trebuie apelată metoda *SDL_CreateWindow* pentru a afișa o fereastră. Aceasta primește ca parametri numele ferestrei, poziția de pe ecran, dimensiunile și o mască de biți ce specifică proprietățile acesteia(borderless, fullscreen, context opengl).

Pentru ca OpenGL să fie folosit cu noua fereastră are nevoie de un *context OpenGL* [26]. Acest context conține informații despre o instanță de OpenGL, printre care și *framebuffer-ul* (mai multe informații în secțiunea despre grafică) pe care acesta va desena. Contextul este creat utilizând metoda *SDL_GL_CreateContext*, care ia ca parametru un pointer la fereastra creată mai sus.

Acum se poate afișa pe fereastră ceea ce procesorul grafic randează, dar acest lucru nu este dorit pentru că elementele apar pe ecran în mod secvențial în funcție de când au fost terminate de randat. Pentru a afișa tot în același timp se utilizează un proces numit *double buffering*, în care se alocă spațiu pentru două ferestre. Procesorul grafic desenează o imagine completă pe ferestra din spate apoi acestea sunt interschimbate și incepe să deseneze pe cealaltă, astfel succesiunea de cadre (frame-uri) este fluidă.

Dar dacă frecvența cu care monitorul afisează cadrele pe ecran nu coincide cu rata de cadre a aplicației (framerate) apare fenomenul de *tearing* in care un cadru nou este afișat parțial peste cel anterior. SDL sare în ajutor cu metoda *SDL_GL_SetSwapInterval*,

care pornește VSync-ul (sinconizarea verticală), astfel este limitat efectul de *screen tearing*.

1.1.2 Input-ul de la tastatură și mouse

SDL2 oferă un API prin care se face polling (*SDL_PollEvent* la evenimente de input, astfel la începutul fiecărei iterații ale buclei principale se verifică pe ce butoane a apăsat utilizatorul, în urma cărora se va lua acțiunea corespunzătoare.

Listing 1.2: Event polling

```
SDL_Event e;
while(SDL_PollEvent(&e)) {
    switch(e.type) {
    case SDL_QUIT:
        //utilizatorul a apasat "X" pe fereastra
        break;
    case SDL_MOUSEMOTION:
        //miscare a mouse-ului
        break;
    case SDL_KEYDOWN:
        //tasta apasata
        break;
    case SDL_WINDOWEVENT:
        //event legat de fereastra
        switch(e.window.event){
        case SDL_WINDOWEVENT_RESIZED:
            //fereastra a fost redimensionata
            break;
        }
    }
}
```

sursa: `https://www.meandmark.com/sdlopenglpart6.html`

1.1.3 Timers

Orice joc are nevoie de o modalitate de a număra cât timp a trecut de la un anumit eveniment sau de a declanșa o acțiune la un anumit interval sau pentru a seta o valoare țința a numărului de cadre pe secunda cu care să ruleze aplicația.
Și în acest caz se poate folosi SDL2 pentru a cere numărul de milisecunde (ticks) de când a fost inițializată librăria, *SDL_GetTicks*. Cu ajutorul acestei proprietăți se pot crea aceste temporizatoare si cronometre.

1.1.4 Loader de resurse

Pentru a afișa ceva pe ecran avem nevoie obiecte 3D. Acestea sunt structuri compuse din:

- geometrie (mulțimea poligoanelor din care este alcătuit, sunt folosite triunghiuri sau patrulatere, eu am lucrat cu triunghiuri)

- textură (imaginea cu care va fi desenată geometria)

Textura este o imagine simplă care este o mapare a unor coordonate 2D (u,v) la o anumită culoare (*texel*) [42]. Această culoare va fi folosită pentru a desena *fragmentul* [6] corespunzător de pe geometrie. Eu am ales să folosesc *PNG* [31] pentru că este un format compresat lossless. Parsarea este realizată cu o librarie scrisa de *Sean Barrett* și anume *stb_image.h*[40] care încarcă imaginea într-un tablou de *unsigned char(byte)*.

Geometria este un fișier text în format *Wavefront OBJ* [47], ce descrie obiectul în funcție de originea acestuia(spațiu local).
Acesta specifică:

- vertecșii (vârfurile triunghiurilor in funcție de originea spațiului local),

- coordonatele (u,v) de pe textură, corespunzători vertecșilor (este nevoie doar pentru vertecși deoarece la randare se face interpolare pentru culoarea dintre cele trei puncte ce determina un triunghi),

- vectorii normali ce indică în ce direcție este fața unui poligon,

- fețele (trei grupuri ce reprezintă vertex / coordonată(u,v) / vector normal, pentru fiecare punct al triunghiului; sunt folosiți indecși din listele mai sus).

Obiecte de tipul .obj se pot modela în programe gratuite precum Blender.

Listing 1.3: dreptunghi.obj

```
# v x y z specifica vertecsi
v -1.0 1.0 0.0
v 1.0 1.0 0.0
v -1.0 -1.0 0.0
v 1.0 -1.0 0.0
# vt u v specifica coordonate ale texturii
vt 0.0 0.0
vt 1.0 0.0
vt 0.0 1.0
vt 1.0 1.0
# vn x y z specifica vectori normali
vn 0.0 0.0 1.0
# f v1/vt1/vn1 v2/vt2/vn2 v3/vt3/vn3 specifica fete
f 1/1/1 3/3/1 2/2/1
```

```
f 2/2/1 3/2/1 4/4/1
```

Mai sus am specificat că am lucrat doar cu triunghiuri. Dreptunghiul trebuie deci specificat cu două triunghiuri (șase vârfuri), dar totuși în document apar doar patru. Acest lucru se datorează faptului că două vârfuri sunt comune, deci se pot lua doar o singură dată. Proces care se numește indexare și se folosește de specificatorii pentru fețe (f). Se observă că se refolosesc vertecsii 2 și 3 din primul triunghi la al doilea.

În urma parsării (parsarea acestui format a fost făcută după un tutorial de-al lui *TheBennyBox* [29]) se obține o structură de forma:

```
struct mesh_t {
   std::vector<vec3> pos;
   std::vector<vec2> uv;
   std::vector<vec3> norm;
   std::vector<uint> ind;
} mesh;
```

Nici textura nici geometria nu pot fi procesate de către GPU încă pentru că acestea nu sunt încărcate în memoria video.

Pentru a încărca în memoria video utilizând OpenGL se folosesc următorii pași generali:

- generare resursă în memoria video, acțiune ce returnează un handle

- se leagă handle-ul la starea globală a OpenGL-ului (binding), astfel orice acțiune asupra unei resurse o va modifica pe cea activă

- se incarcă datele în zona de memorie respectivă

Pentru texturi:

Listing 1.4: TextureLoader.cpp

```
unsigned char* data = stbi_load("img.png", &width, &height,
                              &numComp, reqComp);
glGenTextures(1, &id);
glBindTexture(GL_TEXTURE_2D, id);
glTexImage2D(GL_TEXTURE_2D, 0, GL_RGBA, width, height, 0,
          GL_RGBA, GL_UNSIGNED_BYTE, data);
```

Mai sus se poate vedea că imginea este stocată într-un tablou de octeți, iar atunci când este încărcată în V-RAM folosind *glTexImage2D* este specificat faptul că este o textură 2D, nivelul în ierarhia de mipmap (imagini apropiate au calitate buna, cele depărtate mai slabă), că fiecare pixel este RGBA (are patru canale: roșu, verde, albastru și alfa), dimensiunile, grosimea unei borduri și că datele sunt stocate în bytes.

Pentru geometrie:

Lucrurile sunt puțin mai dificile. Toate informațiile legate de geometrie (structura mesh_t definită mai sus) trebuie stocate într-un *Vertex Array Object (VAO)* [45]. În programul principal există doar un handle la acea zonă. Un VAO conține mai multe liste de atribute, denumite *Vertex Buffer Object (VBO)* [46]. Aceste VBO-uri vor conține lista de vertecși, coordonatele texturii, vectorii normali, lista de indecși și orice alte date care vor fi folosite sub formă de tablouri de numere (eg. float[SIZE], std::vector$\langle int \rangle$ etc).

Listing 1.5: ModelLoader.cpp

```
glGenVertexArrays(1, &vaoID);
glBindVertexArray(vaoID);
glGenBuffers(NUM_BUFFERS, vboIDs);

glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vboIDs[POSITION_VB]);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(mesh.pos[0]) * mesh.pos.size(),
          &mesh.pos[0], GL_STATIC_DRAW);
glEnableVertexAttribArray(0);
glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, 0);

glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vboIDs[TEXCOORDS_VB]);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(mesh.uv[0]) * mesh.uv.size(),
          &mesh.uv[0], GL_STATIC_DRAW);
glEnableVertexAttribArray(1);
glVertexAttribPointer(1, 2, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, 0);

glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vboIDs[NORMAL_VB]);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(mesh.norm[0]) * mesh.norm.size(),
          &mesh.norm[0], GL_STATIC_DRAW);
glEnableVertexAttribArray(2);
glVertexAttribPointer(2, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, 0);

glBindBuffer(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER, vboIDs[INDEX_VB]);
glBufferData(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER,
          sizeof(mesh.ind[0]) * mesh.ind.size(),
          &mesh.ind[0], GL_STATIC_DRAW);
```

metode standard, mai multe la: [18]

Pentru o stoca un tablou de date se folosește *glBufferData* și se specifică tipul de VBO, dimnesiunea totală în bytes, adresa primului element, și un flag, în cazul de fața *GL_STATIC_DRAW* ce îi spune GPU-ului că datele acestea nu se vor modifica prea curând, astfel acesta le va stoca într-o zonă de memorie optimizată pentru operațiuni de citire.

Acum avem obiectul 3D încarcat în V-RAM și gata de randat, pasi urmariti aici [18].

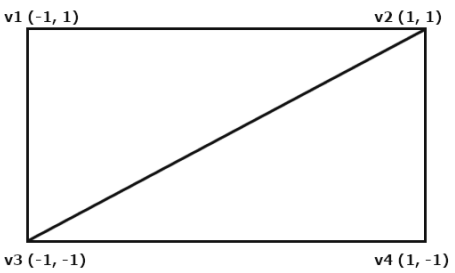


fig. a

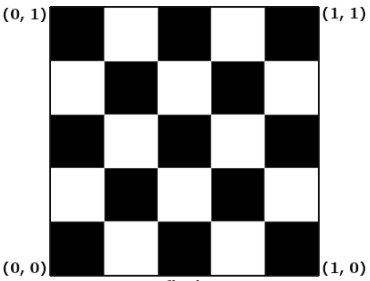


fig. b

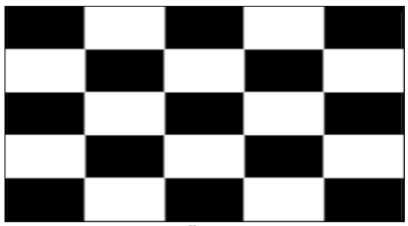


fig. c

Când geometriei dreptunghi.obj definită mai sus (fig. a) i se aplică o textură în carouri (fig. b) rezultă obiectul din fig. c.

