Politechnika Wrocławska

Wydział Informatyki i Telekomunikacji

Grafika komputerowa i komunikacja człowiek-komputer			
Temat:	Laboratorium 7 – Potok graficzny oparty o shadery		
Termin zajęć:	środa TN 14:15 – 17:15 semestr zimowy 2023/2024		
Autor:	Eryk Mika 264451	**Prowadzący:**	Dr inż. arch. Tomasz Zamojski

1. Cel laboratorium

Celem laboratorium było poznanie elementów współczesnego potoku graficznego. Analizowano wykorzystanie jednostek cieniujących w *OpenGL* oraz sposoby przekazywania danych wierzchołków do karty graficznej. Zaznajomiono się z mechanizmem rysowania instancyjnego.

2. Kod wspólny dla wszystkich zadań

Rozwiązania zadań z tego laboratorium są znacznie odmienne od rozwiązań zadań z poprzednich ćwiczeń ze względu na wykorzystanie wstawek języka *OpenGL Shading Language* (*GLSL*). Posiada on składnię podobną do języka *C* i jest dostosowany do potrzeb grafiki komputerowej. Programy napisane w języku *GLSL* – **shadery** - są wykonywane na procesorze graficznym (GPU) i są one linkowane (łączone) z programem wykonywanym „klasycznie" na procesorze (CPU).

Kod realizujący podstawowy potok graficzny z wykorzystaniem shaderów wierzchołków oraz fragmentów został dostarczony przez Prowadzącego. Shader wierzchołków (*vertex_shader_source*) jest uruchamiany dla każdego wierzchołka z osobna i jest zwykle użyty do transformacji jego położenia. Shader fragmentów (*fragment_shader_source*) jest uruchamiany dla każdego wynikowego fragmentu rasteryzacji – rysowania – użyty jest do określenia koloru piksela. Shadery umieszczone są wewnątrz funkcji *compile_shaders()* (Rysunek 2.1).

```
24      vertex_shader_source = """
25          #version 330 core
26
27          layout(location = 0) in vec4 position;
28
29          uniform mat4 M_matrix;
30          uniform mat4 V_matrix;
31          uniform mat4 P_matrix;
32
33          void main(void) {
34              gl_Position = P_matrix * V_matrix * M_matrix * position;
35          }
36      """
37
38      fragment_shader_source = """
39          #version 330 core
40
41          out vec4 color;
42
43          void main(void) {
44              color = vec4(0.7, 0.7, 0.7, 1.0);
45          }
46      """
```

Rysunek 2.1 Kod shaderów wewnątrz funkcji compile_shaders()

Dane mogą być zapisywane bezpośrednio w shaderach – mogą być typu *uniform* – są one dostępne we wszystkich shaderach, oraz typu *in*/*out* – są one wtedy przekazywane odpowiednio do/z danych shaderów w potoku. Możliwa jest także wymiana danych z głównym programem. W tym celu stosuje się, między innymi, bufory. Są one deklarowane z określoną nazwą, zapisywane są w nich dane, a następnie następuje dowiązanie bufora do kontekstu *OpenGL*.

Najważniejszym buforem wykorzystywanym w rozwiązaniach wszystkich zadań jest bufor *vertex_buffer* będący odniesieniem do macierzy/tablicy *vertex_positions*, która przechowuje informacje o położeniach wierzchołków. Za pomocą funkcji *glBindBuffer()* określa się przeznaczenie bufora, a następnie dane do niego są kopiowane z listy *vertex_positions* za pomocą funkcji *glBufferData()*. Ostatecznie, wywołanie funkcji *glVertexAttribPointer()* określa, w jaki sposób zawartość bufora ma być rozdzielona pomiędzy kolejno uruchamiane instancje shadera. Wywołanie funkcji *glEnableVertexAttribArray()* powoduje przekazywanie wycinków bufora do shaderów[1] (Rysunek 2.2). Tablica w linii 106. została zwinięta ze względu na jej znaczny rozmiar.

```
106 >   vertex_positions = numpy.array([ ···
155
156     vertex_buffer = glGenBuffers(1)
157     glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vertex_buffer)
158     glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, vertex_positions, GL_STATIC_DRAW)
159
160     glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 0, ctypes.c_void_p(0))
161     glEnableVertexAttribArray(0)
```

Rysunek 2.2 Obsługa bufora związanego z vertex_positions w funkcji startup()

