POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

Katedra Informatyki Technicznej

Zakład Systemów Komputerowych i Dyskretnych

Grafika komputerowa i komunikacja człowiek – komputer

Kurs: INEK00012L

Sprawozdanie z projektu

„Metoda śledzenia promieni (Ray Tracing)”

Wykonał:	**Adrian Frydmański**
Termin:	**WT/P 12:00-15:00**
Data wykonania ćwiczenia:	**24 I 2016**
Data oddania sprawozdania:	**25 I 2016**
Ocena:	

Uwagi prowadzącego:

SPIS TREŚCI

WSTĘP TEORETYCZNY

Celem projektu było wykorzystanie metody śledzenia promieni – ray tracingu – do stworzenia obrazu trójwymiarowego.

Algorytm rekursywnego śledzenia promieni różni się od algorytmu używanego w poprzednich zadaniach. W prostym algorytmie (Ray Casting) promień biegł od obserwatora, przez punkt na rzutni w głąb sceny i był śledzony tylko do ewentualnego pierwszego przecięcia z obiektem sceny. W rekursywnej metodzie śledzenia promieni analizowany promień po trafieniu w pierwszy obiekt sceny śledzony jest dalej. Po trafieniu promienia w obiekt, wylicza się kierunek promienia odbitego i sprawdza, czy nie trafia on w kolejny obiekt itd.