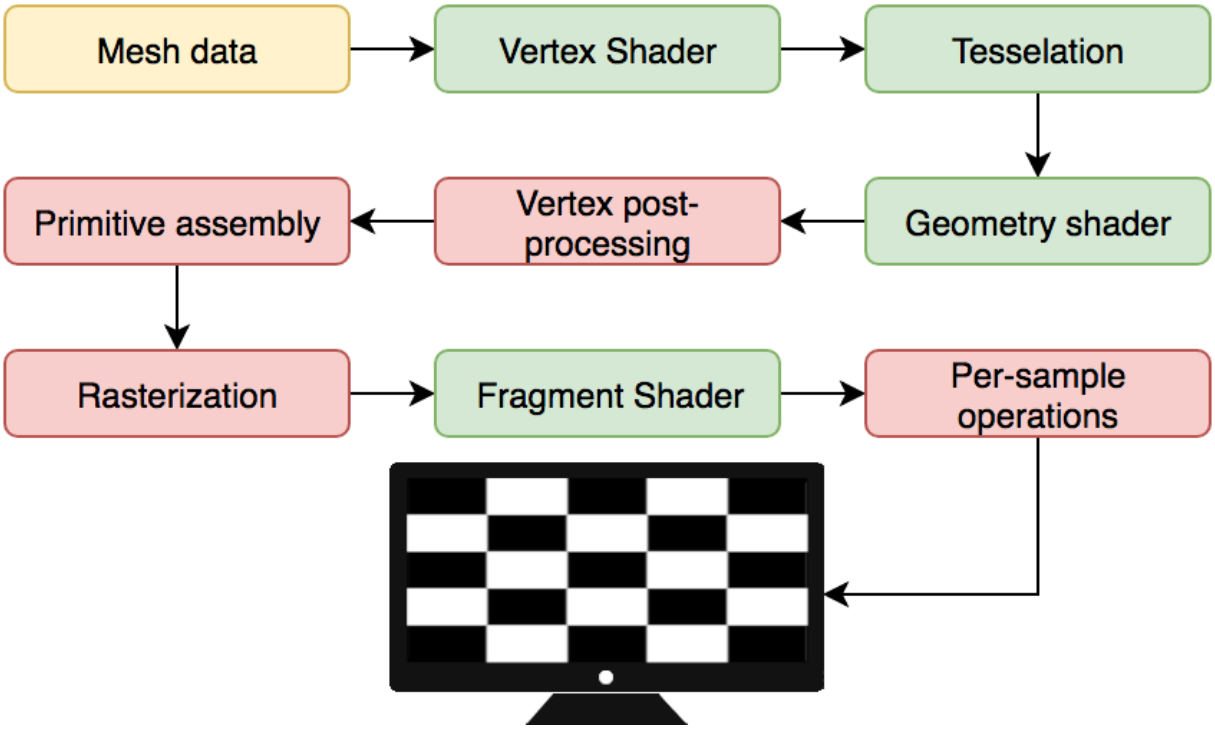
Se observă că textura aplicată obiectului este puțin alungită, este efectul dat de faptul că se face interpolare între pozițiile vertecșilor pentru a găsi culoarea corespunzătoare de pe textură.

1.2 Grafică

Partea care se ocupă de grafică se numește Renderer [3].

Până acum avem fereastră cu context, am încărcat obiecte 3D în memoria video, acum trebuie randate pe ecran. Pentru a putea interacționa cu procesorul grafic este nevoie de un API specializat. OpenGL-ul nu poate fi inclus ca un header normal în care gasim funcții, acestea trebuie incărcate manual prin apeluri specifice platformei. O alternativă este să se folosească o librarie care face acest lucru automat (glew, glut). Eu folosesc *GLEW* [13], care este o librărie header only.

Sarcina OpenGL-ului este aceea de a transforma mulțimea de obiecte 3D în reprezentări 2D pe ecran. Acest proces se realizează în mai mulți pași (**rendering pipeline**). Mai jos sunt evidențiați pe scurt acești pași, mai multe informații [34]



1.2.1 Shaders

În figura de mai sus, căsuța cu galben reprezintă datele încărcate deja în memoria video, cele verzi reprezintă programe pe care le putem modifica iar cele roșii sunt stagii în care nu putem interveni. Căsuțele verzi sunt programe care rulează pe procesorul grafic și se numesc *shaders* [19]. Limbajul de programare în care se scriu acestea se numește *GLSL (OpenGL Shading Language)* [28] și este asemănător cu C-ul.

Câteva particularități ale acestui limbaj:

Comunicarea dintre CPU și programele de pe GPU se realizează prin niște tipuri speciale declarate ca fiind *uniform* (variabile globale care își păstreaza valoarea de la un apel de randare la altul și care pot fi modificate explicit din aplicația care ruleaza pe CPU). O variabilă de tipul textituniform dacă nu este folosită, sau dacă modul în care este folosită nu schimbă rezultatul shader-ului, atunci aceasta este eliminată la compilare, astfel orice apel care cere locația acesteia (în același sens cu care se poate lua adresa unei variabile din C++) va eșua.

Listing 1.6: Incărcarea unui bool in shader

```
//in shader
uniform bool my_boolean;
...
//in aplicatia C++
GLint location = glGetUniformLocation(program, "my_boolean");
glUniform1i(location, (int)myBool);
```

Excepție fac tablourile de vertcși încărcați deja în memoria video, care se declară astfel:

Listing 1.7: Layout qualifier

```
layout (location = 0) in vec3 pos;
layout (location = 1) in vec2 texCoords;
layout (location = 2) in vec3 normal;
```

location este indexul la care se află VBO-urile (tablourile încărcate mai sus) în VAO.

Shaderele comunică între ele doar în mod secvențial prin valori declarate ca fiind *in* sau *out*. Primul apelat este shader-ul vertex, acesta produce un anumit output care este trimis catre geometry și apoi la fragment.

Acum că au fost notate câteva particularități ale limbajului GLSL, voi trece succint prin toate stagiile pipeline-ului. Eu am modificat doar programele de vertex și fragment (o aplicație care folosește OpenGL trebuie în mod obligatoriu să le implementeze pe acestea, programul geometry este opțional (este pass-through în mod implicit).

- **Vertex Shader**

  Listing 1.8: Simple vertex shader

```
layout (location = 0) in vec3 pos;

uniform mat4 model;
uniform mat4 view;
uniform mat4 projection;

void main() {
   gl_Position = projection * view * model * vec4(pos, 1.0);
}
```

  sursa: `https://stackoverflow.com/a/8675405`

  Se observă că sunt declarate o matrice 3x1 (vec3) (matrice coloană) și trei matrice 4x4 (mat4). Acestea vor fi prezentate în secțiunea următoare. Pe scurt, în urma calculelor vertecșii vor fi mutați în lumea virtuală în relație cu transformările lor, cameră și proiecție(perspectivă, ortogonală).

- **Tesellation**

  Acest stagiu poate fi modificat astfel încât să preia geometria și să creeze noi subdiviziuni ale poligoanelor în funcție de cât de apropiat este obiectul. Astfel obiectele cu cât sunt mai apropiate cu atât vor avea mai multe detalii.

- **Geometry Shader**

  Acest program primește ca input o primitivă (punct, linie, poligon etc) și poate returna ca output (în funcție de cum este programat) mai multe astfel de primitive. De exemplu pentru firele de iarbă de pe jos se pot trimite doar niște puncte în spațiu iar în acest stagiu fiecare punct poate fi transformat într-un obiect 3D ce reprezintă firul de iarbă.

- **Vertex Post-processing și Primitive Assembly**

  Până în acest punct procesorul grafic a lucrat doar cu vertecși. În aceste stagii aceștia vor fi asamblați în primitiva dorită. De exemplu ca input avem trei vertecși și dorim să randăm un triunghi. Acest stagiu ia punctele și le uneste formând triungiul dorit.

- **Rasterization**

  Primitivele procesate până în prezent sunt transformate în elemente discrete, numite fragmente (imagine rastru formată din pixeli).

- **Fragment Shader**

Listing 1.9: Simple fragment shader

```
in vec3 TexCoords;

out vec4 FragColor;

uniform sampler2D diffuse;

void main() {
   FragColor = texture(diffuse, TexCoords);
}
```

sursa: `https://stackoverflow.com/a/8675405`

Se observă că primim coordonatele (u,v) de pe textură și returnăm culoarea fragmentului (pixelului).
Dar apare un nou tip de dată și anume *sampler2D*. În acesta se află imaginea 2D încarcată în memoria video. Iar funcția *texture* ia culoarea de pe imagine corespunzătoare coordonatelor. Programul de mai sus este unul foarte simplu, însă acesta poate deveni destul de complex când se vor calcula culorile în funcție de lumină, reflexivitate, umbrire și alte efecte vizuale.

- **Per-sample operation**

După construirea fragmentelor, rezultatul va fi salvat ca o imagine într-un buffer. Implicit ea va fi randată direct pe fereastra noastră, dar poate fi salvată intr-un obiect numit *framebuffer* peste care se pot realiza diverse procesari (tehnică numită post-processing).

Shader-ele sunt specifice jocului care este dezvoltat și sunt fișiere text care sunt încărcate la runtime. Engine-ul expune o clasă abstractă care le încarcă, validează și compilează [2] dar care oferă și metode prin care pot fi încărcate diferite valori în GPU care vor folosi la procesul de randare dorit.

1.2.2 Matrici

Pentru a înțelege cine va fi *gl_Position* din vertex shader-ul de mai sus după efectuarea calculelor, trebuie vazut ce este fiecare matrice în parte, iar pentru aceasta trebuie puțină algebră liniară.

Formatul Wavefront OBJ specifică vertecșii obiectului în funcție de originea acestuia. Acest lucru poartă numele de **Object Space**. Fiecare vertex este un vector(ca noțiune matematică, nu tablou de numere), în cazul de sus acesta este format din trei elemente (coordonatele x, y, z). Deoarece se lucrează cu matrice 4x4, acesta trebuie sa aibă patru elemente pentru a putea fi înmulțit, astfel este adaugat un al patrulea element.

După fiecare înmulțire se face trecerea la un alt *spațiu de coordonate*.

- **Matricea *model***

  La oricare moment, un anumit obiect va trebui să fie într-o anumită poziție, cu o anumită dimensiune și cu o anumită rotație undeva în lumea virtuală. Aici ne folosim de matrice 4x4 pentru a descrie aceste *transformări*.

  Translatare:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x \\ 0 & 1 & 0 & t_y \\ 0 & 0 & 1 & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} t_x + x \\ t_y + y \\ t_z + z \\ 1 \end{pmatrix} -> \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & t_x + x \\ 0 & 1 & 0 & t_y + y \\ 0 & 0 & 1 & t_z + z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

  Matricea coloană este vectorul ce specifică poziția vertexului relativ la originea spațiului

local, elementele tx ty tz din matrice sunt coordonatele ce specifică unde trebuie mutat (translatat vertexul).

Se observă că în urma înmulțirii rezultă un nou vector ce conține noua poziție. Elementele din acest rezultat se pot include într-o matrice identitate ca mai sus pentru alte eventuale calcule.

