Zaawansowane systemy programowania grafiki. Tablice indeksów oraz przekształcenia w OpenGL

Aleksander Denisiuk
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
Olsztyn, ul. Słoneczna 54
denisjuk@matman.uwm.edu.pl

9 marca 2021

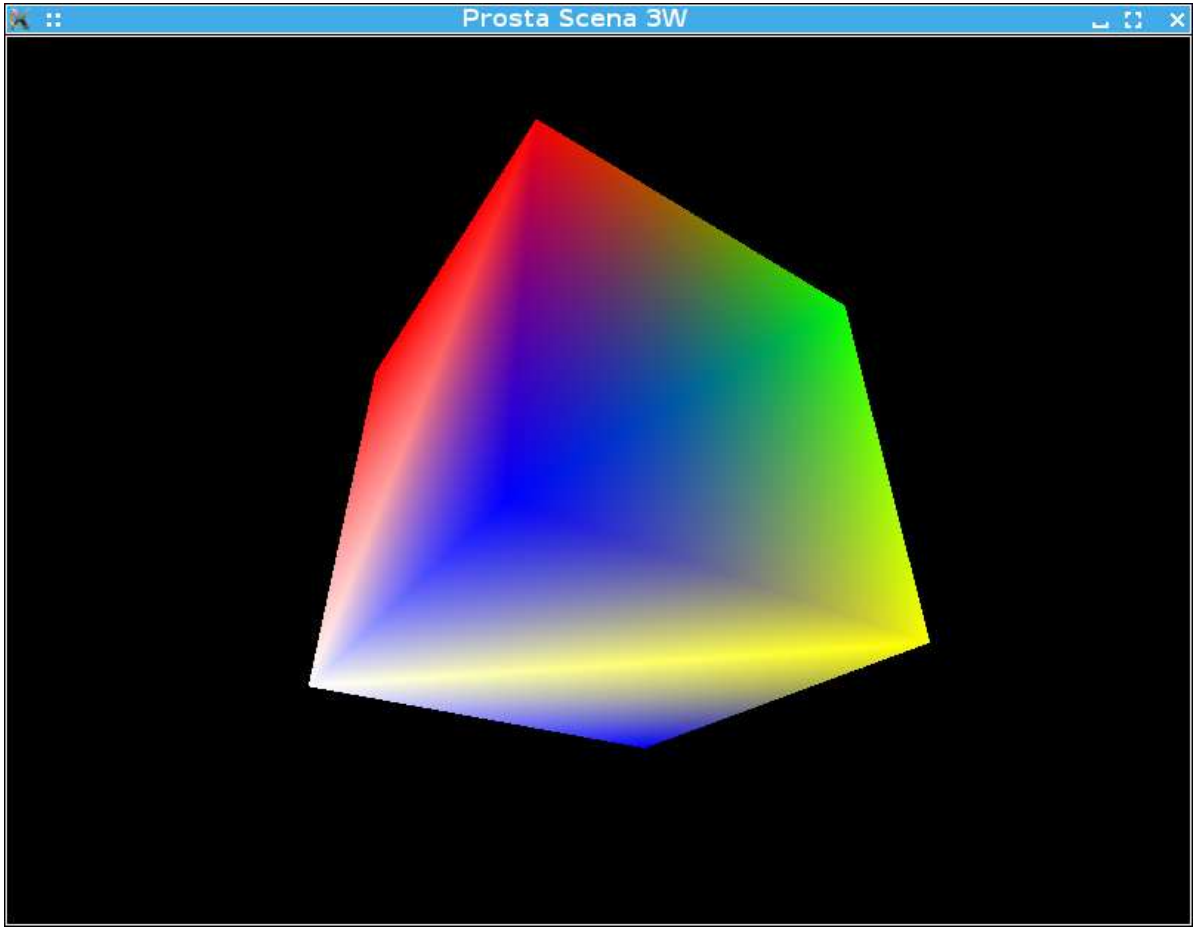
Tablice indeksów oraz przekształcenia w OpenGL