KOD ŹRÓDŁOWY

```
#include "stdafx.h"                     // odpowiednie biblioteki w nagłówku

//*************************************************************************/
// definiowanie struktur
struct something                        // obiekt
{
        vector <float> position;
        vector <float> specular;
        vector <float> diffuse;
        vector <float> ambient;
};
struct sphere : public something        // sfera
{
        float radius;
        float specularshininess;
};
struct source : public something {};    // źródło światła

//*************************************************************************/
// Zmienne globalne
typedef float point[3];                 // wektor 3 liczb
point background;                       // kolor tła
point globallight;                      // kolor globalnego oświetlenia
int im_size_x, im_size_y;               // Rozmiar obrazu w pikselach
float viewport_size_x = 15.0;           // Rozmiary okna obserwatora
float viewport_size_y = 15.0;
float global_a[] = { globallight[0], globallight[1], globallight[2] };  // Parametry światła rozproszonego
float starting_point[3];                // Parametry śledzonego promienia - punkt startowy
float starting_directions[] = { 0.0, 0.0, -1.0 };       // i kierunek
int iter = 8;                           // liczba iteracji
float inter[3];
int inters;
float inters_c[3];
float kon[] = { 0.0, 0.0, 0.0 };
float reflection_vector[3];
float normal_vector[3];
float reflection[3];
int typ = -1;
GLubyte pixel[1][1][3];
vector <sphere> spheres;                // sfery
vector <source> sources;                // źródła światła
int displayMode = 1;                    // tryb wyświetlania (1 - bez zmiany proporcji, 2 - dopasowanie)

//*************************************************************************/
// Funkcja przeprowadza normalizację wektora
void Normalization(point p)
{
        float d = 0.0;
        int i;

        for (i = 0; i<3; i++)
                d += p[i] * p[i];

        d = sqrt(d);

        if (d>0.0)
                for (i = 0; i<3; i++)
```

```
                        p[i] /= d;
}

//*************************************************************************/
// Funkcja oblicza iloczyn skalarny wektorów
float dotProduct(point p1, point p2)
{
        return (p1[0] * p2[0] + p1[1] * p2[1] + p1[2] * p2[2]);
}

//*************************************************************************/
// Funkcja oblicza oświetlenie punktu na powierzchni sfery zgodnie
// z modelem Phonga
void Phong(int typ, float *viewer_v, float *normal_vector)
{
        float wektor[3];
        wektor[0] = normal_vector[0];
        wektor[1] = normal_vector[1];
        wektor[2] = normal_vector[2];
        float light_vec[3];                                     // wektor wskazujący źródło światła
        float n_dot_l, v_dot_r;                                 // zmienne pomocnicze

        inters_c[0] = 0; inters_c[1] = 0; inters_c[2] = 0;      //zerujemy wektory
        for (int i = 0; i < sources.size(); i++)
        {
                light_vec[0] = sources[i].position[0] - inter[0];
                light_vec[1] = sources[i].position[1] - inter[1];
                light_vec[2] = sources[i].position[2] - inter[2];

                Normalization(light_vec);                       // normalizacja wektora kierunku
                                                                // świecenia źródła
                n_dot_l = dotProduct(light_vec, wektor);
                reflection_vector[0] = 2 * (n_dot_l)*(wektor[0]) - light_vec[0];
                reflection_vector[1] = 2 * (n_dot_l)*(wektor[1]) - light_vec[1];
                reflection_vector[2] = 2 * (n_dot_l)*(wektor[2]) - light_vec[2];
                Normalization(reflection_vector);
                v_dot_r = dotProduct(reflection_vector, viewer_v);

                if (n_dot_l > 0)                // punkt jest oświetlany,
                {                               // oświetlenie wyliczane jest ze wzorów dla modelu Phonga
                        float x = sqrt((sources[i].position[0] - inter[0])*(sources[i].position[0] - inter[0])
+ (sources[i].position[1] - inter[1])*(sources[i].position[1] - inter[1]) + (sources[i].position[2] -
inter[2])*(sources[i].position[2] - inter[2]));
                        inters_c[0] += (1.0 / (1.0 + 0.01*x + 0.001*x*x))*(spheres[typ].diffuse[0] *
sources[i].diffuse[0] * n_dot_l + spheres[typ].specular[0] * sources[i].specular[0] * pow(double(v_dot_r),
20.0)) + spheres[typ].ambient[0] * sources[i].ambient[0] + spheres[typ].ambient[0] * global_a[0];
                        inters_c[1] += (1.0 / (1.0 + 0.01*x + 0.001*x*x))*(spheres[typ].diffuse[1] *
sources[i].diffuse[1] * n_dot_l + spheres[typ].specular[1] * sources[i].specular[1] * pow(double(v_dot_r),