Rotatie:
Se pot folosi unghiuri Euler (trei valori ce spcifică rotația pe fiecare axă), dar această prezentare suferă de un efect numit *gimbal lock* în care se pierde un grad de libertate. În Engine am folosit *quaternioni* [32] (numere complexe cu patru dimensiuni) însă acestia se pot converti la matrice pentru a calcula rotatia obiectului:

$$quat = \begin{pmatrix} x & y & z & w \end{pmatrix} -> \begin{pmatrix} 1-2*(y^2+z^2) & 2*(xy+wz) & 2*(xz-wy) & 0 \\ 2*(xy-wz) & 1-2*(x^2+z^2) & 2*(yz+wx) & 0 \\ 2*(xz+wy) & 2*(yz-wx) & 1-2*(x^2+y^2) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Scalare:

$$\begin{pmatrix} s_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} s_x * x \\ s_y * y \\ s_z * z \\ 1 \end{pmatrix} -> \begin{pmatrix} s_x * x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & s_y * y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & s_z * z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Similară cu operația de translatare, doar că elementele ce descriu scalarea se află pe diagonala principală.

Înmulțirea matricilor nu este comutativă, deci trebuie o anumită ordine în care se vor efectua calculele.
*model = mat_translatare * mat_rotatie * mat_scalare;*

Matricile fiind pre-înmulțite, ordinea tranformării vertexului este urmatoarea: se face scalare, se rotește iar mai apoi se traslatează. Acest lucru face posibilă rotirea obiectului având ca pivot originea locală a acestuia, fără a-l deforma. Iar odată rotit este mutat în noua locație. Schimbând ordinea se poate seta un alt pivot de rotatie, rezultând efecte de orbitare etc.

Aceste transformări se fac per obiect de fiecare dată când acesta trebuie randat. După înmulțirea matricei model cu poziția relativă la originea vertexului se trece la **World**

Space.

Acum toate obiectele se află în lumea virtuală la noile coordonate, cu transformările corespunzătoare.

- **Matricea *view***

  În orice aplicație grafică este nevoie de o cameră care specifică unde este și în ce direcție privește utilizatorul. În OpenGL camera este tot timpul în centru iar lumea se mișcă/roteste în jurul acesteia în direcția opusă.

  Pentru a realiza acest lucru este nevoie de o matrice 4x4 care definește un sistem de trei axe perpendiculare și poziția ce va deveni noua origine a sistemului.

  Folosind functia *lookAt(position, position + front, up)* din GLM cu parametrii: poziția camerei, direcția în care se uită și vectorul care specifică direcția în sus se obține matricea *view*. După cum se vede avem poziția, vectorul înainte și vectorul în sus. Lipsește al treilea vector, cel ce specifică direcția laterală dreapta a camerei. Acest lucru se caculează folosind produsul vectorial (în engleza cross poduct) dintre cei doi vectori, care returnează perpendiculara pe planul format de aceștia.

$$view = \begin{pmatrix} r_x & r_y & r_z & p_x \\ u_x & u_y & u_z & p_y \\ d_x & d_y & d_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

  Camera are 3 tipuri de rotații: pitch - rotație pe axa x, yaw - rotație pe axa y si roll - rotație pe axa z. În proiect cea din urmă nu poate fi alterată. Înmulțirea cu aceasta modifică poziția/rotația întregii lumi relativ la camera. Acum ne aflăm în **Eye Space**.

- **Matricea *projection***

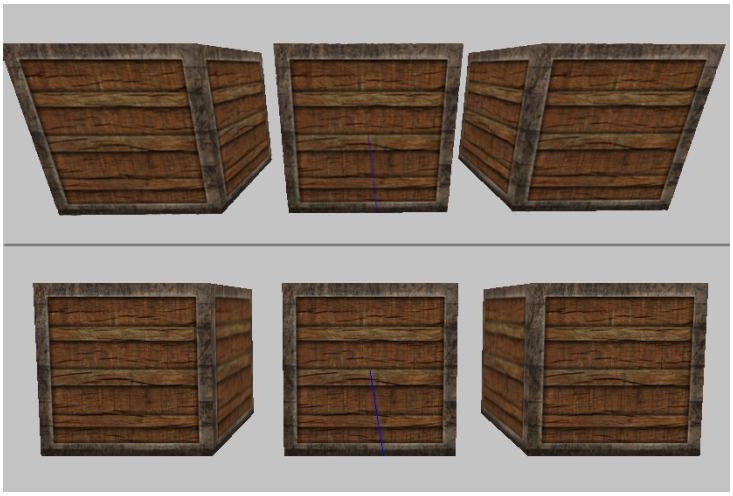
  Acum trebuie aplicată o proiecție. Pentru obiecte este aplicată perspectiva, cea ortogonală pretându-se la alte tipuri de aplicații (modelare cad etc). Această proiecție face ca obiectele sa pară mai mici cu cât sunt mai depărtate.

  projection = glm::perspective(fov = radians(90.0f), aspect = width / height, near = 0.1f, far = 1000.0f);

$$projection = \begin{pmatrix} \frac{cot(\frac{fov}{2})}{aspect} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cot(\frac{fov}{2}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{far+near}{near-far} & \frac{2*far*near}{near-far} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{pmatrix}$$

Prin înmulțire rezultă un trunchi de piramidă numit *frustum*. Acum suntem în **Clip space**. Se numește *clip* deoarece tot ce este în interiorul frustum-ului va fi randat, iar ce nu, este *tăiat (clipped)*.

Pentru perspectivă avem nevoie de fov(unghi ce determină câmpul vizual). Folosind funcția de mai sus cu o valoare a fov-ului mai mare rezultă o distorsie de tipul *pincushion*, care se poate rezolva fie setând un unghi mai mic fie aplicând o distorsie inversă, de tipul *barrel* [35]. În figura de mai jos, imaginea din partea de sus evidențiază acest efect de distorsie *pincushion*, iar cea de dedesubt este cum ar trebui de fapt să arate.



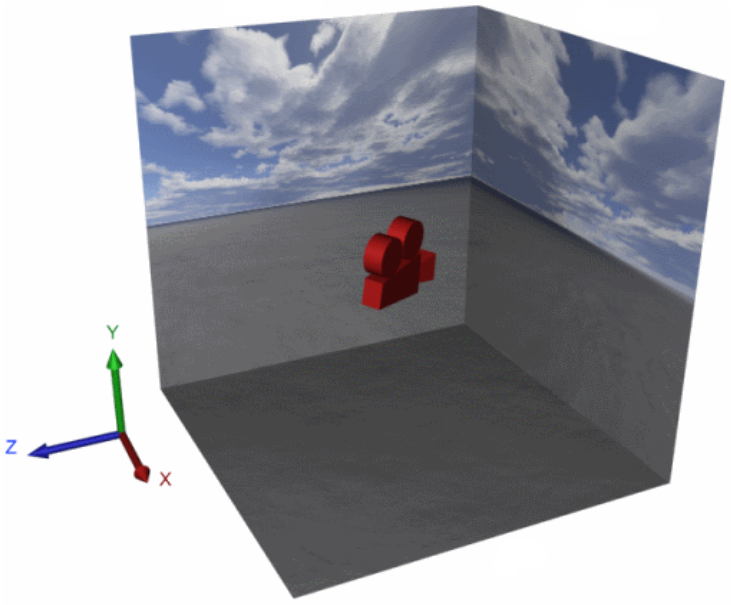
Mai sus sunt expuse chestiunile teoretice, atât cât le-am înteles eu, mai multe informații despre aceste transformări in bibliografie [24], [43].
În practică folosesc librăria *GLM (Gl Mathematics)* [12], ce urmează aceeași denumire și mod de folosire al matricelor și vectorilor din limbajul GLSL.

Acum *gl_Position* conține poziția curentă a unui vertex. Vertex shader-ul este rulat pentru fiecare vertex din lume în paralel.

Înainte ca Fragment Shader-ul să fie executat, OpenGL-ul intervine automat pentru a face înca o transformare și anume cea a spațiului **Normalized Device Coordinates (NDC)**. Are loc procesul de *perspective division* în care fiecare element al poziției este împărțit la componenta *w*(coordonata omogena, in urma calculelor din GLM va deveni -z), rezultând valori în intervalul [-1.0, 1.0].

1.2.3 Skybox

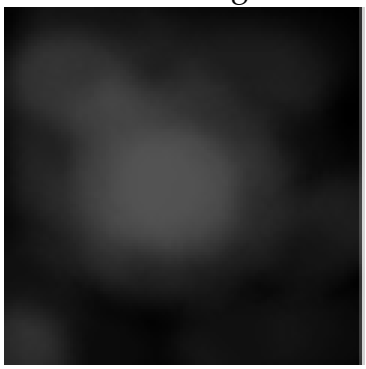
Skybox-ul este un cub cu originea la poziția camerei. Fiecare față din cele șase este texturată cu o imagine ce reprezintă o parte din cer. Este similar cu randarea unui cub normal, doar că de data aceasta se folosește un cubemap (o textură formată din șase imagini) iar camera se află în interiorul acestuia, astfel este simulat cerul în joc. Tehnica se numeste *cube mapping* [39].



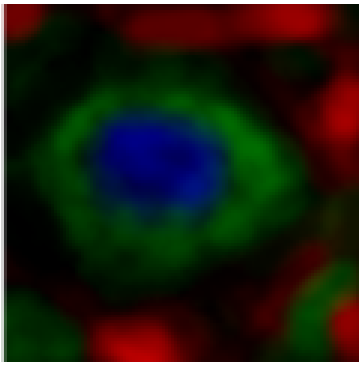
(*imagine:* `https://raptor.developpez.com/tutorial/opengl/skybox/`)

1.2.4 Teren

Ca orice obiect, terenul este la rândul lui constituit din două componente, textură și geometrie. Ambele sunt generate folosind două texturi.



Heightmap



Blendmap

Heightmap este o imagine grayscale care pentru fiecare pixel specifică înăltimea, iar *Blendmap* este o imagine ce specifică cum va fi texturat terenul.

1. Textura

Terenul poate fi texturat folosind patru texturi diferite, corespunzătoare culorilor

canalelor (roșu, verde, albastru) și cea de bază folosită în locurile în care un amestec RGB nu este prezent în totalitate. La coordonatele (x,y) se verifică ponderile canalelor din blendmap apoi se înmulțesc cu valoarea culorii de pe fiecare textură.

Listing 1.10: blendmap

```
vec4 blend = texture(blendMap, TexCoords);
float baseAmount = 1 - (blend.r + blend.g + blend.b);
//deseneaza textura de mai multe ori (factor de repetare)
vec2 tiledCoords = TexCoords * tiling_factor;
vec4 base = texture(baseTexture, tiledCoords) * baseAmount;
vec4 red = texture(rTexture, tiledCoords) * blend.r;
vec4 green = texture(gTexture, tiledCoords) * blend.g;
vec4 blue = texture(bTexture, tiledCoords) * blend.b;
vec4 finalColor = base + red + green + blue;
```

1. Geometria

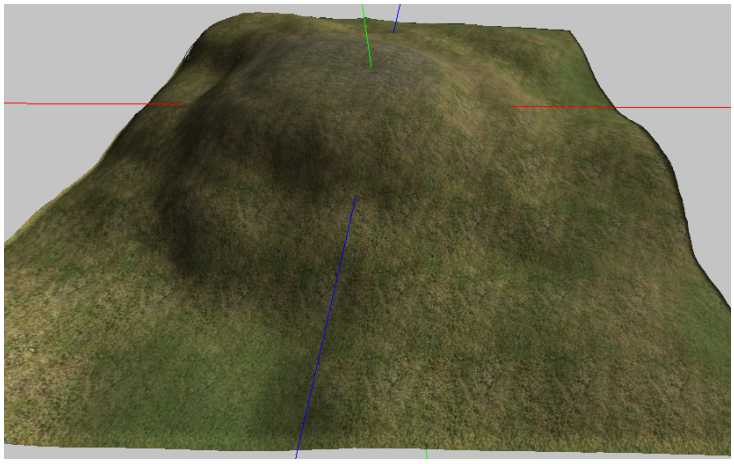
Se începe cu un pătrat care are numărul de vertecși egal cu numărul de pixeli de pe heightmap. Se parcurge imaginea, se citește valoarea pixelului și se stabilește înălțimea vertexului corespunzător de pe pătrat.