Najnowsza wersja tego dokumentu dostępna jest pod adresem

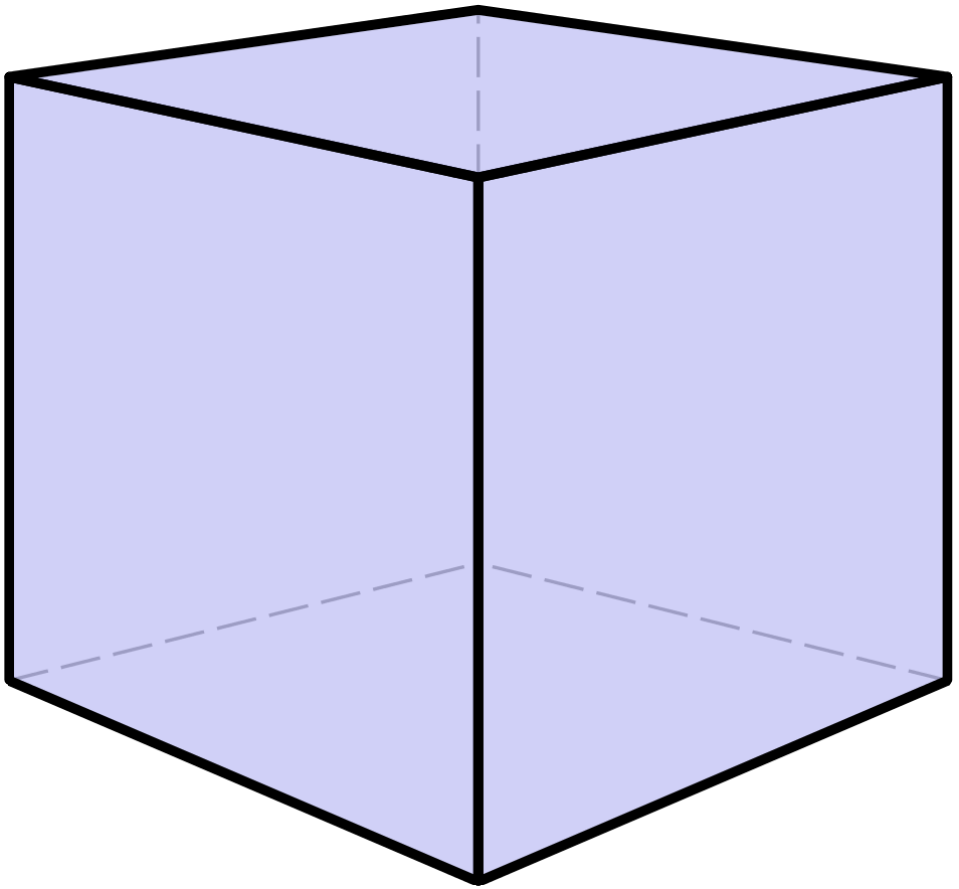
http://wmii.uwm.edu.pl/~denisjuk/uwm

Sześcian animowany

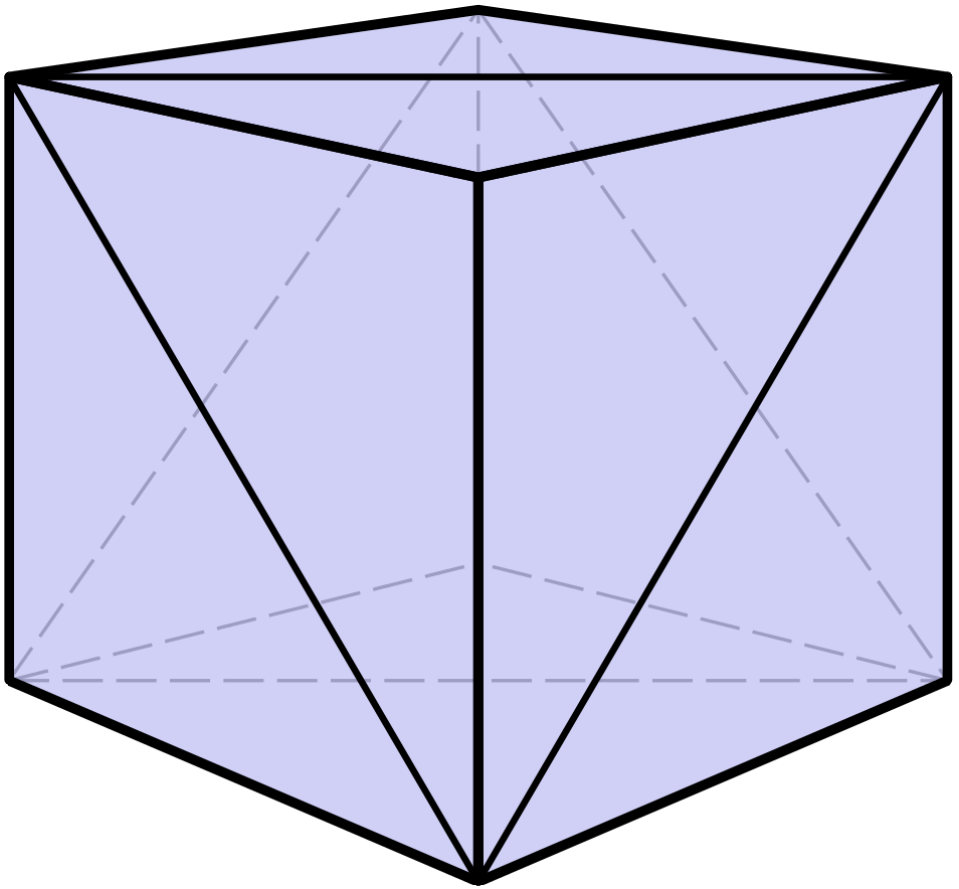
Sześcian Animowany



Zamodelujmy sześcian



Podzielmy sześcian na trójkąty



- Każdy wierzchołek należy do kilka trójkątów, więc jest wysyłany na GPU kilka razy

Rozwiązanie: tablice indeksów

- Każdy wierzchołek określa się (i wysyła się na GPU jeden raz)
  - wierzchołek może zawierać oprócz współrzędnych kolor, wektor normalny, współrzędne tekstury, etc
- Dodatkowo na GPU wysyła się tablicę indeksów, która określa geometrię
  - tablica zawiera numery indeksów wierzchołków, z których tworzy się poszczególne prymitywy graficzne
  - indeksy — liczby całkowite (`GLbyte`, `GLshort`, `GLint`, `GLubyte`, `GLushort`, `GLuint`)

VBO dla tablicy indeksów

- Zmienna `index_buffer` ma typ `GLuint`
- Zmienna `kIndices` jest tablicą indeksów

```
glGenBuffers(1, &index_buffer);
glBindBuffer(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER,
             index_buffer);
glBufferData(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER,
             sizeof(kIndices),
             kIndices,
             GL_STATIC_DRAW);
```

- Tablica indeksów jest związana z bieżącym VAO
  - Po (przed) `glBindVertexArray(0)` nie robimy `glBindBuffer(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER, 0)`
  - Przy renderowaniu wystarczy `glBindVertexArray`