Wewnątrz funkcji *render()* następuje przekazanie zmiennych z głównego programu do shaderów. Następuje powiązanie lokalizacji w programie ze zmiennymi typu *uniform* w przedstawionych shaderach (Rysunek 2.3).

```
188     M_location = glGetUniformLocation(rendering_program, "M_matrix")
189     V_location = glGetUniformLocation(rendering_program, "V_matrix")
190     P_location = glGetUniformLocation(rendering_program, "P_matrix")
191     glUniformMatrix4fv(M_location, 1, GL_FALSE, glm.value_ptr(M_matrix))
192     glUniformMatrix4fv(V_location, 1, GL_FALSE, glm.value_ptr(V_matrix))
193     glUniformMatrix4fv(P_location, 1, GL_FALSE, glm.value_ptr(P_matrix))
```

Rysunek 2.3 Fragment funkcji render() – powiązanie lokalizacji zmiennych w głównym programie oraz shaderach

[1] https://learnopengl.com/Getting-started/Shaders

3. Zadanie na ocenę 3.0 – skrypt *lab3_0.py*

W zadaniu tym należało zaobserwować działanie dostarczonego skryptu oraz go zmodyfikować – zmienić kolor wyświetlanego sześcianu.

W celu realizacji zadania zmodyfikowano kod shaderów – wierzchołków oraz fragmentów – w sposób opisany w instrukcji do laboratorium. W shaderze wierzchołków utworzono nową zmienną *out vec4 vertex_color*, której wartość została przypisana wewnątrz funkcji *main()* – poprzez przypisanie wektora wartości *vec4* (Rysunek 3.1). W shaderze fragmentów utworzono natomiast nową zmienną wejściową *in vec4 vertex_color*, której nazwa pokrywa się z nazwą zmiennej wyjściowej z shadera wierzchołków. W funkcji *main()* shadera fragmentów następuje przypisanie tej wartości do zmiennej *color* (Rysunek 3.2).

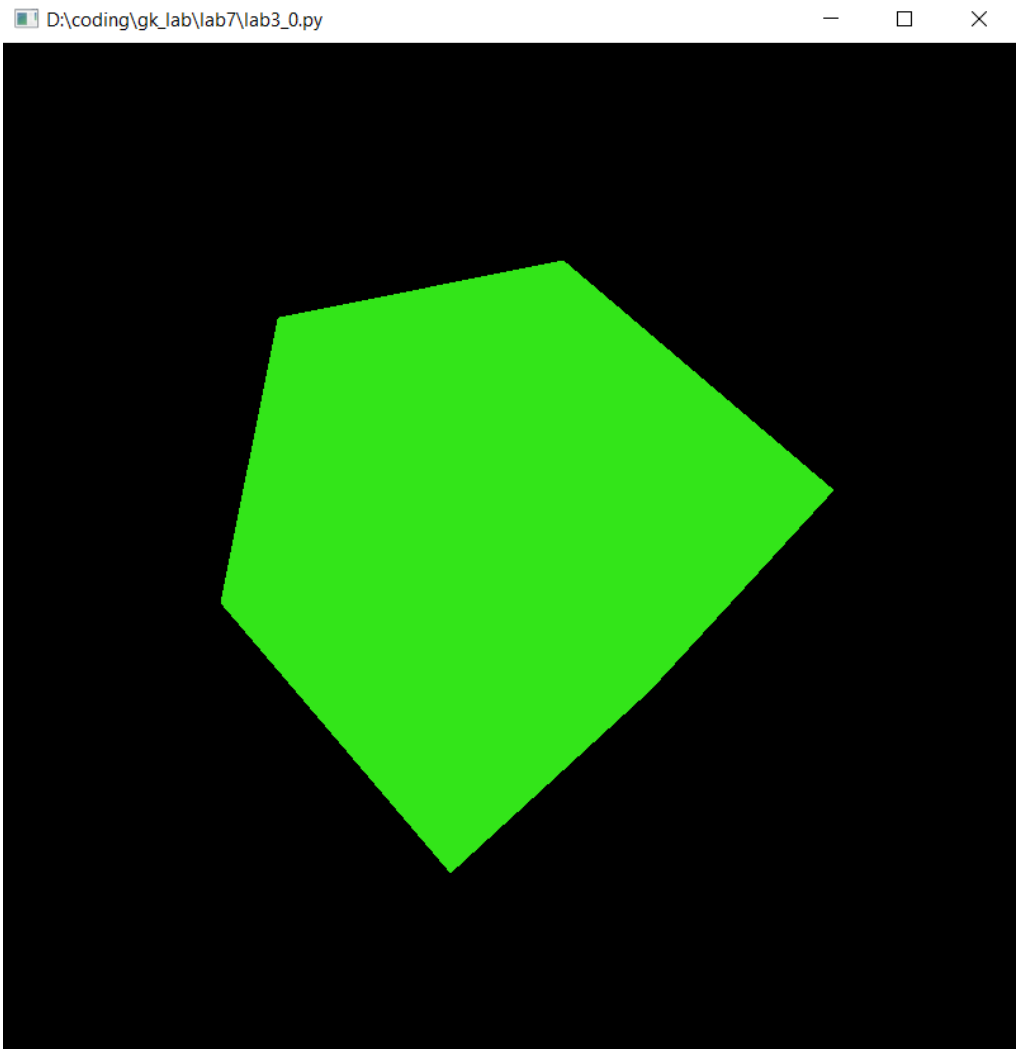
```
24      vertex_shader_source = """
25          #version 330 core
26
27          layout(location = 0) in vec4 position;
28
29          uniform mat4 M_matrix;
30          uniform mat4 V_matrix;
31          uniform mat4 P_matrix;
32          out vec4 vertex_color;
33
34          void main(void) {
35              gl_Position = P_matrix * V_matrix * M_matrix * position;
36              vertex_color = vec4(0.2, 0.9, 0.1, 1.0);
37          }
38      """
```