În final se dorește ca terenul să aibă centrul la coordonatele (0, 0, 0) și înăltimea aflată într-un interval [-max, max] specificat.

Listing 1.11: heightmap

```
//min, max, temp_h[w*h] calculate mai sus folosind heightmap-ul

//normalizare inaltime in intervalul [-height_mult, height_mult]
float halfRangeVal = fabs(max - min) / 2.0f;
float medianVal = (max + min) / 2.0f;
min = FLT_MAX, max = FLT_MIN;

for(size_t i = 0; i < temp_h.size(); i++){
   float height = ((temp_h[i] - medianVal) / halfRangeVal) * height_mul
   heights.push_back(height);
}
```

În final rezultă un un obiect ca cel de mai jos. Acesta la randul lui poate fi încărcat în engine-ul de fizică.



Modul în care este adăugat terenul este inspirat dintr-un tutorial în Java realizat de *ThinMatrix* [10].

1.3 Audio

Pentru audio am folosit librăria *SDL_Mixer* [36]. Care oferă funcții pentru încarcare de sunete (mp3, ogg etc), redare și setare a numărului de repetiții [37].

Listing 1.12: exemplu sdl_mixer

```
Mix_Init(MIX_INIT_MP3 | MIX_INIT_OGG);
Mix_OpenAudio(MIX_DEFAULT_FREQUENCY, MIX_DEFAULT_FORMAT, 2, 4096);

Mix_Chunk* chunk = Mix_LoadWAV(filePath);
Mix_PlayChannel(0, m_chunk, loops);

Mix_Music* loadedMusic = Mix_LoadMUS(filePath);
Mix_PlayMusic(m_music, loops);
```

sursa: `https://gist.github.com/armornick/3497064`

1.4 Fizica

Simularea fizică este un subiect dificil pe care nu l-am abordat în profunzime. Am ales să folosesc un engine existent aflat în curs de dezvoltare, *ReactPhysics3D* [33]. L-am ales pentru că este ușor de folosit și vine cu o documentație destul de detaliată pentru versiunea la care se află, dar care este îndeajuns pentru nevoile acestui proiect.

In general un engine de fizica este responsabil de modul în care obiectele amintite mai sus interacționează în timp real în lumea virtuală creată. Unui obiect 3D îi este atribuit un *RigidBody* care este o descriere 3D simplificată a obiectului (alcătuită din

una sau mai multe corpuri geometrice: cub, sferă, capsulă etc). La un anumit interval de timp fix se fac mai multe verificări pentru detectare de coliziuni.
1. *broad phase*: fiecărui obiect îi este calculat un *Axis Aligned Bounding Box (AABB)* care este o prismă aliniată cu axele de coordonate, care înglobează întreg *RigidBody-ul*. Apoi este construită o structură de date (quadtree, octtree etc) ce reprezintă compartimentarea spațială.
2. *narrow phase*: parsând structura rezultată mai sus se extrag cu usurință obiectele care au sansă mare să fi avut coliziune. În această verificare nu se mai folosește *AABB-ul* ci se verifică fiecare corp geometric din care este construit *RigidBody-ul*. Dacă se găsește coliziune atunci se rezolvă contactul respectiv (obiectul este mișcat în sens opus în funcție de forța și elasticitate pentru a nu fi suprapunere).

Eu am scris un wrapper care simplifică modul în care este creat un astfel de *RigidBody* care mai apoi poate fi încărcat în acest engine de fizică și care periodic citește starea în care se află (datele care specifică poziția și rotația acestora) pentru a fi actualizate în lumea grafică și randate corespunzător.

Capitolul 2

Editor

Acesta este un subproiect care se folosește de Engine-ul prezentat mai sus. Este o aplicație care oferă utilizatorului o interfață grafică (GUI) prin care să își creeze lumea virtuală a jocului pe care vrea să îl dezvolte.

Inițial am folosit *Qt* pentru interfața grafică. Însă cautând și alte alternative am aflat de librăria *ImGUI (Immediate Mode Graphical User Interface)* [14]. Am ales să o folosesc pe cea din urma pentru ca este destul de usor de utlizat și integrat. Un alt motiv este acela că nu ea este cea care se ocupă de fereastră, ci doar desenează peste ceea ce Engine-ul randează. Asta înseamna că atunci când nu este nevoie de GUI, acesta se poate ascunde. *Immediate Mode* nu se referă la modul în care versiunile vechi de OpenGL operau(randarea se făcea prin apeluri succesive de randare ale unor primitive) fața de modul de acum în care se folosesc acele VAO-uri. Pentru ImGUI, *Immediate Mode* se referă la faptul că apelurile de randare ale GUI-ului pot fi grupate într-un stack care este rulat iar rezultatul final este dat către GPU(sub formă de *draw calls batches*).

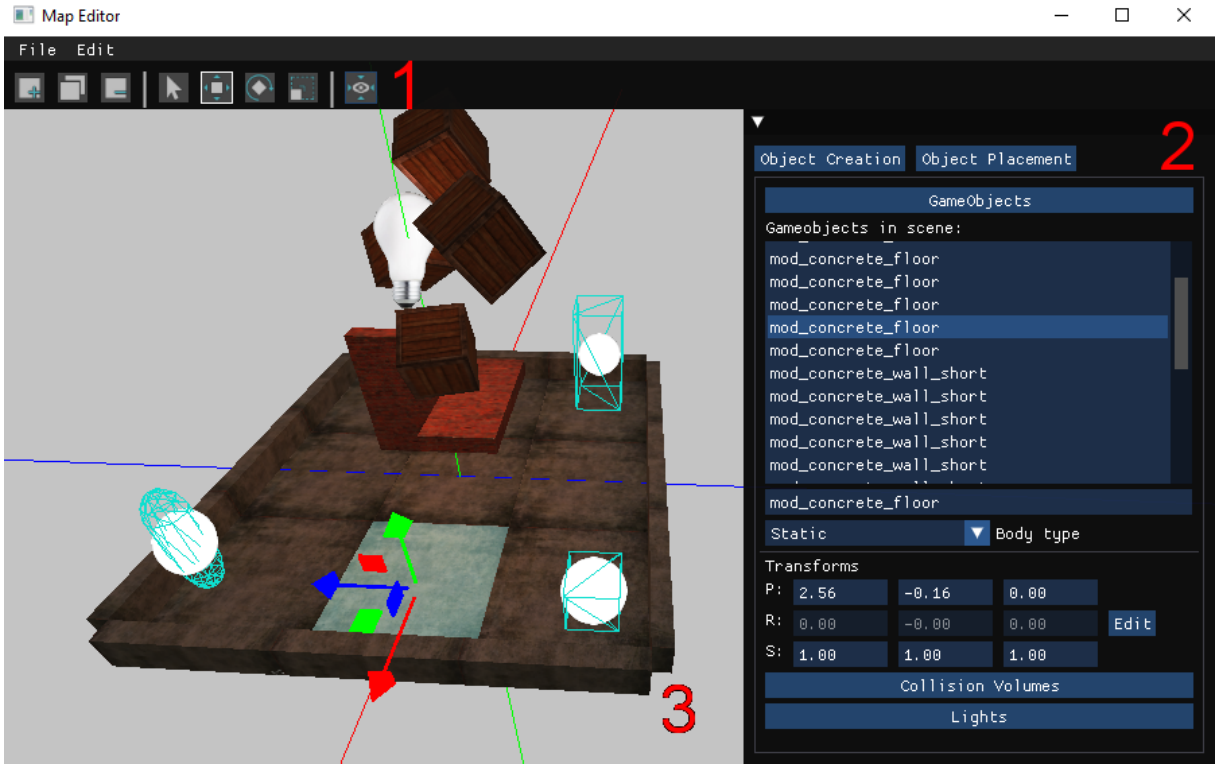
Listing 2.1: Exemplu dialog setări folosind ImGUI

```
ImGui::Begin("Grid Settings");
{
    bool boolVal = Grid::isEnabled();
    ImGui::Checkbox("Show Grid", &boolVal);
    Grid::setEnabled(boolVal);

    static int step = 0;
    ImGui::Combo("Grid Step", &step, " 0.16 \0 0.32 \0 0.64 \0\0", 3);
    Grid::setStep(step);

    ImGui::Text("%.3f Grid Height", Grid::getHeight());
    if(ImGui::Button("Decrease")) Grid::decHeight();
    ImGui::SameLine();
    if(ImGui::Button("Increase")) Grid::incHeight();
}
```

```
ImGui::End();
```

Mai sus este prezentat modul general în care este folosită această librărie.

În continuare voi prezenta în ce constă acest editor pentru nivele.



Din imagine se poate vedea că este impărțit în trei secțiuni.

2.1 Bara de unelte

Conține butoane pentru access rapid la diferite funcționalități/unelte.
De la stânga la dreapta: adaugare element nou, duplicare elemente selectate, ștergere elemente selectate, mod doar selecție, mod selecție pentru mutare, mod selecție pentru rotire, mod selecție pentru scalare, centrare camera pe obiectul selectat.

2.2 Editor de atribute

Conține controale pentru a defini un obiect pentru joc, modifica atributele elementului pe care se lucrează, adăuga diferite tipuri de lumini, poziții de start și sfârșit, se pot adăuga scripturi pentru a defini comportamentul anumitor obiecte, etc.
Este alcătuit din mai multe pagini diferite.

2.2.1 Definire obiecte

În acest mod se randeaza un singur obiect ce poate fi creat/modificat și ulterior folosit de joc. Crearea constă în setarea unei geometrii(fișier de tipul OBJ), unei texturi diffuse ce conține culoarea, unei texturi speculare ce conține informații despre cum obiectul va reflecta lumina. Pe lânga parametrii vizuali se pot altera și cei ce specifică cum se va comporta obiectul din punct de vedere fizic (elasticitate, coeficient de frecare, corpuri de coliziune pentru *RigidBody-ul* aferent etc.).
In urma salvării rezultă un fisier .JSON [20] ce conține această asociere de parametri cu numele noului obiect.

Listing 2.2: character

```
{
    "angularDamp": 0.0,
    "billboard": false,
    "bounciness": -1.0,
    "collision": [
        {
            "mass": 64.0,
            "pos": [ 0.0, 0.94, 0.16 ],
            "rot": [ 0.0, 0.0, 0.0, 1.0 ],
            "scale": [ 0.56 ,1.14, 0.56 ],
            "shape": 4
        }
    ],
    "diff": "character_DIFF.png",
    "friction": -1.0,
    "gravity": true,
    "linearDamp": 0.0,
    "mesh": "character.obj",
    "rollingResist": -1.0,
    "sleep": true,
    "spec": "character_SPEC.png"
}
```

Unul din parametri se numeste *billboard*. Aceasta este o tehnica care face ca un obiect să fie tot timpul cu fața spre camera (mai multe informații mai jos). Acest lucru va fi folositor când voi prezenta secțiunea *Viewport* din editor.