Renderowanie za pomocą tablicy indeksów


```
void glDrawElements(
        GLenum mode,
        GLsizei count,
        GLenum type,
        const GLvoid * indices);
```

Przykład dla sześcianu. Struktura


```
typedef struct{
    float position[4];
    float color[4];
} ColorVertex;
```

Przykład dla sześcianu. Wierzchołki


```
const ColorVertex kVertices[8] =
{
  { { -.5f, -.5f,  .5f, 1.0f }, { 0, 0, 1, 1 } },
  { { -.5f,  .5f,  .5f, 1.0f }, { 1, 0, 0, 1 } },
  { {  .5f,  .5f,  .5f, 1.0f }, { 0, 1, 0, 1 } },
  { {  .5f, -.5f,  .5f, 1.0f }, { 1, 1, 0, 1 } },
  { { -.5f, -.5f, -.5f, 1.0f }, { 1, 1, 1, 1 } },
  { { -.5f,  .5f, -.5f, 1.0f }, { 1, 0, 0, 1 } },
  { {  .5f,  .5f, -.5f, 1.0f }, { 1, 0, 1, 1 } },
  { {  .5f, -.5f, -.5f, 1.0f }, { 0, 0, 0, 1 } }
};
```

Przykład dla sześcianu. Indeksy


```
const GLuint kIndices[36] =
{
  0,1,2,  0,2,3,
  4,0,3,  4,3,7,
  4,5,1,  4,1,0,
  3,2,6,  3,6,7,
  1,5,6,  1,6,2,
  7,6,5,  7,5,4
};
```

Przykład dla sześcianu. VBO dla wierzchołków


```
glGenBuffers(1, &vertex_buffer);
glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vertex_buffer);
glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, sizeof(kVertices),
    kVertices, GL_STATIC_DRAW);
glVertexAttribPointer(0, 4, GL_FLOAT, GL_FALSE,
    sizeof(kVertices[0]), (GLvoid*) 0);
glEnableVertexAttribArray(0);
glVertexAttribPointer(1, 4, GL_FLOAT, GL_FALSE,
    sizeof(kVertices[0]),
    (GLvoid*) sizeof(kVertices[0].position));
glEnableVertexAttribArray(1);
```

Przykład dla sześcianu. VBO dla indeksów


```
glGenBuffers(1, &index_buffer);
glBindBuffer(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER,
             index_buffer);
glBufferData(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER,
             sizeof(kIndices),
             kIndices, GL_STATIC_DRAW);
```

Przykład dla sześcianu. Wyświetlenie


```
glUseProgram(program);
glBindVertexArray(vao);

glDrawElements(GL_TRIANGLES, 36,
               GL_UNSIGNED_INT, 0);

glBindVertexArray(0);
glUseProgram(0);
```

Zmienne uniform

- Do animacji sześcianu używamy transformacji geometrycznych
  - Układ lokalny (*object space*)
  - Układ głobalny (*world space*)
  - Układ obserwatora (*eye space*)
- Trzy macierze:
  - *model matrix*
  - *view matrix*
  - *projection matrix*
- Obliczamy odpowiednie macierze w programie
- Przekazujemy macierze do GPU (do shadera, do zmiennych *uniform*)
- W shaderze (którym?) obliczamy współrzędne po transformacjach

Deklaracja w Shaderze


```
uniform mat4 model_matrix;
uniform mat4 view_matrix;
uniform mat4 projection_matrix;
```

W programie

- Znaleźć adres zmiennej uniform w shaderze

```
glUseProgram(program);
location = glGetUniformLocation(program,
                                var_name);
```

  - ✦ zmienna `location` powinna mieć typ `GLint`
  - ✦ `var_name` jest tekstem (`const char*`), który zawiera dokładnie taką nazwę zmiennej uniform, jaka jest w dhaderze
  - ✦ jeżeli zmiennej uniform nie znaleziono, w `location` zostanie zapisano -1

- przykładowo:

```
location = glGetUniformLocation(program,
                                "model_matrix");
```

Wysyłanie danych

- Do wysyłania danych do zmiennej uniform służą funkcje `glUniform*`
- Na przykład:
  - liczba całkowita
    ```
    glUniform1i(GLint location,  GLint v0);
    ```
  - czterowymiarowy wektor `GLfloat` (tablicę wektorów):
    ```
    glUniform4fv(GLint location,
      GLsizei count, const GLfloat *value);
    ```
  - macierz 4×4:
    ```
    glUniformMatrix4fv(GLint location,
       GLsizei count,  GLboolean transpose,
       const GLfloat *value);
    ```
  - etc

Implementacja

Shader Wierzchołków


```
#version 430 core
layout(location=0) in vec4 in_position;
layout(location=1) in vec4 in_color;

out vec4 frag_color;

uniform mat4 model_matrix;
uniform mat4 view_matrix;
uniform mat4 projection_matrix;

void main(void){
  gl_Position = (projection_matrix
        * view_matrix * model_matrix)
        * in_position;
  frag_color = in_color;
}
```

Shader Fragmentów


```
#version 430 core

layout (location = 0) out vec4 color;

in vec4 frag_color;

void main(void){
        color = frag_color;
}
```

Klasy C++

- `Window` — odpowiada za kontekst
- `vertices.h` — deklaracje struktur dla wieszchołków
- `Cube`, `IndexModel`, `MovableModel` — hierarchia klas modeli
- `ModelProgram`, `CameraProgram`, `BaseProgram` — hierarchia klas programów
- `matma.h` — algebra macierzy
- `glerror.h` — definicje, związane z debugowaniem (bez zmian)
- `main.cpp` — program główny