20.0)) + spheres[typ].ambient[1] * sources[i].ambient[1] + spheres[typ].ambient[1] * global_a[1];
                        inters_c[2] += (1.0 / (1.0 + 0.01*x + 0.001*x*x))*(spheres[typ].diffuse[2] *
sources[i].diffuse[2] * n_dot_l + spheres[typ].specular[2] * sources[i].specular[2] * pow(double(v_dot_r),
0.0)) + spheres[typ].ambient[2] * sources[i].ambient[2] + spheres[typ].ambient[2] * global_a[2];
                }
                else                                            // punkt nie jest oświetlany
                {                                               // uwzględniane jest tylko światło rozproszone
                        inters_c[0] += spheres[typ].ambient[0] * global_a[0];
                        inters_c[1] += spheres[typ].ambient[1] * global_a[1];
                        inters_c[2] += spheres[typ].ambient[2] * global_a[2];
                }
        }
}

//*************************************************************************/
// Funkcja normalizująca wektor
void Normal(int typ, float *normal_vector)
{
        normal_vector[0] = inter[0] - spheres[typ].position[0];
        normal_vector[1] = inter[1] - spheres[typ].position[1];
        normal_vector[2] = inter[2] - spheres[typ].position[2];
        Normalization(normal_vector);
}

//*************************************************************************/
// Liczenie odbicia
```

```
void Reflect(float *normal_vector, float *v)
{
	float il;
	float invert[3];
	invert[0] = -v[0]; invert[1] = -v[1]; invert[2] = -v[2];
	Normalization(invert);
	il = dotProduct(invert, normal_vector);
	reflection[0] = 2 * (il)*normal_vector[0] - invert[0];
	reflection[1] = 2 * (il)*normal_vector[1] - invert[1];
	reflection[2] = 2 * (il)*normal_vector[2] - invert[2];
	Normalization(reflection);
}

//**********************************************************************/
// Wyznaczenie współrzędnych punktu przecięcia z najbliższym obiektem sceny
int Intercest(float *p, float *v, int typ)
{
	float r, a, b, c, d, r1, r2, min, dl, status, pier;
	status = -1;
	min = 0;
	float tmp[3];
	for (int i = 0; i < spheres.size(); i++) {
		if (i != typ)
		{
			r = -2.0;
			a = v[0] * v[0] + v[1] * v[1] + v[2] * v[2];
			b = 2 * (p[0] * v[0] + p[1] * v[1] + p[2] * v[2] - spheres[i].position[0] * v[0] -
spheres[i].position[1] * v[1] - spheres[i].position[2] * v[2]);
			c = p[0] * p[0] + p[1] * p[1] + p[2] * p[2] - 2 * (spheres[i].position[0] * p[0] +
spheres[i].position[1] * p[1] + spheres[i].position[2] * p[2]) + spheres[i].position[0] *
spheres[i].position[0] + spheres[i].position[1] * spheres[i].position[1] + spheres[i].position[2] *
spheres[i].position[2] - spheres[i].radius * spheres[i].radius;
			d = b*b - 4 * a*c;
			if (d >= 0) {
				pier = sqrt(d);
				r1 = (-b - pier) / (2 * a);
				r2 = (-b + pier) / (2 * a);
				if (d == 0 && r1 >= 0)
					r = r1;
				else
					if (r1>0 || r2>0)
						if (r1>r2)
							if (r2>0)
								r = r2;
							else
								r = r1;
						else
							if (r1>0)
								r = r1;
							else
								r = r2;
				if (r>0) {
					tmp[0] = p[0] + r*v[0];
					tmp[1] = p[1] + r*v[1];
					tmp[2] = p[2] + r*v[2];
					dl = sqrt((tmp[0] - p[0])*(tmp[0] - p[0]) + (tmp[1] - p[1])*(tmp[1] -
p[1]) + (tmp[2] - p[2])*(tmp[2] - p[2]));
					if (r < min || min == 0)
					{
						min = dl; status = i;
						inter[0] = tmp[0];
						inter[1] = tmp[1];
						inter[2] = tmp[2];
					}
				}
			}
		}
	}
	return status;
}

//**********************************************************************/
// Funkcja śledząca promień
int Trace(float *p, float *v, int step)
```

```
{
	if (step > iter)
		return 0;

	typ = Intercest(p, v, typ);
	if (typ >= 0)
	{
		Normal(typ, normal_vector);
		Reflect(normal_vector, v);
		Phong(typ, v, normal_vector);
		kon[0] += inters_c[0];
		kon[1] += inters_c[1];
		kon[2] += inters_c[2];
		Trace(inter, reflection, step + 1);
	}
	if (typ < 0)
	{

		return 0;
	}
	return 0;
}

//************************************************************************/
// Funkcja rysująca obraz oświetlonej sceny
void Display(void)
{
	int  x, y;                                      // pozycja rysowanego piksela "całkowitoliczbowa"
	float x_fl, y_fl;                               // pozycja rysowanego piksela "zmiennoprzecinkowa"
	int im_size_x_2 = im_size_x / 2;                // połowa rozmiaru obrazu w pikselach
	int im_size_y_2 = im_size_y / 2;

	if (im_size_x > im_size_y)
		viewport_size_x = viewport_size_y * im_size_x / im_size_y;
	else if (im_size_x < im_size_y)
		viewport_size_y = viewport_size_x * im_size_y / im_size_x;

	glClear(GL_COLOR_BUFFER_BIT);
	glFlush();

	// rysowanie pikseli od lewego górnego narożnika do prawego dolnego narożnika
	for (y = im_size_y_2; y > -im_size_y_2; y--)
	{
		for (x = -im_size_x_2; x < im_size_x_2; x++)
		{
			x_fl = (float)x / (im_size_x / viewport_size_x);