2.2.2 Amplasare obiecte

Elementele sunt împărțite în trei categorii. În funcție de ce grup este selectat, butoanele din bara de unelte amintită mai sus știu pe ce element să facă acțiunea respectivă.

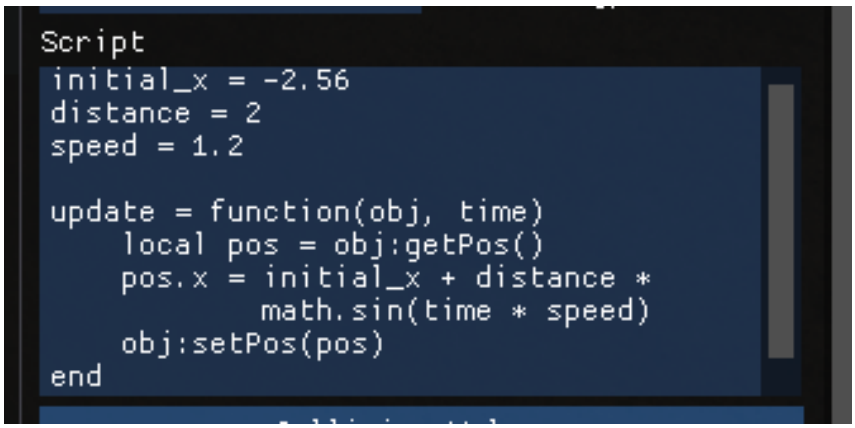
- **Gameobjects**

  Acestea sunt obiecte create ca mai sus. Acestea apar într-o listă iar numele din editor poate fi schimbat pentru o navigare mai ușoară prin ele.
  Sub această listă se poate selecta tipul fizic de obiect:
  -*Static:* sunt obiecte care fac coliziune cu alte obiecte dar nu se pot misca în urma acesteia și nici gravitația nu are efect asupra lor (potrivite pentru pereți, podea etc.)
  -*Dynamic:* sunt obiecte care sunt afectate de gravitație și care în urma coliziunii își modifică poziția și rotația (potrivite pentru cutii etc.)

  Mai jos sunt controale care modifică poziția/rotația/scalarea obiectului selectat.
  În imagine se poate observa că la rotație în editor este un caz special și trebuie explicit apasat butonul *Edit*. Acest lucru se datoreaza faptului ca pentru utizilatori este mult mai usor și natural sa seteze rotația cu unghiuri în grade (Euler Angles). Dar acest lucru sufera de efectul de *gimbal lock* [11]. Prin apăsarea butonului edit se specifică unghiuri Euler care mai apoi vor fi transformate în radiani și apoi in Quaternioni [32]. Este utilă această transformare pentru ca engine-ul de fizică lucreaza tot cu quaternioni. Aceștia sunt numere complexe dar în patru dimensiuni (ai + bj + ck + d) care specifică orientarea unui obiect, greu de vizualizat și de înțeles, dar foarte optimi în operații cu ei pentru computere.

  În continuare este un câmp *generic*, valoarea acestuia poate fi orice întreg, este acolo pentru a putea diferenția anumite tipuri de Gameobjects (fie pentru a crea diferite tipuri de Gameobjects utilizând Abstract Factory, fie pentru a salva anumite informații legate strict de acel Gameobject, dupa cum spuneam Engine-ul doar oferă posibilitatea, implementarea este la latitudinea uzilizatorului).

  La final este o căsuță în care poate fi scris un script simplu în limbajul LUA, ce va fi interpretat de joc pentru a modifica starea Gameobject-ului respectiv, fîrî a fi nevoie de recompilare.



Scriptul din imagine primește ca parametri obiectul pentru are trebuie rulat și timpul de când a fost inițializată librăria, iar în funcție de rezultatul calculului, obiectul va fi mutat de la stânga la dreapta cu viteza specificată.

Pentru a putea rula această funcție la runtime, programul trebuie să expună metodele folosite. Acest lucru se face ca în exemplul de mai jos:

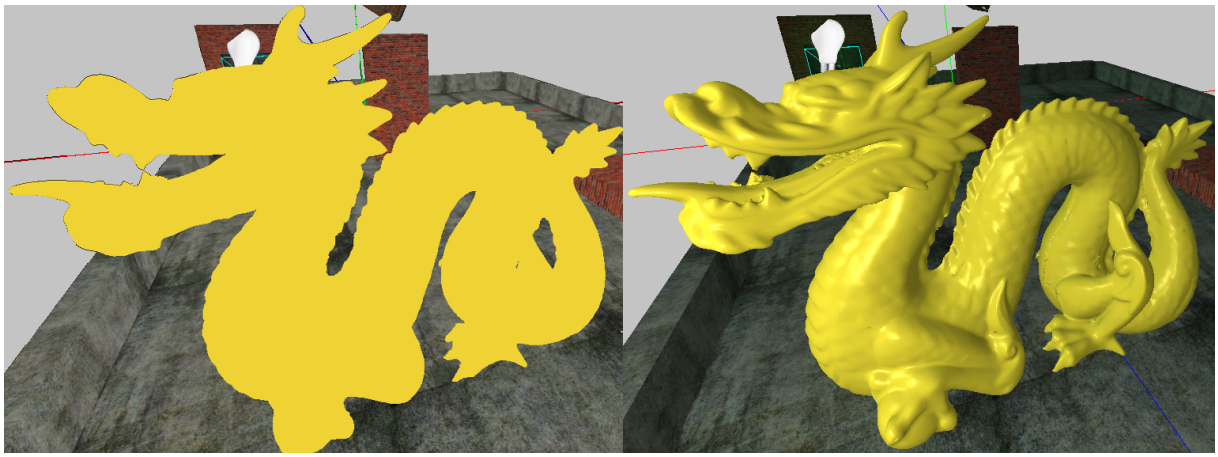
Listing 2.3: c++ api petru lua

```
lua_State* L = luaL_newstate();
luaL_openlibs(L);

//se expune structura vec3 si atributele acesteia
luabridge::getGlobalNamespace(L)
   .beginClass<glm::vec3>("vec3")
      .addData<float>("x", &glm::vec3::x)
      .addData<float>("y", &glm::vec3::y)
      .addData<float>("z", &glm::vec3::z)
   .endClass();

//se expun 2 metode ale clasei GameObject
luabridge::getGlobalNamespace(L)
   .beginClass<GameObject>("GameObject")
      .addFunction("getPos", &GameObject::getPosition)
      .addFunction("setPos", &GameObject::setPosition)
   .endClass();

//se "compileaza" scriptul de mai sus
luaL_dostring(L, obj->updateScript.c_str());
lua_pcall(L, 0, 0, 0);

//se cere fucntia "update" din tabelul global
luabridge::LuaRef updateFunc = luabridge::getGlobal(L, "update");

//se incearca rularea acesteia, daca nu reuseste va arunca o exceptie
try{
   updateFunc(&obj, SDL_GetTicks() / 1000.0f);
} catch(luabridge::LuaException& ex){
   std::cout << ex.what() << std::endl;
}
```

- **Lights**

  O parte foarte importantă din grafica 3D este dată de modul în care este simulată lumina, pentru că schimbă total modul în care va arăta randarea.

  Obiectele randate cu metodele de mai sus nu sunt foarte realiste, culoarea lor fiind uniformă. Mai jos se poate vedea în stânga randare simplă iar în dreapta randarea în care se ia în calcul lumina (shading).



Mai sus este evidențiat modelul de lumina *Phong* [30].

Am urmat tutorialul acesta [23] pentru a adauga acest mod de lumina.

Listing 2.4: Phong shading

```
vec3 lightDir = normalize(lightPos - fragmentPos);
vec3 normal = normalize(normal);
vec3 viewDir = normalize(viewPos - fragmentPos);
vec3 reflLightDir = reflect (-lightDir, normal);

vec3 baseColor = vec3 (1.0, 0.0, 0.0);

float amb = 0.1;
float diff = max (dot(normal, lightDir), 0.0);
float spec = pow (max(dot( viewDir, reflLightDir), 0.0), shine);

vec3 resultColor = vec4(amb * baseColor + diff * baseColor + spec * ba
```

Acesta este realizat din trei componente de lumina:

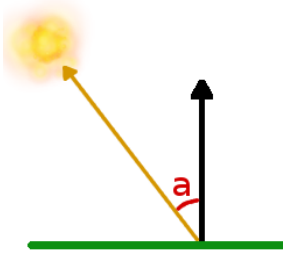
- Ambient Lighting

Această tehnică de iluminare se referă la faptul că în condițiile în care nu sunt surse de lumină în apropiere obiectul nu este complet negru, deci are un nivel de culoare minim.

- Diffuse Lighting

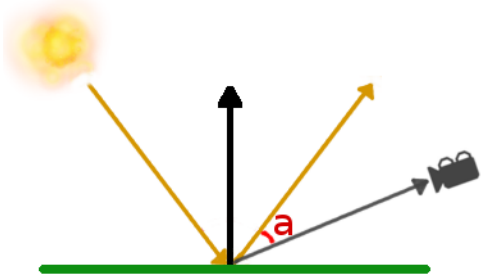
Modificarea intensității culorii (dă senzația de iluminare) în funcție de unghiul din-

tre razele de lumină și normala feței obiectului. Astfel ne folosim de vectorul normal din fișierul .obj și vectorul care specifică direcția luminei (diferența dintre poziția luminei și poziția fragmentului(pixelul de colorat)). Având aceste informații, se calculează produsul scalar dintre ele care este fixat în intervalul [0, 1]. Vectorii cu care se lurează sunt vectori unitate (au lungimea 1), astfel valoarea produsului este chiar cos(unghi). Rezultatul este 1 cand direcția luminei este paralela și în același sens cu normala (unghi de 0 grade) și scade cu cat unghiul creste. Această valoare va fi înmulțită cu valoarea culorii curente pentru a calcula noua culoare a feței (factor de intesitate).



- Specular Lighting

Acest model de lumină ia în considerare cât de lucios/reflectiv este un obiect. Este nevoie de direcția luminei calculata mai sus (dar în sens opus), de normala feței iar în plus avem nevoie de vectorul de la poziția fragmentului la camera. Direcția luminei este reflectată relativ la normală. Se calculează produsul scalar dintre reflecția luminei și direcția catre cameră. La fel valoarea este 1 cand sunt paralele în aceeași direcție și scade cu cât ungiul este mai mare.



Sunt cazuri în care un obiect nu este la fel de reflectiv pe toată suprafața (ex: o cutie din lemn cu margini din metal), pentru astfel de cazuri se folosește o textură 2D numită *specular map* care conține pixeli grayscale. Dacă este negru nu reflectă deloc iar dacă este alb este foarte reflectiv. Efect evidențiat iî imginea de mai jos.

Engine-ul oferă trei tipuri de lumini: directională, spot și point [41].

Toate luminile au trei câmpuri comune. Acestea specifică culoarea luminei, astfel: *ambient* este culoarea ambientala data de lumina, *diffuse* este culoarea luminei propriu-zise iar *specular* este culoarea luminei reflectată de obiect. În editorul de atribute există controale (built-in de librăria ImGUI) care ușurează selectarea culorii dorite. Se poate scrie la mână o anumită culoare (format RGB, HSV dar si HTML) dar are și selecție vizuală.