Struktura dla wierzchołków


```
typedef struct ColorVertex{
    GLfloat position[4];
    GLfloat color[4];
} ColorVertex;
```

Model z tablicą indeksów

IndexModel
vao_ : GLuint # vertex_buffer_ : GLuint # index_buffer_ : GLuint
+ ~IndexModel ()

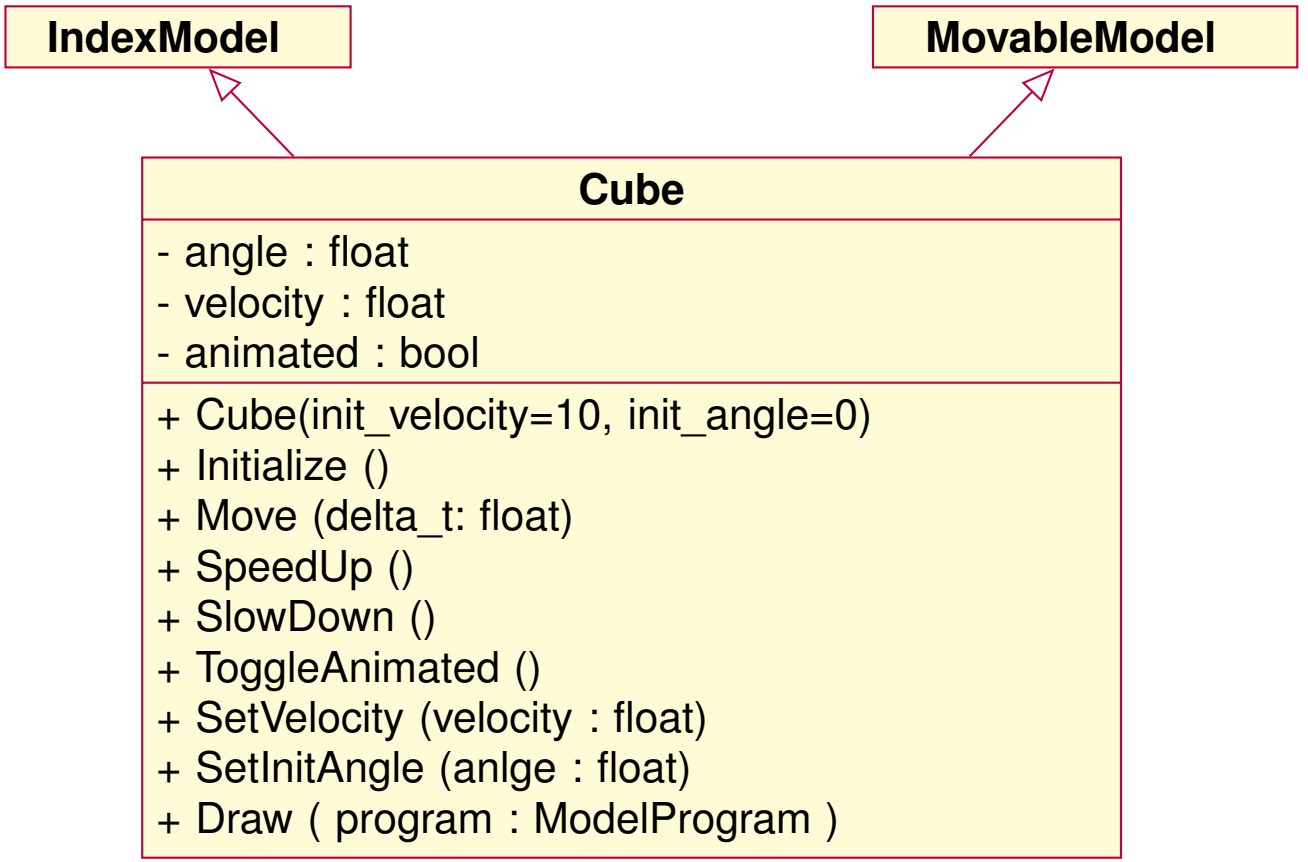
- Każdy obiekt będzie miał własną funkcję `Initialize()`

```
IndexModel::~IndexModel(){
    glDisableVertexAttribArray(1);
    glDisableVertexAttribArray(0);
    glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, 0);
    glBindBuffer(GL_ELEMENT_ARRAY_BUFFER, 0);
    glDeleteBuffers(1, &index_buffer_);
    glDeleteBuffers(1, &vertex_buffer_);
    glBindVertexArray(0);
    glDeleteVertexArrays(1, &vao_);
}
```

Model przemieszczalny

MovableModel
model_matrix_ : Mat4

Sześcian



Inicjalizacja

- Wierzchołki, VAO, VBO — jak wyżej

Animacja


```
void Cube::Move(float delta_t){
    if (!animated_) return;
    angle_ += delta_t * velocity_;
    if(angle_>360) angle_ -= 360;
    if(angle_<-360) angle_ += 360;
    model_matrix_.SetUnitMatrix();
    model_matrix_.RotateAboutX(angle_);
    model_matrix_.RotateAboutY(angle_);
}
```

Ustawienie animacji


```
void Cube::SpeedUp(){
    velocity_ *= 1.09544511501;
}

void Cube::SlowDown(){
    velocity_ /= 1.09544511501;
}

void Cube::ToggleAnimated(){
    animated_ = ! animated_;
}
```