Rysunek 3.1 Shader wierzchołków dla zadania na ocenę 3.0

```
40      fragment_shader_source = """
41          #version 330 core
42
43          in vec4 vertex_color;
44          out vec4 color;
45
46          void main(void) {
47              color = vertex_color;
48          }
49      """
```

Rysunek 3.2 Shader fragmentów dla zadania na ocenę 3.0

Efekt działania skryptu przedstawia Rysunek 3.3.



Rysunek 3.3 Efekt działania skryptu na ocenę 3.0

4. Zadanie na ocenę 3.5 – skrypt *lab3_5.py*

W zadaniu tym należało zmodyfikować kolory bryły z poprzedniego zadania tak, aby każdy bok sześcianu miał inny kolor.

W celu realizacji zadania w shaderze wierzchołków została zadeklarowana nowa zmienna *in vec4 color*, która jest następnie przekazywana do shadera fragmentów poprzez zmienną typu *out – vertex_color* (Rysunek 4.1). Zmienna *color* jest określana z indeksem 1, dzięki czemu można ją powiązać z danymi z głównego programu[2].

[2] https://www.khronos.org/opengl/wiki/Vertex_Shader#Inputs

```
25      vertex_shader_source = """
26          #version 330 core
27
28          layout(location = 0) in vec4 position;
29          layout(location = 1) in vec4 color;
30
31          uniform mat4 M_matrix;
32          uniform mat4 V_matrix;
33          uniform mat4 P_matrix;
34          out vec4 vertex_color;
35
36          void main(void) {
37              gl_Position = P_matrix * V_matrix * M_matrix * position;
38              vertex_color = color;
39          }
40      """
41
42      fragment_shader_source = """
43          #version 330 core
44
45          out vec4 frag_color;
46          in vec4 vertex_color;
47
48          void main(void) {
49              frag_color = vec4(vertex_color);
50          }
51      """
```

Rysunek 4.1 Kod shaderów dla zadania na ocenę 3.5

W głównym kodzie programu – wewnątrz funkcji *startup()* - zmodyfikowana została tablica *vertex_positions*. W pierwotnej wersji definiuje ona położenia wierzchołków trójkątów tworzących poszczególne boki sześcianu – po 2 trójkąty na każdy bok. W związku z tym 6 kolejnych wierszy w tej tablicy powiązane jest z jednym bokiem sześcianu. Zastosowana modyfikacja polega na dopisaniu w każdym wierszu 3 liczb określających składowe RGB koloru danej ściany – takich samych dla 6 kolejnych wierszy (Rysunek 4.2).

```
106     vertex_positions = numpy.array([
107         -0.25, +0.25, -0.25, 0.0, 0.0, 1.0,
108         -0.25, -0.25, -0.25, 0.0, 0.0, 1.0,
109         +0.25, -0.25, -0.25, 0.0, 0.0, 1.0,
110 
111         +0.25, -0.25, -0.25, 0.0, 0.0, 1.0,
112         +0.25, +0.25, -0.25, 0.0, 0.0, 1.0,
113         -0.25, +0.25, -0.25, 0.0, 0.0, 1.0,
114 
115         +0.25, -0.25, -0.25, 1.0, 1.0, 0.0,
116         +0.25, -0.25, +0.25, 1.0, 1.0, 0.0,
117         +0.25, +0.25, -0.25, 1.0, 1.0, 0.0,
118 
119         +0.25, -0.25, +0.25, 1.0, 1.0, 0.0,
120         +0.25, +0.25, +0.25, 1.0, 1.0, 0.0,
121         +0.25, +0.25, -0.25, 1.0, 1.0, 0.0,
122 
123         +0.25, -0.25, +0.25, 0.604, 0.075, 0.639,
124         -0.25, -0.25, +0.25, 0.604, 0.075, 0.639,
125         +0.25, +0.25, +0.25, 0.604, 0.075, 0.639,
126 
127         -0.25, -0.25, +0.25, 0.604, 0.075, 0.639,
128         -0.25, +0.25, +0.25, 0.604, 0.075, 0.639,
129         +0.25, +0.25, +0.25, 0.604, 0.075, 0.639,
```