			y_fl = (float)y / (im_size_y / viewport_size_y);
			// przeliczenie pozycji(x,y) w pikselach na pozycję
			// "zmiennoprzecinkową" w oknie obserwatora
			starting_point[0] = x_fl;
			starting_point[1] = y_fl;
			starting_point[2] = viewport_size_x;
			// wyznaczenie początku śledzonego promienia dla rysowanego piksela
			kon[0] = 0.0; kon[1] = 0.0; kon[2] = 0.0;
			Trace(starting_point, starting_directions, 1);
			if (kon[0] == 0.0) kon[0] = background[0];
			if (kon[1] == 0.0) kon[1] = background[1];
			if (kon[2] == 0.0) kon[2] = background[2];
			// obliczenie punktu przecięcia ze sferą
			// konwersja wartości wyliczonego oświetlenia na liczby od 0 do 255

			if (kon[0] > 1)                 // składowa czerwona R
				pixel[0][0][0] = 255;
			else
				pixel[0][0][0] = kon[0] * 255;

			if (kon[1] > 1)                 // składowa zielona G
				pixel[0][0][1] = 255;
			else
				pixel[0][0][1] = kon[1] * 255;

			if (kon[2] > 1)                 // składowa niebieska B
				pixel[0][0][2] = 255;
			else
```

```
                        pixel[0][0][2] = kon[2] * 255;
                    glRasterPos3f(x_fl, y_fl, 0);

                    // inkrementacja pozycji rastrowej dla rysowania piksela
                    glDrawPixels(1, 1, GL_RGB, GL_UNSIGNED_BYTE, pixel);
                    // Narysowanie kolejnego piksela na ekranie
                }
        }
        glFlush();
}

//*************************************************************************/
// Zmiana rozmiaru okna
void ChangeSize(GLsizei horizontal, GLsizei vertical)
{
        GLfloat AspectRatio;                    // proporcja wymiarów okna
        if (vertical == 0)                      // Zabezpieczenie przed dzieleniem przez 0
                vertical = 1;
        glViewport(0, 0, horizontal, vertical); // Ustawienie wielkoœciokna okna widoku (viewport)
        glMatrixMode(GL_PROJECTION);            // Przełączenie macierzy bieżącej na macierz projekcji
        glLoadIdentity();                       // Czyszczenie macierzy bieżącej
        AspectRatio = (GLfloat)horizontal / (GLfloat)vertical;  // Wyznaczenie współczynnika proporcji okna
        switch (displayMode)                    // zastosowanie wybranego przez użytkownika trybu wyświetlania
        {
        case 1:
                if (horizontal <= vertical)
                        glOrtho(-viewport_size / 2, viewport_size / 2, -viewport_size / AspectRatio / 2,
viewport_size / AspectRatio / 2, viewport_size, -viewport_size);
                else
                        glOrtho(-viewport_size*AspectRatio / 2, viewport_size*AspectRatio / 2, -viewport_size
/ 2, viewport_size / 2, viewport_size, -viewport_size);
                break;
        case 2:
                glOrtho(-viewport_size / 2, viewport_size / 2, -viewport_size / 2, viewport_size / 2, -
viewport_size / 2, viewport_size / 2);
                break;
        }
        glMatrixMode(GL_MODELVIEW);             // Przełączenie macierzy bieżącej na macierz widoku modelu
        glLoadIdentity();                       // Czyszczenie macierzy bieżącej
}

//*************************************************************************/
// Obsługa klawiszy
void Keys(unsigned char key, int x, int y)
{
        // dla klawiszy 1 i 2 zmiana trybu wyœwietlania, gdy jest inny ni¿ wciœniêty
        if ((key == '1' || key == '2') && key - '0' != displayMode)
        {
                displayMode = key - '0';        //zmiana trybu wyświetlania
                ChangeSize(glutGet(GLUT_WINDOW_WIDTH), glutGet(GLUT_WINDOW_HEIGHT));    // wywołanie funkcji
zmieniającej proporcje sceny
                Display();                      // przerysowanie sceny
        }
        else if (key == '+')
        {
                iter++;                         // zwiększenie liczby iteracji
                Display();                      // przerysowanie sceny
        }
        else if (key == '-' && iter > 0)
        {
                iter--;                         // zmniejszenie liczby iteracji
                Display();                      // przerysowanie sceny
        }
}

//*************************************************************************/
// Odczytywanie danych z pliku
void pobierzDane(string name)
{
        if (name.length() == 0)
                name = "scene.txt";
        fstream plik(name, ios::in);
        if (!plik)
                cerr << "brak pliku 'scene.txt'";
```

```
	cout << "Ray Tracing\nAdrian Frydmański (209865)\n----Window:----------------------------------------
-------------------------\n";
	char buf[20];
	float liczba;
	while (!plik.eof())
	{
		plik >> buf;
		if (buf[0] == 'd')			// dimensions
		{
			plik >> liczba;
			im_size_x = liczba;
			plik >> liczba;
			im_size_y = liczba;