Renderowanie


```
void Cube::Draw(const ModelProgram & program){

  glUseProgram(program);
  glBindVertexArray(vao_);

  program.SetModelMatrix(model_matrix_);

  glDrawElements(GL_TRIANGLES, 36,
                 GL_UNSIGNED_INT, 0);

  glBindVertexArray(0);
  glUseProgram(0);

}
```

Program podstawowy

BaseProgram
program_ : GLuint - vertex_shader_ : GLuint - fragment_shader_ : GLuint
+ operator GLuint() const + ˜BaseProgram () + Initialize (vertex_shader_file, fragment_shader_file) # GLint GetUniformLocationOrDie(const char *); - LoadAndCompileShaderOrDie (source_file, type) - LinkProgramOrDie (vertex_shader, fragment_shader)

Deklaracja

```
class BaseProgram{
public:
  void Initialize(const char* vertex_shader_file,
    const char* fragment_shader_file);
  operator GLuint() const{return program_;}
  ~BaseProgram();
protected:
  GLuint program_;
private:
  GLuint vertex_shader_;
  GLuint fragment_shader_;
  GLuint LoadAndCompileShaderOrDie(
    const char* source_file,
    GLenum type);
  GLuint LinkProgramOrDie(
    GLint vertex_shader,
    GLint fragment_shader);
protected:
    GLint GetUniformLocationOrDie(const char *);
};
```

Inicjalizacja


```
vertex_shader_ = LoadAndCompileShaderOrDie(
    vertex_shader_file, GL_VERTEX_SHADER);
fragment_shader_ = LoadAndCompileShaderOrDie(
    fragment_shader_file, GL_FRAGMENT_SHADER);
program_ = LinkProgramOrDie(vertex_shader_,
    fragment_shader_);
```

LoadAndCompileShaderOrDie


```
GLuint Program::LoadAndCompileShaderOrDie(
      const char * source_file, GLenum type){
  int file_size;
  char * shader_code;
  GLuint shader=glCreateShader(type);
  ifstream file (source_file, ios::in|ios::ate);
  if (file.is_open()) {
    file_size = file.tellg();
    shader_code = new char [file_size+1];
    file.seekg (0, ios::beg);
    file.read (shader_code, file_size);
    shader_code[file_size]='\0';
    file.close();
    glShaderSource(shader, 1,
         (const GLchar**) &shader_code, NULL);
    glCompileShader(shader);
    delete[] shader_code;
}
```

GetUniformLocationOrDie

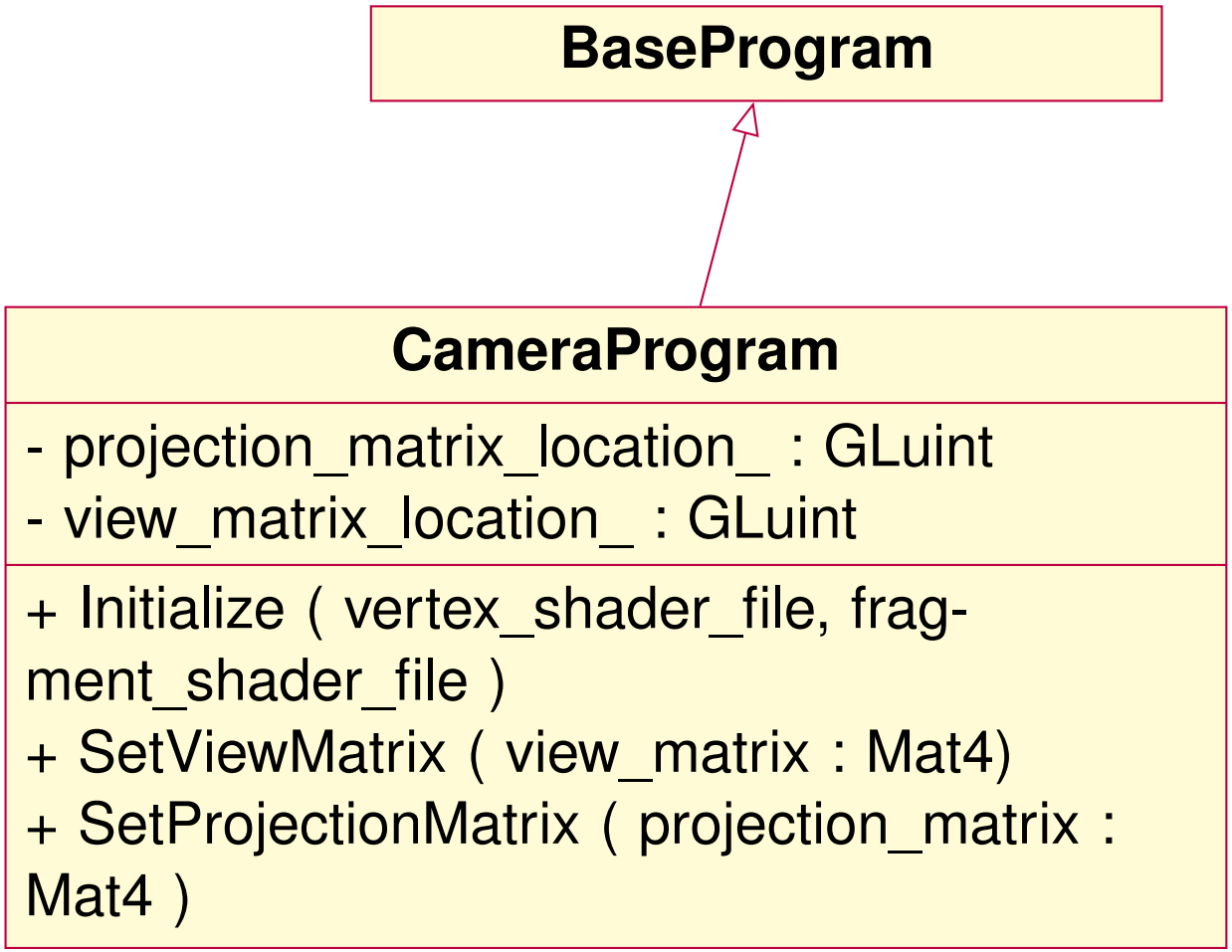

```
GLint CameraProgram::GetUniformLocationOrDie(
        const char* var_name){
  GLint location=-1;
  location = glGetUniformLocation(program_,
                                  var_name);
  if (location < 0){
      cerr << "ERROR: cannot ..."
           << var_name << endl;
      glfwTerminate();
      exit( EXIT_FAILURE );
  }
  return location;
}
```