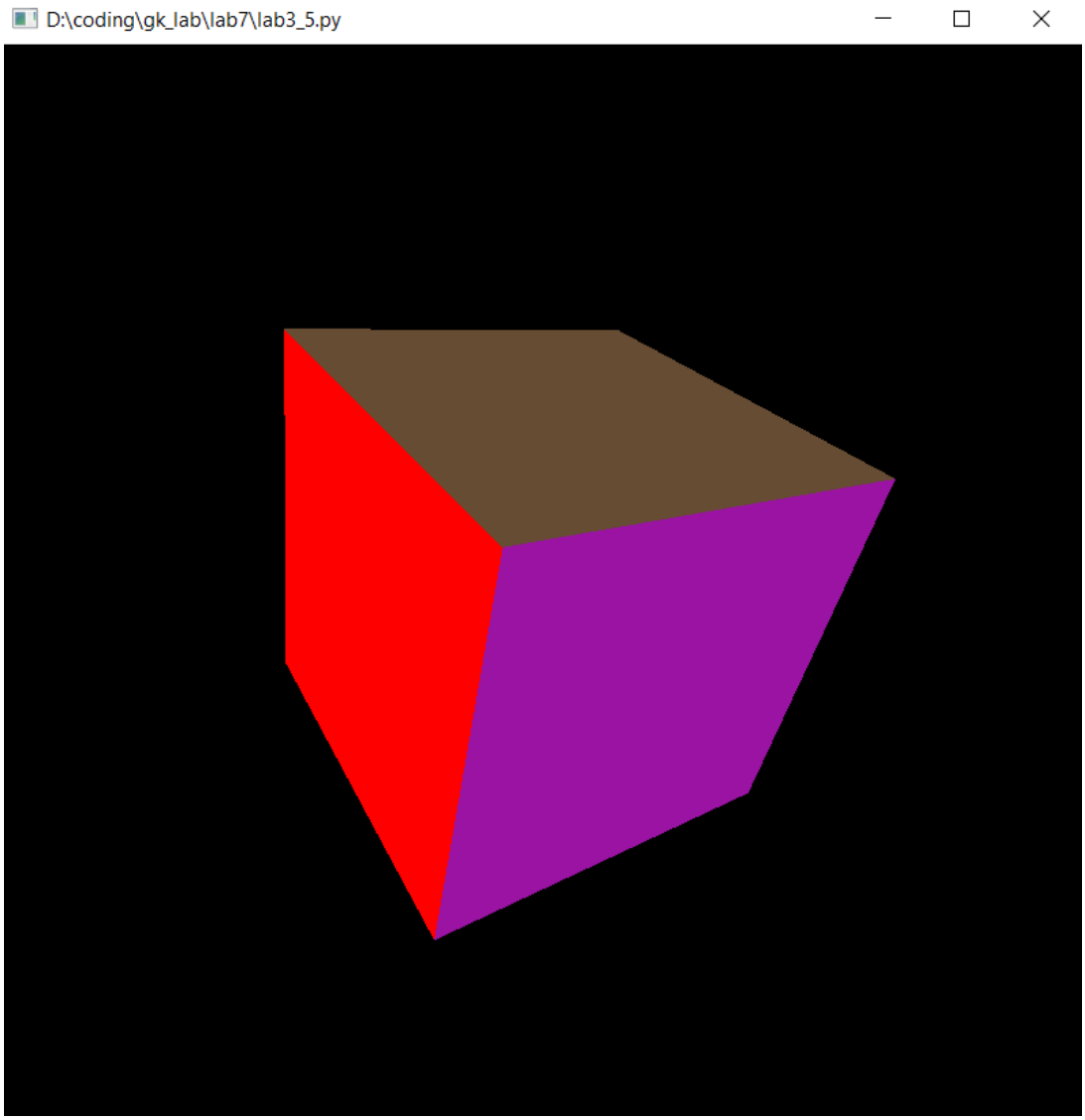
Rysunek 4.2 Fragment tablicy vertex_positions dla zadania na ocenę 3.5