Însa pentru a putea defini lumini cu comportamente diferite este nevoie de parametri specifici unui anumit tip:

1. **Directională**

Aceasta simulează o sursă de lumină aflată la o distanță foarte mare de obiect astfel încât razele ce vin de la ea sunt tratate ca fiind parale. În practică se folosește un singur vector care specifică direcția luminei și care lumineaza orice obiect din scena din aceeași direcție și cu aceeași intensitate. De regulă se folosește o singură astfel de sursă de lumină (ex. soarele).

2. **Spot**

Este specificată de poziția la care se află, direcția în care lumineaza și raza unui cerc care reprezintă zona ce este luminata (orice este în afara acestuia nu va fi luminat). Aceasta nu este o lumină infinită, deci este nevoie sa se specifice o numita distanta până la care poate lumina. Se poate folosi o funcție liniară care să scadă intensitetea treptat însă efectul nu este unul foarte bun. Astfel s-a ajuns să se folosească următoarea formulă care atenueaza progresiv intensitatea acesteia în funcție de distanță:

*attenuation = 1.0 / (c + l * distance + q * distance * distance)*

folosindu-se trei variabile *constant, linear, quadratic* [21]. Este folosită pentru lumina

de la lanterne, proiectoare etc. Pentru simplitate am folosit o singură astfel de lumină pentru lanternă.

3. **Point**

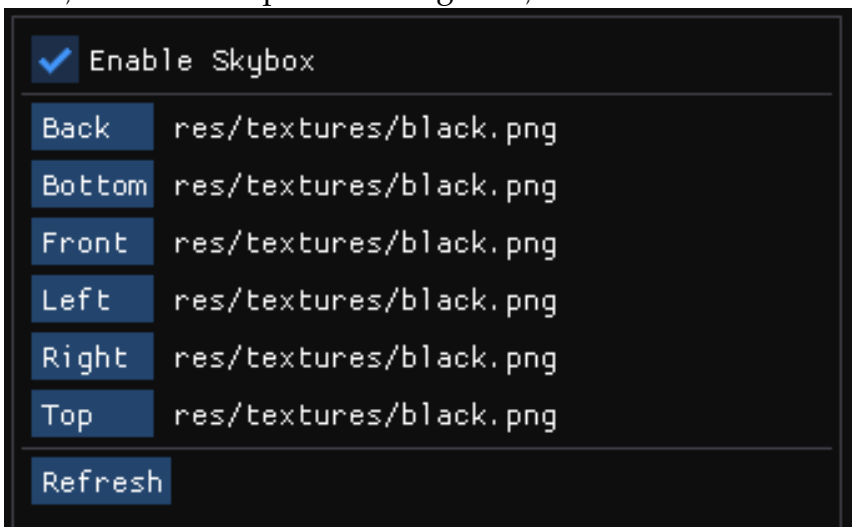
Este specificată de poziție și atenuare, aceasta va lumina în orice direcție atât cât îi permite atenuarea. Folosita pentru lumânări, torțe, becuri etc.

- **Collision Volumes**

  Sunt momente în care se dorește ca atunci când player-ul ajunge într-o anumită zonă să se întâmple un anumit lucru (ex. a ajuns la final și trebuie afișat faptul că nivelul a fost completat). Acest lucru se realizează folosind engine-ul de fizică. Se pot crea obiecte 3D invizibile player-ului dar cu care acesta poate interacționa. Acestea se mai numesc și *triggers*. De obicei player-ul nu trebuie să fie obstrucționat de acestea ci engine-ul de fizica trimite un eveniment de coliziune fără a-l rezolva. Însa versiunea folosită de mine nu are această funcționalitate(ori e posibil sa nu știu eu exact cum trebuie folosit), ea trebuie realizată manual. În momentul în care se face coliziune cu un astfel de obiect, evenimentul apare dar player-ul se blocheaza în el, deci volumul de coliziune trebuie șters la mână din lumea fizica.

2.2.3 Skybox

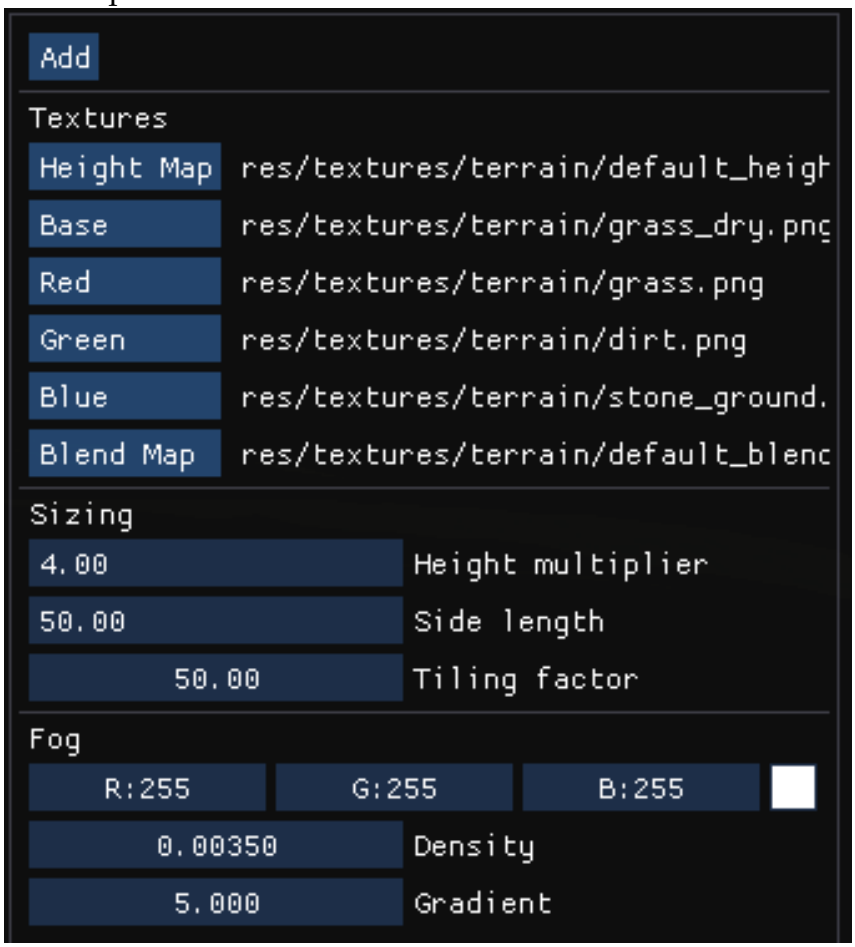
Conține controale pentru adăugarea și setarea texturilor ce vor simula cerul.



2.2.4 Teren

Acest tab conține controale cu ajutorul cărora se încarcă resursele specifice terenului (heightmap, blendmap, texturi) și cele pentru a seta înalțimea și factorul de repetare

pentru texturi (tiling factor - un numar care specifică dacă o anumită textură este mapată fie unu la unu, fie parțial fie refolosită de mai multe ori). Se poate alege dacă se dorește simularea unui efect de ceață, care face ca obiectele cu cât sunt mai depărtate să fie mai puțin vizibile. Acest lucru nu este o optimizare, obiectele vor fi procesate dar vor fi randate cu o culoare apropiata de cea a cerului. Este o modalitate de a masca tehnicile de culling (despre care voi vorbi în capitolul următor). Când un obiect este la o distanță mare de cameră, acesta nu este trimis către randare, astfel această ceață face ca obiectele să nu se oprească brusc din randat ci să scadă vizibilitatea astfel încât cele depărtate să poată fi eliminate de la randare fără ca utilizatorul să observe.



2.3 Viewport

Această secțiune este pur 3D, exact ca un joc. Navigarea se realizează cu tastele WASD pentru mișcarea înainte-înapoi, stânga-dreapta, QE pentru sus-jos, click dreapta rotește camera iar rotița de la mouse schimbă viteza de deplasare.

Secțiunea *Attribute Editor* se poate ascunde (este collapsable), astfel toată fereastra rămâne doar pentru viewport, lucru care faciliteaza navigarea prin nivel.

Obiectele nu pot fi selectate, mutate/rotite doar din pagina de editat atributele pentru că acest lucru ar deveni destul de anevoios cand se lucrează cu un numar mare de obiecte per nivel. Astfel am implementat și o modalitate de a interacționa cu acestea și în 3D fără folosirea elementelor de GUI.

Selecție

Implementarea inițială arunca o rază (în engleza raycast) din cameră către poziția mouse-ului în lumea 3D (calcularea în sens invers a matricelor din capitolul anterior) și se verifică dacă pe o anumită distanță intersecta un anumit obiect, detalii de implementare urmate [17]. Asta însemana că pentru fiecare obiect din lume trebuia verificată intersecția cu această rază. Dar am avut o problemă, obiectele când sunt încărcate, li se calculează cea mai mică sferă care le înglobează. Pentru scene complexe cu obiecte cu forme mai alungite acest mod de selecție nu este foarte precis.

Am văzut un comentariu pe un forum care aducea ca alternativă randarea fiecarui obiect cu o culoare unica care ii este atribuită la creare. Pentru a selecta este nevoie ca fiecare obiect să aibă un ID unic (pentru editor a fost de ajuns ca de fiecare dată când un obiect randabil este creat, un contor să fie incrementat iar valoarea respectivă să îi fie atribuită). Când se dă click pe viewport se intră într-un caz special de randare și anume:

- se calculează la fel matricea mvp (model, view, projection)

- se folosește un fragment shader special care nu se mai foloseste de textura și lumini pentru a desena obiectele ci de acel ID unic:

Listing 2.5: color decoding

```
glm::vec3 color = glm::vec3(
    ((ID & 0x000000FF) >> 0) / 255.0f,
    ((ID & 0x0000FF00) >> 8) / 255.0f,
    ((ID & 0x00FF0000) >> 16) / 255.0f
);
```

ID este un int pe 32 de biți, trei cei mai nesemnificativi bytes sunt tratați ca fiind componentele RGB pentru culoare. Mai sus se extrage byte-ul corespunzător iar valoarea este normalizată rezultând în valori în intervalul [0.0, 1.0]. Astfel fiecare obiect are o culoare unică.

- dupa ce toată scena a fost randată, folosind SDL2 se pot afla coordonatele de la care s-a dat click cu mouse-ul, iar cu aceste coordonate se poate afla culoarea de pe framebuffer (structura pe care OpenGL-ul randează).

Listing 2.6: color encoding

```
unsigned char color[4];
GLint viewport[4];
glGetIntegerv(GL_VIEWPORT, viewport);
glReadPixels((GLuint)coords.x, (GLuint)(viewport[3] - coords.y),
                1, 1, GL_RGBA, GL_UNSIGNED_BYTE, &color);

int index = color[0] << 0 +
         color[1] << 8 +
         color[2] << 16;
```

Variabila *viewport* este un array ce conține informații despre bufferul în care OpenGL randeaza (x, y, width, height). *glReadPixels* citește de la coordonatele x , height - y (y de la SDL2 crește de sus în jos) o regiune de 1x1 pixeli RGBA în array-ul color. Culoarea este apoi recombinata într-un int.

- exista o mapare $\langle int, object \rangle$ și astfel se alfă în timp constant ce obiect a fost selectat.

- daca tasta CTRL este apăsată se pot selecta multiple obiecte, daca SHIFT este apăsat atunci obiectul pe care s-a dat click este deselectat.