LoadAndCompileShaderOrDie, cd


```
else{ //file was not opened
  cerr<<"Could not ... "<<source_file<<endl;
  glfwTerminate();
  exit( EXIT_FAILURE );
}
```

- Dalej sprawdzanie wyniku kompilacji — jak wcześniej

CameraProgram



Deklaracja


```
class CameraProgram : public BaseProgram{
public:
  void Initialize(
    const char* vertex_shader_file,
    const char* fragment_shader_file);
  void SetViewMatrix(const Mat4 &) const;
  void SetProjectionMatrix(const Mat4 &) const;
private:
  GLuint projection_matrix_location_;
  GLuint view_matrix_location_;
protected:
  GLint GetUniformLocationOrDie(const char *);
};
```

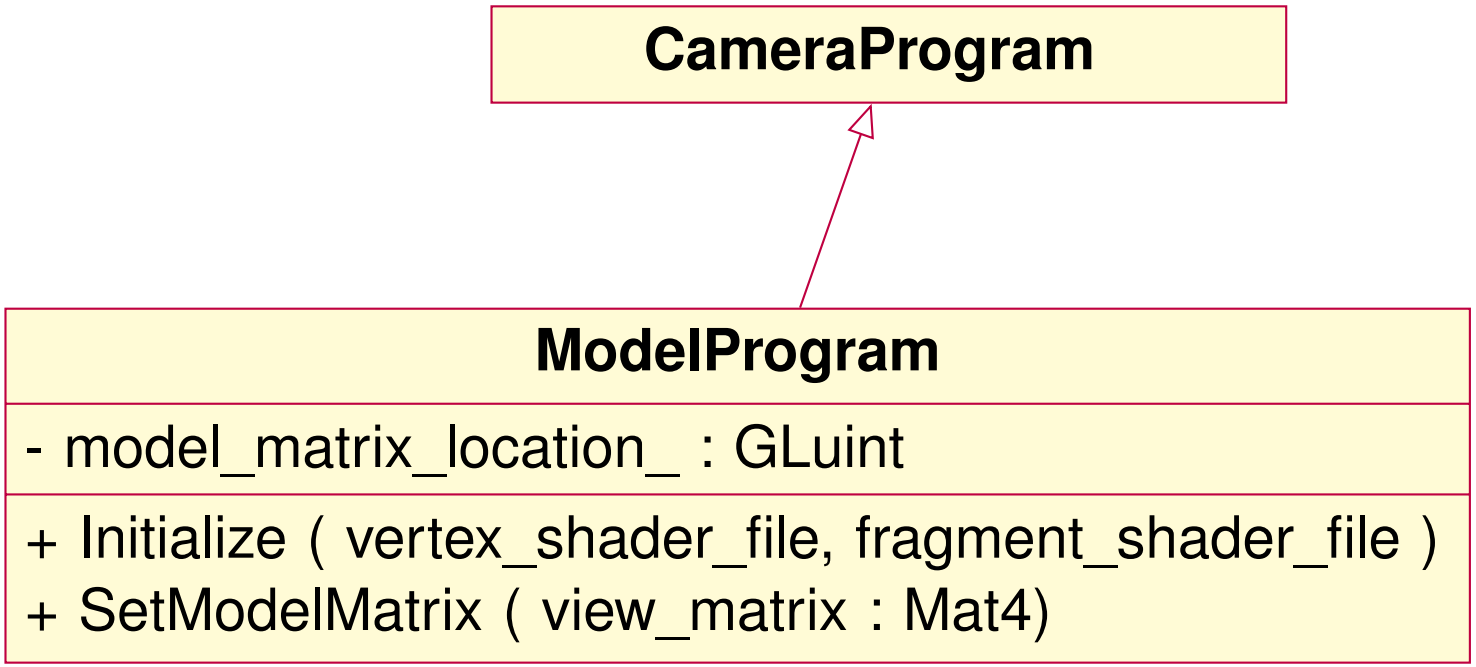
Inicjalizacja


```
void CameraProgram::Initialize(
    const char *vertex_shader_file,
    const char *fragment_shader_file){

 BaseProgram::Initialize(
    vertex_shader_file,
    fragment_shader_file);

 projection_matrix_location_
  = GetUniformLocationOrDie("projection_matrix");
 view_matrix_location_
  = GetUniformLocationOrDie("view_matrix");
}
```

Zmienne uniform


```
void CameraProgram::SetProjectionMatrix(
      const Mat4 & matrix){
 glUniformMatrix4fv(projection_matrix_location_,
      1, GL_FALSE, matrix);
}

void CameraProgram::SetViewMatrix(
      const Mat4 & matrix){
 glUniformMatrix4fv(view_matrix_location_,
      1, GL_FALSE, matrix);
}
```