Następnie, w sposób opisany wcześniej, tworzony jest bufor dla koloru. Następuje powiązanie z wartościami z tablicy *vertex_positions*. W wywołaniach funkcji *glVertexAttribPointer()* zmodyfikowano argument *stride* na 24 bajty – aby uwzględnić przesunięcie wywołane dodaniem nowych wartości do tablicy (32-bitowe liczby typu *float*, czyli 4-bajtowe liczby, 4 bajty x 3 = 12 bajtów na 3 kolejne liczby, 24 bajty – cały wiersz). Jednocześnie, dla bufora koloru ustawiono wskaźnik rozpoczęcia danych na 12 bajtów (Rysunek 4.3).

```
156     vertex_buffer = glGenBuffers(1)
157     color_buffer = glGenBuffers(1)
158     glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, vertex_buffer)
159     glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, vertex_positions, GL_STATIC_DRAW)
160     glBindBuffer(GL_ARRAY_BUFFER, color_buffer)
161     glBufferData(GL_ARRAY_BUFFER, vertex_positions, GL_STATIC_DRAW)
162 
163     glVertexAttribPointer(0, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 24, ctypes.c_void_p(0))
164     glEnableVertexAttribArray(0)
165     glVertexAttribPointer(1, 3, GL_FLOAT, GL_FALSE, 24, ctypes.c_void_p(12))
166     glEnableVertexAttribArray(1)
```

Rysunek 4.3 Powiązanie buforów dla zadania na ocenę 3.5

Efekt działania skryptu przedstawia Rysunek 4.4.



Rysunek 4.4 Efekt działania skryptu na ocenę 3.5

5. Zadanie na ocenę 4.0 – skrypt *lab4_0.py*

W zadaniu tym należało stworzyć wiele kopii obiektu – klasycznie na CPU. Celem było utworzenie planszy instancji obiektu.

W celu realizacji zadania ograniczono się, zgodnie ze wskazówkami, jedynie do wprowadzenia zmian w funkcji *render()*. Pojedyncze wywołanie funkcji *glDrawArrays()* zamieniono na wywoływanie tej funkcji wewnątrz zagnieżdżonej pętli *for*. Po każdym wywołaniu, następuje transformacja – translacja[3] macierzy *M_matrix* o wektor (1.0, 0.0, 0.0). Po zakończeniu wewnętrznej pętli, następuje „cofnięcie" rysowania na początek wzdłuż wartości *x* – translacja o

[3] http://www.opengl-tutorial.org/beginners-tutorials/tutorial-3-matrices/#the-model-view-and-projection-matrices

wektor (-10.0, 0.0, 0.0). W celu utworzenia planszy konieczna jest także translacja o wektor (0.0, 1.0, 0.0) - wzdłuż wartości *y* (Rysunek 5.1).

```
201     for i in range(10):
202         for j in range(10):
203             glDrawArrays(GL_TRIANGLES, 0, 36)
204             M_matrix = glm.translate(M_matrix, glm.vec3(1.0, 0.0, 0.0))
205             glUniformMatrix4fv(M_location, 1, GL_FALSE, glm.value_ptr(M_matrix))
206         M_matrix = glm.translate(M_matrix, glm.vec3(-10.0, 0.0, 0.0))
207         glUniformMatrix4fv(M_location, 1, GL_FALSE, glm.value_ptr(M_matrix))
208         M_matrix = glm.translate(M_matrix, glm.vec3(0.0, 1.0, 0.0))
209         glUniformMatrix4fv(M_location, 1, GL_FALSE, glm.value_ptr(M_matrix))
```