Aici trebuie folosită tehnica de *billboarding* [15].
Acest lucru este ușor de realizat folosind matricele *model* și *view* amintite mai sus. Acestea sunt matrice 4x4 iar în urma calculelor, submatricea 3x3 cu colțul în poziția (0,0) conține informații despre rotație. Daca înlocuim această submatrice din model cu oglindirea submatricei din view relativ la diagonala principală se obține rotația opusa camerei, astfel obiectul este rotit spre camera tot timpul.

$$model = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \quad view = \begin{pmatrix} v_{00} & v_{01} & v_{02} & v_{03} \\ v_{10} & v_{11} & v_{12} & v_{13} \\ v_{20} & v_{21} & v_{22} & v_{23} \\ v_{30} & v_{31} & v_{32} & v_{33} \end{pmatrix}$$

$$newModel = \begin{pmatrix} v_{00} & v_{10} & v_{20} & m_{03} \\ v_{01} & v_{11} & v_{21} & m_{13} \\ v_{02} & v_{12} & v_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix}$$

În plus, valorle din matricea view sunt de asa natura încat dupa calculul view * model, aceasta submatrice va fi chiar matricea identitate I_3. Astfel se observă o a doua metoda pentru billboarding. În shader se schimbă acea submatrice cu identitea, însa

acel shader îl folosesc și la alte lucruri care nu sunt billboarduri, prima metoda fiind cea aleasă.

Luminile, la fel și volumele de coliziune, nu au un obiect 3D vizibil în joc ci sunt doar niște date. Pentru a putea fi vizualizate în editor, acestora le este atribuit un obiect randabil sub forma de imagine 2D care este rotită tot timpul spre camera. Pentru lumina direcțională este folosită o imagine ce simbolizează un soare, pentru lumina point este folosit un bec iar pentru trigger un disc alb.

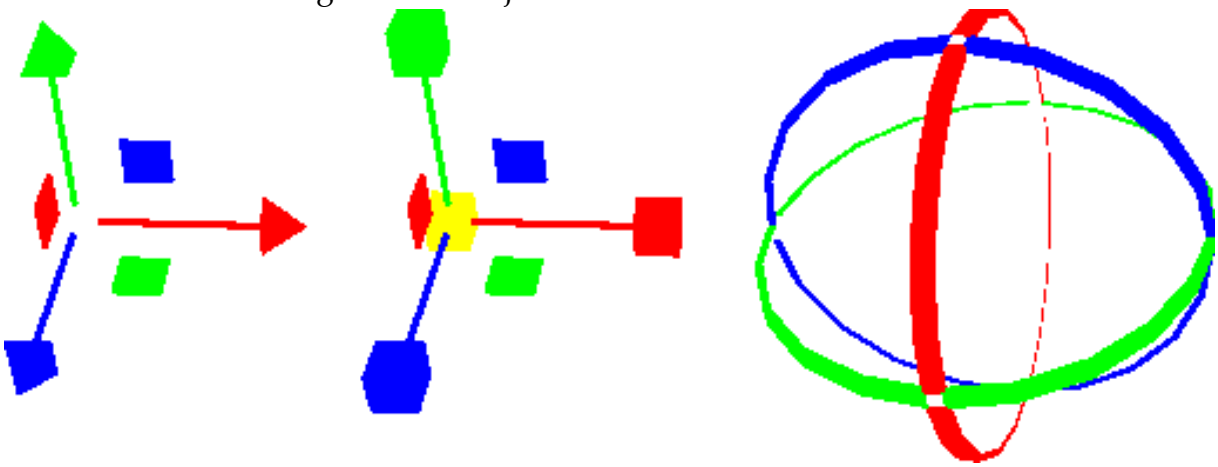
Obiectelor selectate le este adaugată o tentă cyan culorii de bază, fiind mai usor de observat. In cazul obiectelor billboard, acestora le este adaugata o culoarea roșiatică.

Doar faptul ca se pot selecta obiectele direct din viewport nu este chiar folositor, este nevoie și de o modalitate de a le manipula.

Manipulare

Am încercat să replic controalele din *Maya* (program de modelare și animație 3D) care poartă denumirea de *transform gizmos*, dar neștiind cum acestea sunt făcute am implementat o versiune destul de rudimentară.

În centrul obiectului selectat se vor randa trei obiecte 3D reprezentand axele de coordonate. Ca în imaginea de mai jos:



În funcție de modul de selecție din toolbar acestea au diferite forme: mutare - sageti, scalare - sageti cu vârful pătrat, rotație - cercuri.

Atunci când se dă click pe oricare din ele, selecția de mai sus știe că mouse-ul este pe un astfel de *gizmo*. În funcție de rotația camerei și de axa selectată, se calculează un produs scalar astfel încât obiectul să fie mutat/rotit/scalat în direcția în care mouse-ul este tras (funcționează în peste 80% din cazuri).

Gizmo-urile de mutare și scalare au și câte un pătrat pe fiecare plan determinat de doua axe. Când acesta este selectat, acțiunea se va face pe cele două axe simultan.

În meniul *Edit* -⟩ *Grid* se poate deschide un dialog prin care se poate activa și

configura un grid astfel încât în momentul în care sunt mutate obiectele în scenă, acestea să fie aliniate la acesta (grid snapping). În acest mod este ușurată munca alinierii obiectelor ce reprezintă pereți, podea etc.

Când nivelul este gata, acesta se poate salva accesând meniul *File -⟩ Save* într-un fisier .JSON, care este structurat astfel:

Listing 2.7: structura nivel

```
{
   "collisionVolumes": [
      {
         "inEditorName": "trigger1",
         "pos": [...],
         "rot": [...],
         "scale": [...],
         "shape": 0,
         "type": 2
      }
   ],
   "gameobjects": [
      {
         "bodyType": 0,
         "inEditorName": "mod_concrete_floor",
         "name": "mod_concrete_floor",
         "pos": [...],
         "rot": [...],
         "scale": [...]
      }
   ],
   "lights": {
      "dirLight": {
         "amb": [...],
         "diff": [...],
         "dir": [...],
         "spec": [...]
      },
      "pointLights": [
         {
            "amb": [...],
            "att": [...],
            "diff": [...],
            "pos": [...],
            "spec": [...]
         }
      ]
   }
}
```

Capitolul 3

Joc rezultat

Acest proiect este un template care oferă un exemplu minimal de joc ce poate fi dezvotat folosind Engine-ul. Jocul presupune traversarea unor obstacole(zone înalte peste care jucătorul nu poate sări în mod direct, platforme care se mișca, găuri în podea etc.) pentru a ajunge la finalul nivelului (acesta este dat de o lumină verde deasupra unei uși), folosindu-se de cutii pe care la poate împinge, chei etc. Acesta este doar un exemplu, modul în care jocul va fi devoltat este la latitudinea utilizatorului. Am mai implementat un joc care generează în mod aleator un labirint 3D(parcurgere în adâncime) pe care jucatorul trebuie să îl traverseze.

3.1 Structură

Structura template-ului este destul de simplă. Obiectele care fac parte din joc urmeaza modelul bazat pe moștenire.
Actor: conține informații de bază cu pivire la localizare dar și un ID unic.
Gameobject: este un tip de obiect care este fizic și randabil, astfel acesta moștenește din *Actor* dar și din *renderer::RederableEntity*. Este principalul element, tot ce se poate vedea în joc sunt instanțe ale acestei clase.
CollisionVolume: este un obiect doar fizic, ce nu poate fi văzut/randat. Folosit pentru a ști dacă player-ul a făcut coliziune de exemplu cu ușa de la finalul nivelului.
Player: obiect special ce poate fi controlat de utilizator dar care este afectat și de lumea fizică dată de engine-ul de fizică (eg. gravitație).

Toate cele de mai sus sunt instanțiate și coordonate de clasa *MainApp*. Aceasta conține mai multe metode care îndeplinesc sarcini specializate, precum:

- initSystems: inițializează toate modulele din Engine (grafică, audio, limita FPS(frames per second)).

- initLevel: încarcă hărți realizate cu editorul.

- loop: aceasta este bucla principală a jocului (*gameloop*). Este un subiect puțin mai complex ce va fi descris mai jos, însa pentru acum, aceasta trebuie să realizeze sarcinile de mai jos

- processInput: la fiecare iterație a buclei, utilizând SDL2 se face polling și se populeaza o listă cu input-ul de la utilizator (tastatură și mouse).

- update: pe baza input-ului se updatează poziția jucătorului, rotația camerei etc.

- drawGame: după ce obiectele au fost updatate se vor randa cu noile transformări.

3.2 Randare

În capitolul 1 am precizat că programele care rulează pe GPU (*shaders*) sunt specifice aplicației, așa că Engine-ul oferă doar o interfață ce va trebui implementată de utilizator.
În acest exemplu este implementat un astfel de shader concret pentru *Gameobject*. Acesta conține minimul de funcționalitate pentru randare și Phong shading-ul prezentat mai sus (se poate îmbunătăți pentru rezultatul dorit).

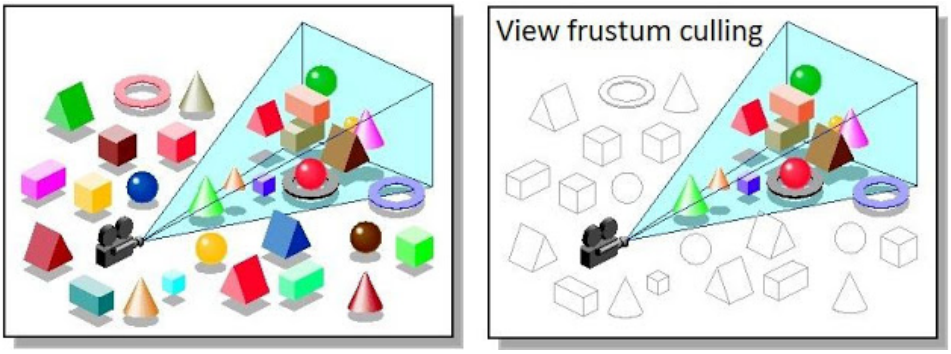
În exemplul de față obiectele se randeaza în *batch*-uri, nu individual unul dupa celalalt. OpenGL-ul funcționează pe baza unui *state global* [27], în funcție de care știe pentru ce obiect trebuie aplicate acțiunile ulterioare, astfel acesta știe să deseneze un singur VAO (Vertex Array Object) per apel. Dar apelul de binding (setarea în state-ul global) al VAO-ului ce va fi folosit este o operație costisitoare. Deși GPU-ului în sine este foarte rapid în procesarea datelor deja încărcate (din pricina faptului ca acțiunile au loc paralelizat pentru fiecare vertex/fragment), aceste apeluri din CPU ce vizeaza schimbarea state-ului în repetate rânduri aduc un overhead foarte mare care impactează performanța aplicației. Din acest motiv, înainte de fiecare apel de randare, se procesează lista de obiecte ce urmează să fie randate și se grupează după VAO, construindu-se asocieri de tipul $unordered\_map\langle TexturedModel*, std :: vector\langle GameObject*\rangle\rangle$ (care este de fapt un hashmap). La randare se face binding o singură dată pentru VAO-ul de la cheie iar apoi acesta este randat pentru fiecare *Gameobject* din vector cu trans-

formările corespunzătoare.