ModelProgram



Inicjalizacja


```
void ModelProgram::Initialize(
    const char *vertex_shader_file,
    const char *fragment_shader_file){
  CameraProgram::Initialize(
      vertex_shader_file,
      fragment_shader_file);
  model_matrix_location_
    = GetUniformLocationOrDie("model_matrix");
}
```

Zmienne uniform


```
void ModleProgram::SetModelMatrix(
        const Mat4 & matrix){
    glUniformMatrix4fv(model_matrix_location_,
                       1, GL_FALSE, matrix);
}
```

Zmiany w klasie `Window`

- nowe dane

```
private:
  Cube cube_;
  clock_t last_time_;
  Mat4 view_matrix_;
  Mat4 projection_matrix_;
```

- dwie nowe metody prywatne:

```
void SetViewMatrix() const;
void SetProjectionMatrix() const;
```

- dwie stałe w pliku `window.cpp`:

```
const char* kVertexShader
          = "SimpleShader.vertex.glsl";
const char* kFragmentShader
          = "SimpleShader.fragment.glsl";
```

Zmiany w inicjalizacji

- w konstruktorze:

```
last_time_ = 0;
```

- w procedurze `Initialize`:

```
InitModels();
InitPrograms();

view_matrix_.Translate(0, 0, -2);
SetViewMatrix();
projection_matrix_
 = Mat4::CreateProjectionMatrix(
  60,(float)width_/(float)height_, 0.1f,
                                   100.0f);
SetProjectionMatrix();

glEnable(GL_DEPTH_TEST);
glDepthFunc(GL_LESS);
```

Renderowanie


```
void Window::Run(void){
 while (!glfwWindowShouldClose(window_)){
   glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT
           | GL_DEPTH_BUFFER_BIT);
   clock_t now = clock();
   if (last_time_ == 0) last_time_ = now;
   cube_.Move( (float)(now - last_time_)
               / CLOCKS_PER_SEC );
   last_time_ = now;

   cube_.Draw(program_);
   glfwSwapBuffers(window_);
   glfwPollEvents();
 }
}
```

Resize


```
void Window::Resize(int new_width,
int new_height){
 width_ = new_width;
 height_ = new_height;
 projection_matrix_
   = Mat4::CreateProjectionMatrix(
       60, (float)width_/(float)height_,
       0.1f, 100.0f);
 SetProjectionMatrix();
 glViewport(0, 0, width_, height_);
}
```

Macierze kamery


```
void Window::SetViewMatrix() const{
 glUseProgram(program_);
 program_.SetViewMatrix(view_matrix_);
}

void Window::SetProjectionMatrix() const{
 glUseProgram(program_);
 program_.SetProjectionMatrix(
                    projection_matrix_);
}
```

KeyEvent, naciśnięcie


```
void Window::KeyEvent(int key, int /*scancode*/,
                      int action, int /*mods*/){
 if(action == GLFW_PRESS){
  switch (key){
   case GLFW_KEY_ESCAPE:
     glfwSetWindowShouldClose(window_, GLFW_TRUE);
   break;
   case GLFW_KEY_LEFT:
      cube_.SlowDown();
   break;
   case GLFW_KEY_RIGHT:
      cube_.SpeedUp();
   break;
   case GLFW_KEY_SPACE:
      cube_.ToggleAnimated();
   break;
  }
 }
```

KeyEvent, przytrzymywanie


```
.................................
 else if(action == GLFW_REPEAT){
    switch (key){
        case GLFW_KEY_LEFT:
            cube_.SlowDown();
        break;
        case GLFW_KEY_RIGHT:
            cube_.SpeedUp();
        break;
        default:
        break;
    }
  }
}
```

Deklaracja π


```
#ifndef M_PI
    #define M_PI 3.14159265
#endif
```

Algebra macierzy


```
class Mat4{
public:
  Mat4(); // Unit matrix
  operator const float* () const{return matrix_;}
  static Mat4 CreatePerspectiveProjectionMatrix(
     float fovy, float aspect_ratio,
     float near_plane, float far_plane);
  void RotateAboutX(float angle); //gedrees
  void RotateAboutY(float angle); //gedrees
  void RotateAboutZ(float angle); //gedrees
  void Scale(float x_scale, float y_scale,
                            float z_scale);
  void Translate(float delta_x, float delta_y,
                            float delta_z);
  void SetUnitMatrix();
  void Log();
```

Algebra macierzy


```
private:
    float matrix_[16]; // column-major
    void MultiplyBy(const Mat4 &);
    explicit Mat4(float);
};
```

- Uwaga: w pamięci GPU macierze umieszczone są kolumnami
- Dwa podejścia:
  - w programie macierze umieszczamy w zwykły sposób, przy wysyłaniu na GPU transponujemy
  - w programie macierze umieszczamy wzdłuż kolumn, przy wysyłaniu na GPU nie transponujemy
- wybrane pierwsze

Konstruktory i jednostkowanie


```
Mat4::Mat4(){// Unit matrix
  for (int i=0; i<16; i++) matrix_[i]=0;
  matrix_[0]=matrix_[5]=matrix_[10]
                        =matrix_[15]=1;
}
Mat4::Mat4(float val){
  for(int i=0; i<16; i++){
      matrix_[i]=val;
  }
}
void Mat4::SetUnitMatrix(){// Unit matrix
  for (int i=0; i<16; i++) matrix_[i]=0;
  matrix_[0]=matrix_[5]=matrix_[10]
                        =matrix_[15]=1;
}
```