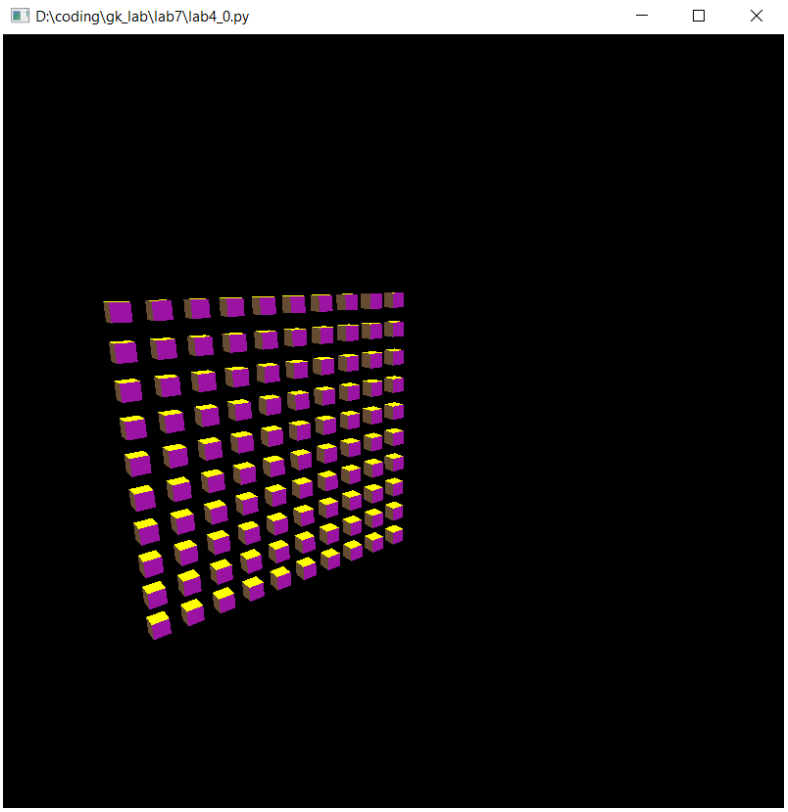
Rysunek 5.1 Algorytm rysowania planszy instancji obiektu dla zadania na ocenę 4.0

Dla poprawy obserwacji uzyskanych obiektów zmodyfikowano, zgodnie ze wskazówkami, wartości macierzy *V_matrix* (przemieszczenie i oddalenie kamery) - Rysunek 5.2.

```
186     V_matrix = glm.lookAt(
187         glm.vec3(10.0, 20.0, 0.0),
188         glm.vec3(5.0, 2.0, 0.0),
189         glm.vec3(2.0, 2.0, 0.0)
190     )
```

Rysunek 5.2 Macierz V_matrix dla zadania na ocenę 4.0

Efekt działania skryptu przedstawia Rysunek 5.3.



Rysunek 5.3 Efekt działania skryptu na ocenę 4.0

6. Zadanie na ocenę 4.5 – skrypt *lab4_5.py*

W zadaniu tym należało wykorzystać mechanizm renderowania instancyjnego. Celem było uzyskanie takiego samego efektu jak w zadaniu poprzednim.

Większość zmian w kodzie w porównaniu do rozwiązania zadania poprzedniego związana jest z kodem shadera wierzchołków. Zastosowana implementacja jest wydajniejsza. Wykorzystując mechanizm rysowania instancyjnego, większość obliczeń przeprowadzane jest na procesorze graficznym (GPU) – w tym transformacje wierzchołków.

W głównym programie, wewnątrz funkcji *render()*, zagnieżdżoną pętlę for zastąpiono pojedynczym wywołaniem funkcji *glDrawArraysInstanced()* – jednocześnie rysowane jest 100 instancji obiektu (plansza 10x10 – jak w poprzednim zadaniu) - Rysunek 6.1.