Listing 3.1: randare folosind batches

```
auto batches = Utils::BatchRenderables<GameObject>(objects);
for(auto const& batch : batches){
    renderer::Renderer::BindTexturedModel(batch.first);
    for(auto const& gameObject : batch.second){
        //apply matrix transformations to get the model matrix
        m_gameObjectsShader.loadModelMatrix(modelMatrix);
        renderer::Renderer::DrawTexturedModel(batch.first);
    }
}
```

Dacă scena conține foarte multe obiecte iar CPU-ul le trimite pe toate la GPU pentru randare acesta o să proceseze toți vertecșii din lume. Deși GPU-ul se descurcă bine cu astfel de operații, în momentul în care se ajunge la clipspace, vertecșii care sunt în afara acelui spațiu sunt eliminați din procesul de randare. Astfel dacă după cum spuneam sunt foarte multe obiecte sunt șanse mari ca acestea să fie procesate în mod inutil. De aceea este o practică bună să nu se trimită decât ceea ce este vizibil pentru randare. Tehnica se numeste *culling*. Sunt mai multe tipuri de culling: occlusion, frustum, back-face. Eu am implementat doar metoda *Frustum Culling*. Frustumul este trunchiul de piramida dat de câmpul vizual al camerei. Orice obiect care nu este în interiorul acestuia nu este trimis către GPU pentru randare. Pentru a realiza acest lucru, în momentul în care se încarcă un obiect se calculează AABB-ul corespunzător (axis aligned bounding box). Cu ajutorul acestuia se va calcula centrul obiectului iar distanța de la acest centru la un vertex al AABB-ului este raza unei sfere numită bounding sphere. Se folosește sfera pentru că verificarea intersecției unui plan cu sferă este relativ rapidă. Mai multe informații despre această tehnică la articolul [16].



(*imagine:* `http://aduartegames.blogspot.com/2016/03/view-frustum-culling.html`

3.3 Gameloop

O astfel de aplicație rulează in interiorul unei bucle cât timp fereastra este deschisă.

În această buclă se întâmplă multe acțiuni care sunt decuplate: polling pentru inputul de la utilizator, update-ul diferitelor obiecte (player, platformă, poziția soarelui (lumina direcțională) etc), simularea fizică a obiectelor, randarea în urma acestei simulări). De preferat este ca aceste lucruri sa se întâmple în mod constant. Pe consolele vechi (NES) nu se punea problema pentru că jocul era programat în funcție de viteza procesorului și se știa că playerul merge cu 1 pixel per tick de exemplu. Dar în zilele de azi sunt multe CPU-uri diferite cu viteze diferite, deci nu se poate ca fiecare iterație să dureze exact X milisecunde pentru fiecare frame. Astfel ajungem la noțiunea de *timestep* (cu cât avansează un frame față de altul pentru a menține constantă experiența jucătorului).

Există trei tipuri de astfel de timestep-uri:

variable - se specifică o valoare țintă de durată pentru un frame, *desired_time*. Se calculează raportul *current_time/desired_time* iar acesta este folosit ca factor pentru a avansa logica. Dacă acest factor este mare (framerate-ul scade mult sub cel țintă) pot să apară efecte neplăcute, unele coliziuni nu vor fi detectate etc.

Semi-Fixed - este o îmbunătățire fața de cel variabil, nu se avansează într-un singur pas, ci se execută logica de update de cate ori este nevoie în cadrul aceleași iterații. Deși pare că este o soluție bună, în cazul engine-urilor de fizică nu se poate folosi, pentru că pot să apară în continuare comportamente neașteptate.

Fixed - update-ul fizic se face independent de cel grafic. Acesta se face la un interval fix setat (1/30, 1/60) numit *physics step*. În bucla principală, în primă fază, obiectelor li se seteaza poziția din lumea fizica. Apoi cat timp se poate, se avansează fizica cu acel *physics step*.

Listing 3.2: update fizica, pas fix

```
accumulator += frameTime;
while(accumulator >= PHYSICS_STEP){
   processInput();
   update(PHYSICS_STEP);
   accumulator -= PHYSICS_STEP;
}
interpolation = accumulator / PHYSICS_STEP;
```

La începutul buclei, obiectele din lumea grafică se află la pozițiile corespunzătoare din cea fizică de dinainte de update. După update se obține o valoare pentru interpolare, ce se integreaza astfel:
*new_pos = current_physics_pos * interpolation + world_pos * (1.0f - interpolation))*
Acest lucru face ca mișcarea să fie fluidă, altfel obiectele ar fi părut că se teleportează. Mai multe detalii la [9], [5] și [8].

Concluzii

Acest proiect a reprezentat pentru mine un exercițiu bun, în urma căruia am învățat multe lucruri. Inițial nu știam ce înseamnă să dezvolți un game engine (fie și unul de bază cum este cel de față). Dar am trecut prin multe arii de la partea de design grafic (modele 3D, texturi), algebra liniara, lucru atât high level cât și low level, puțină fizică și nu în ultimul rînd grafică pe calculator folosind direct GPU-ul. Mai mult de jumătate din timpul dezvoltării a fost ocupat documentare. Aici au intrat parcurgerile librăriilor, citirea diferitelor articole ce expuneau diferite tehnici fie pentru randare, lumină, simulare fizică etc, dar și experimentare cu diferite librării și alegerea celei potrivite.

Acest proiect este departe de a fi într-un stadiu final, deoarece sunt foarte multe lucruri care pot fi îmbunătățite sau adăugate.

Arhitectura. Este recomandată folosirea unui *ECS (Entity Component System)* [4], care favorizează compoziția peste moștenire. Astfel un obiect are unul sau mai multe componente precum sunet, networking, grafică, modul de scriptare etc, crescând astfel flexibilitatea.

Animatie. Sunt obiecte 3D în format *Collada* [1] descrise în XML care pe langa geometrie, au asociat un schelet (tehnică numita *rigging*) și o serie de keyframe-uri care descriu la un anumit moment de timp poziția fiecărui os, în final făcându-se interpolare între valori se pot anima geometriile legate de schelet.

Scripting. Ideal ar fi expunerea unui API complet din C++ către interpretorul de limbaj de scripting astfel încât totul să fie controlat integral prin scripturi.

Sunet 3D. În jocuri 3D sunetul este și el destul de important. Este nevoie ca localizarea spațială a unei surse de sunet să fie naturală și imediată. Astfel ar trebui folosita librăria *OpenAL* [25] care este similară cu OpenGL, doar ca vizeaza sunetul. Astfel sunetul se va auzi dintr-o anumită direcție, intensitatea acestuia va scădea în funcție de distanță (atenuare) ba chiar se poate simula și efectul Doppler.

Bibliografie

[1] *Collada .dae format*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/COLLADA.

[2] *Compiling the shaders*. URL: https://www.khronos.org/opengl/wiki/Shader_Compilation.

[3] *Computer Graphics Rendering*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Rendering_(computer_graphics).

[4] *Entity Component System based archtecture*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Entity_component_system.

[5] *Fix your time step by GafferOnGames*. URL: https://gafferongames.com/game-physics/fix-your-timestep/.

[6] *Fragment*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Fragment_(computer_graphics).

[7] *Game Engine*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Game_engine.

[8] *Gamedev.StackExchange FixedTimestep*. URL: https://gamedev.stackexchange.com/a/132835.

[9] *Gameloop*. URL: https://gameprogrammingpatterns.com/game-loop.html.

[10] *Generare teren folosind textura heightfield de ThinMatrix*. URL: https://www.youtube.com/watch?v=O9v6olrHPwI.

[11] *Gimbal Lock*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Gimbal_lock.

[12] *GL Mathematics*. URL: https://glm.g-truc.net/0.9.9/index.html.

[13] *Graphics Language Extension Wrangler (GLEW)*. URL: http://glew.sourceforge.net/basic.html.

[14] *Immeadiate Mode Graphical User Interface (ImGUI)*. URL: https://github.com/ocornut/imgui.

[15] *Implementare billboarding*. URL: https://www.geeks3d.com/20140807/billboarding-vertex-shader-glsl/.

[16] *Implementare Frustum Culling*. URL: https://www.gamedevs.org/uploads/fast-extraction-viewing-frustum-planes-from-world-view-projection-matrix.pdf.

[17] *Implementare selectie*. URL: http://antongerdelan.net/opengl/raycasting.html.

[18] *Incarcare obiect in VRAM de LearnOpenGL*. URL: https://learnopengl.com/Getting-started/Hello-Triangle.

[19] *Informatii introductive despre shadere de LearnOpenGL*. URL: https://learnopengl.com/Getting-started/Shaders.

[20] *JSON Format*. URL: https://www.json.org/.

[21] *Light attenuation*. URL: http://wiki.ogre3d.org/tiki-index.php?page=-Point+Light+Attenuation.

[22] *LUA Scripting*. URL: https://www.lua.org/about.htm.

[23] *Lumina de LearnOpenGL*. URL: https://learnopengl.com/Lighting/Basic-Lighting.

[24] *Matricea Model-View-Projection*. URL: http://www.codinglabs.net/article_world_view_projection_matrix.aspx.

[25] *Open Audio Library*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/OpenAL.

[26] *OpenGL Context*. URL: https://www.khronos.org/opengl/wiki/OpenGL_Context.

[27] *OpenGL global state system*. URL: https://www.khronos.org/opengl/wiki/Portal:OpenGL_Concepts/State.

[28] *OpenGL Shading Language (GLSL)*. URL: https://www.khronos.org/opengl/wiki/Core_Language_(GLSL).

[29] *Parsare OBJ*. URL: https://github.com/BennyQBD/ModernOpenGLTutorial/blob/master/obj_loader.cpp.

[30] *Phong lighting*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Phong_reflection_model.

[31] *PNG format*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Portable_Network_Graphics.

[32] *Quaternioni*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Quaternion.

[33] *ReactPhysics3D*. URL: https://www.reactphysics3d.com/usermanual.html.

[34] *Rendering pipeline*. URL: https://www.khronos.org/opengl/wiki/Rendering_Pipeline_Overview.

[35] *Rezolvare distorsie pincushion*. URL: http://www.decarpentier.nl/lens-distortion.

[36] *SDL Mixer*. URL: https://www.libsdl.org/projects/SDL_mixer/.

[37] *SDL Mixer tutorial de LazyFoo*. URL: http://lazyfoo.net/tutorials/SDL/21_sound_effects_and_music/index.php.

[38] *Simple DirectMedia Library ver2 (SDL2)*. URL: https://wiki.libsdl.org/FrontPage.

[39] *Simulare cer in joc*. URL: http://ogldev.atspace.co.uk/www/tutorial25/tutorial25.html.

[40] *stb_image library*. URL: https://github.com/nothings/stb/blob/master/stb_image.h.

[41] *Surse de lumina de LearnOpenGL*. URL: https://learnopengl.com/Lighting/Light-casters.

[42] *Texel - Texture Element*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Texel_(graphics).

[43] *Transformari folosind matrici*. URL: http://www.opengl-tutorial.org/beginners-tutorials/tutorial-3-matrices/.

[44] *Unreal Engine4*. URL: https://www.unrealengine.com/en-US.

[45] *Vertex Array Object (VAO)*. URL: https://www.khronos.org/opengl/wiki/Vertex_Specification#Vertex_Array_Object.

[46] *Vertex Buffer Object (VBO)*. URL: https://www.khronos.org/opengl/wiki/Vertex_Specification#Vertex_Buffer_Object.

[47] *Wavefront OBJ format*. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/Wavefront_.obj_file#File_format.