Mnożenie


```
void Mat4::MultiplyBy(const Mat4 & m2){
 float new_matrix[16];
 unsigned int row, column, row_offset;
 for (row = 0, row_offset = row * 4;
    row < 4; ++row, row_offset = row * 4)
  for (column = 0; column < 4; ++column)
    new_matrix[row_offset + column] =
    (matrix_[row_offset + 0]*m2.matrix_[column + 0])
   +(matrix_[row_offset + 1]*m2.matrix_[column + 4])
   +(matrix_[row_offset + 2]*m2.matrix_[column + 8])
   +(matrix_[row_offset + 3]*m2.matrix_[column + 12])
 for (int i=0; i<16; i++) matrix_[i]=new_matrix[i];
}
```

Skalowanie


```
void Mat4::Scale(float x, float y, float z){
    Mat4 scale;

    scale.matrix_[0] = x;
    scale.matrix_[5] = y;
    scale.matrix_[10] = z;

    MultiplyBy(scale);
}
```

Translacja


```
void Mat4::Translate(float x, float y, float z){
    Mat4 translate;

    translate.matrix_[12] = x;
    translate.matrix_[13] = y;
    translate.matrix_[14] = z;

    MultiplyBy(translate);
}
```

Obrót dookoła Ox


```
void Mat4::RotateAboutX(float degrees){
    Mat4 rotation;
    float radians=degrees*M_PI/180.0f;
    float sine = (float)sin(radians);
    float cosine = (float)cos(radians);

    rotation.matrix_[5] = cosine;
    rotation.matrix_[6] = sine;
    rotation.matrix_[9] = -sine;
    rotation.matrix_[10] = cosine;

    MultiplyBy(rotation);
}
```

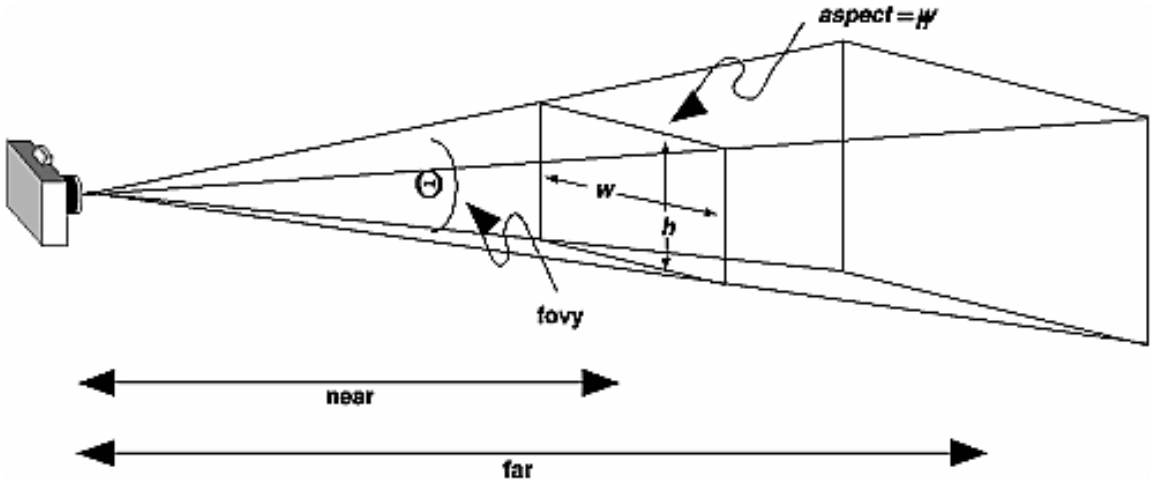
Obrót dookoła Oy


```
void Mat4::RotateAboutY(float degrees){
    Mat4 rotation;
    float radians=degrees*M_PI/180.0f;
    float sine = (float)sin(radians);
    float cosine = (float)cos(radians);

    rotation.matrix_[0] = cosine;
    rotation.matrix_[2] = -sine;
    rotation.matrix_[8] = sine;
    rotation.matrix_[10] = cosine;

    MultiplyBy(rotation);
}
```

Obrót dookoła Oz


```
void Mat4::RotateAboutZ(float degrees){
    Mat4 rotation;
    float radians=degrees*M_PI/180.0f;
    float sine = (float)sin(radians);
    float cosine = (float)cos(radians);

    rotation.matrix_[0] = cosine;
    rotation.matrix_[1] = sine;
    rotation.matrix_[4] = -sine;
    rotation.matrix_[5] = cosine;

    MultiplyBy(rotation);
}
```

Macierz rzutowania



$$\begin{bmatrix} xScale & 0 & 0 & 0 \\ 0 & yScale & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{zFar+zNear}{zFar-zNear} & -\frac{2\cdot zNear\cdot zFar}{zFar-zNear} \\ 0 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}$$

gdzie $yScale = \cot(\frac{fovy}{2})$ oraz $xScale = \frac{f}{aspect}$.

Implementacja


```
Mat4 Mat4::CreatePerspectiveProjectionMatrix(
        float fovy, float aspect_ratio,
        float near_plane, float far_plane){

  Mat4 out(0);
  float y_scale = 1.0/tan(fovy * M_PI / 360.0 );
  float x_scale = y_scale / aspect_ratio;
  float frustum_length = far_plane - near_plane;
  out.matrix_[0] = x_scale;
  out.matrix_[5] = y_scale;
  out.matrix_[10] = -((far_plane + near_plane)
                    / frustum_length);
  out.matrix_[11] = -1;
  out.matrix_[14] = -((2*near_plane*far_plane)
                    / frustum_length);
  return out;
}
```