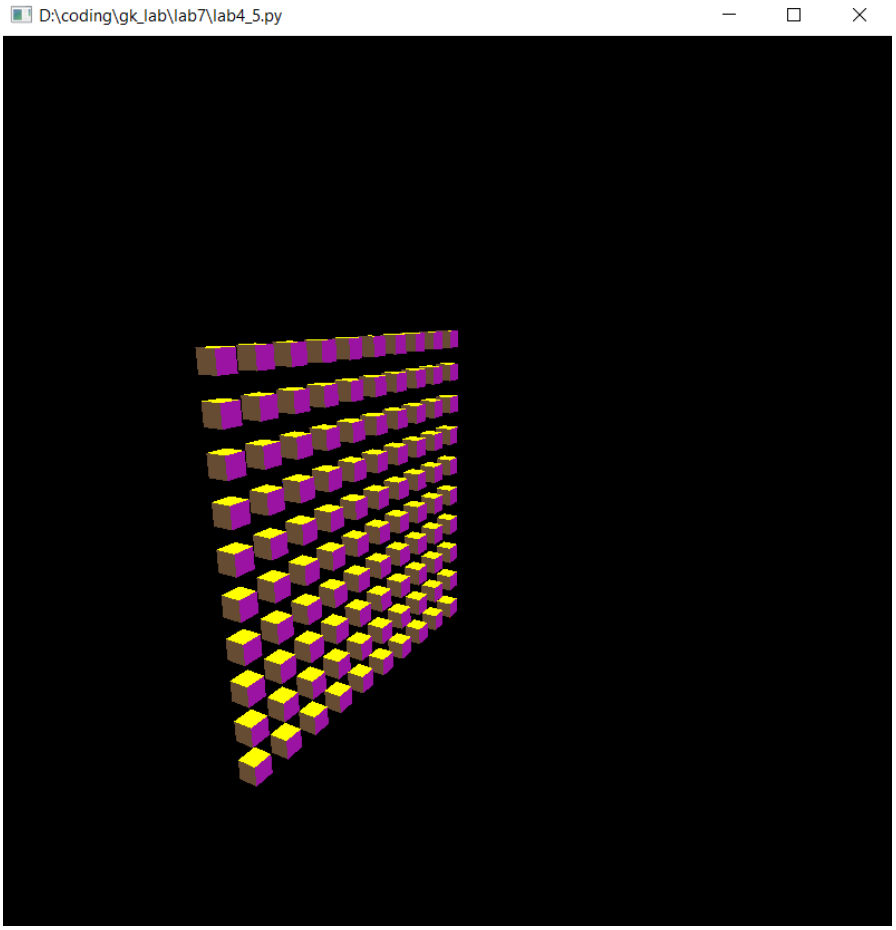
```
210     # Rysowanie instancyjne - 10x10 obiektow
211     glDrawArraysInstanced(GL_TRIANGLES, 0, 36, 100)
```

Rysunek 6.1 Wywołanie funkcji rysującej w sposób instancyjny

W kodzie shadera wierzchołków, wewnątrz funkcji *main()*, uzależniono transformacje obiektu od zmiennej *gl_InstanceID*, która numeruje rysowane instancje. Zmienna *x_shift* (przesunięcie w poziomie) wyznaczana jest jako reszta z dzielenia numeru instancji przez 10, natomiast *y_shift* (przesunięcie w pionie) wyznaczane jest jako iloraz numeru instancji i 10 (Rysunek 6.2). Zastosowanie tych wartości do transformacji wynikowego położenia jako elementy wektora wartości *vec4* umożliwia uzyskanie efektu takiego samego jak dla zadania na ocenę 4.0 – Rysunek 6.3.

```
25      vertex_shader_source = """
26          #version 330 core
27
28          layout(location = 0) in vec4 position;
29          layout(location = 1) in vec4 color;
30
31          uniform mat4 M_matrix;
32          uniform mat4 V_matrix;
33          uniform mat4 P_matrix;
34
35          out vec4 vertex_color;
36
37          void main(void) {
38              // Przesuniecie w poziomie
39              int x_shift = gl_InstanceID%10;
40              // Przesuniecie w pionie
41              int y_shift = gl_InstanceID/10;
42              // Wynikowe polozenie
43              gl_Position = P_matrix * V_matrix * M_matrix * (
44              position + vec4(x_shift, y_shift, 0, 0)
45              );
46              vertex_color = color;
47          }
48      """
```

Rysunek 6.2 Kod shadera wierzchołków w zadaniu na ocenę 4.5



Rysunek 6.3 Efekt działania skryptu na ocenę 4.5

7. Zadanie na ocenę 5.0 – skrypt *lab5_0.py*

W zadaniu tym należało wprowadzić deformacje każdego obiektu – każdy obiekt miał być zdeformowany inaczej. Konieczne było zrealizowanie ich na poziomie shadera wierzchołków.

Kod, w porównaniu do rozwiązania zadania poprzedniego, został zmodyfikowany jedynie w shaderze wierzchołków. Zgodnie ze wskazówkami zawartymi w instrukcji, deformacje zostały wygenerowane poprzez zastosowanie funkcji pseudolosowych. Zdecydowano się na użycie autorskiej modyfikacji metody *middle-square method*[4], która, w uproszczeniu, polega na podnoszeniu pewnej liczby – ziarna generatora liczb pseudolosowych – do kwadratu, a następnie „wyciąganiu" pewnych cyfr ze „środka" w zapisie tej liczby – w ten sposób powstaje wynik. We własnym rozwiązaniu zdecydowano się na ustalenie dla każdego wierzchołka trzech „ziaren" – dla transformacji wzdłuż współrzędnych *x*, *y*, *z* (*random_x*, *random_y*, *random_z*), które powstają z wymnożenia numerów danej instancji (*gl_InstanceID*) oraz wierzchołka (*gl_VertexID*), do których dodatkowo dodane są stałe (1, 10, 5), co polepsza efekt pseudolosowości. Otrzymane liczby są podnoszone do potęgi 6, dzielone przez 1000, a następnie obliczana jest reszta z ich dzielenia przez

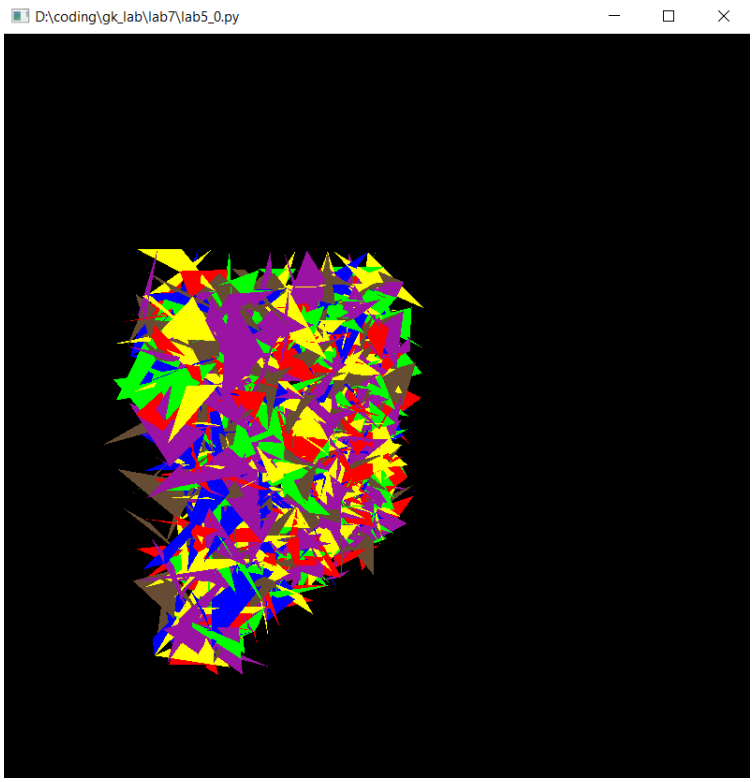
[4] https://en.wikipedia.org/wiki/Middle-square_method

10, co powoduje uzyskanie „losowej” cyfry. Uzyskane wartości są użyte do modyfikacji transformacji wzdłuż wartości *x* i *y* (*x_shift* i *y_shift*) oraz *z* - po podzieleniu przez 6, co ma na celu względne zmniejszenie skali transformacji (Rysunek 7.1).

```
36      void main(void) {
37          // "Ziarna" do wyznaczenia liczb pseudolosowych - zalezne od id wierzcholka oraz obiektu
38          int random_x = (gl_InstanceID + 1) * (gl_VertexID + 1);
39          int random_y = (gl_InstanceID + 10) * (gl_VertexID + 10);
40          int random_z = (gl_InstanceID + 5) * (gl_VertexID + 5);
41
42          /*
43             Generatory liczb (cyfr) pseudolosowych - wariacja middle-square method.
44             Wydobywane sa cyfry ze "srodka" liczb.
45          */
46          random_x = (( random_x*random_x*random_x*random_x*random_x*random_x ) / 1000 ) % 10;
47          random_y = (( random_y*random_y*random_y*random_y*random_y*random_y ) / 1000 ) % 10;
48          random_z = (( random_z*random_z*random_z*random_z*random_z*random_z ) / 1000 ) % 10;
49
50          // Przesuniecie w poziomie - modulo 10
51          int x_shift = gl_InstanceID%10;
52          // Przesuniecie w pionie
53          int y_shift = gl_InstanceID/10;
54
55          // Wynikowe polozenie - wprowadzone deformacje
56          gl_Position = P_matrix * V_matrix * M_matrix * (
57          position +  vec4(x_shift + random_x/6,
58                           y_shift + random_y/6,
59                           random_z/6,
60                           0)
61          );
62          vertex_color = color;
63      }
```

Rysunek 7.1 Funkcja main() w shaderze wierzchołków w zadaniu na ocenę 5.0

Efekt działania skryptu przedstawia Rysunek 7.2.



Rysunek 7.2 Efekt działania skryptu na ocenę 5.0