			cout << "Dimensions = (" << im_size_x << "," << im_size_y << ")\nBackground = (";
		}
		else if (buf[0] == 'b')			// background
		{
			for (int i = 0; i < 3; i++)
			{
				plik >> liczba;
				background[i] = liczba;
				cout << background[i] << ",";
			}
			cout << ")\nGlobal = (";
		}
		else if (buf[0] == 'g')			// globat
		{
			for (int i = 0; i < 3; i++)
			{
				plik >> liczba;
				globallight[i] = liczba;
				cout << globallight[i] << ",";
			}
			cout << ")\n----------------------------------------------------------------------------
-----\n"
				" r-radius, p-position, s-specular, d-diffuse, a-ambient, ss-
specularshininess\n"
				"----Objects:------------------------------------------------------------------
--\n";
		}
		else if (buf[0] == 's')
			if (buf[1] == 'p')			// sfera
			{
				sphere s;
				plik >> liczba;
				s.radius = liczba;		// radius
				cout << "Sphere " << spheres.size() + 1 << ": r=" << s.radius << " p=(";
				for (int i = 0; i < 3; i++)
				{
					plik >> liczba;
					s.position.push_back(liczba);		// position
					cout << s.position[i];
					if (i < 2)
						cout << ",";
				}
				cout << ") s=(";
				for (int i = 0; i<3; i++)
				{
					plik >> liczba;
					s.specular.push_back(liczba);		// specular
					cout << s.specular[i];
					if (i < 2)
						cout << ",";
				}
				cout << ") d=(";
				for (int i = 0; i < 3; i++)
				{
					plik >> liczba;
					s.diffuse.push_back(liczba);		// diffuse
					cout << s.diffuse[i];
					if (i < 2)
						cout << ",";
				}
				cout << ") a=(";
```

```
                        for (int i = 0; i < 3; i++)
                        {
                                plik >> liczba;
                                s.ambient.push_back(liczba);            // ambient
                                cout << s.ambient[i];
                                if (i < 2)
                                        cout << ",";
                        }
                        plik >> liczba;
                        s.specularshininess = liczba;                   // specularshininess
                        cout << ") ss=" << s.specularshininess << "\n";
                        spheres.push_back(s);                           // dodaj sferę do vectora
                }
                else if (buf[1] == 'o')
                {
                        source s;
                        cout << "Source " << sources.size()+1 << ": p = (";
                        for (int i = 0; i < 3; i++)
                        {
                                plik >> liczba;
                                s.position.push_back(liczba);           // position
                                cout << s.position[i];
                                if (i < 2)
                                        cout << ",";
                        }
                        cout << ") s=(";
                        for (int i = 0; i < 3; i++)
                        {
                                plik >> liczba;
                                s.specular.push_back(liczba);           // specular
                                cout << s.specular[i];
                                if (i < 2)
                                        cout << ",";
                        }
                        cout << ") d=(";
                        for (int i = 0; i < 3; i++)
                        {
                                plik >> liczba;
                                s.diffuse.push_back(liczba);            // diffuse
                                cout << s.diffuse[i];
                                if (i < 2)
                                        cout << ",";
                        }
                        cout << ") a=(";
                        for (int i = 0; i < 3; i++)
                        {
                                plik >> liczba;
                                s.ambient.push_back(liczba);            // ambient
                                cout << s.ambient[i];
                                if (i < 2)
                                        cout << ",";
                        }
                        cout << ")\n";
                        sources.push_back(s);                   // dodaj źródło światła do vectora
                }
        }
        plik.close();
        cout << "-------------------------------------------------------------------------------\n";
}

//*********************************************************************/
// Główna funkcja
void main(void)
{
        setlocale(LC_ALL, "");
        pobierzDane("");
        glutInitDisplayMode(GLUT_SINGLE | GLUT_RGBA);
        glutInitWindowSize(im_size_x, im_size_y);
        glutCreateWindow("Ray Tracing - 209865");
        glutDisplayFunc(Display);
        glutKeyboardFunc(Keys);
        glutReshapeFunc(ChangeSize);
        glutMainLoop();
}
```

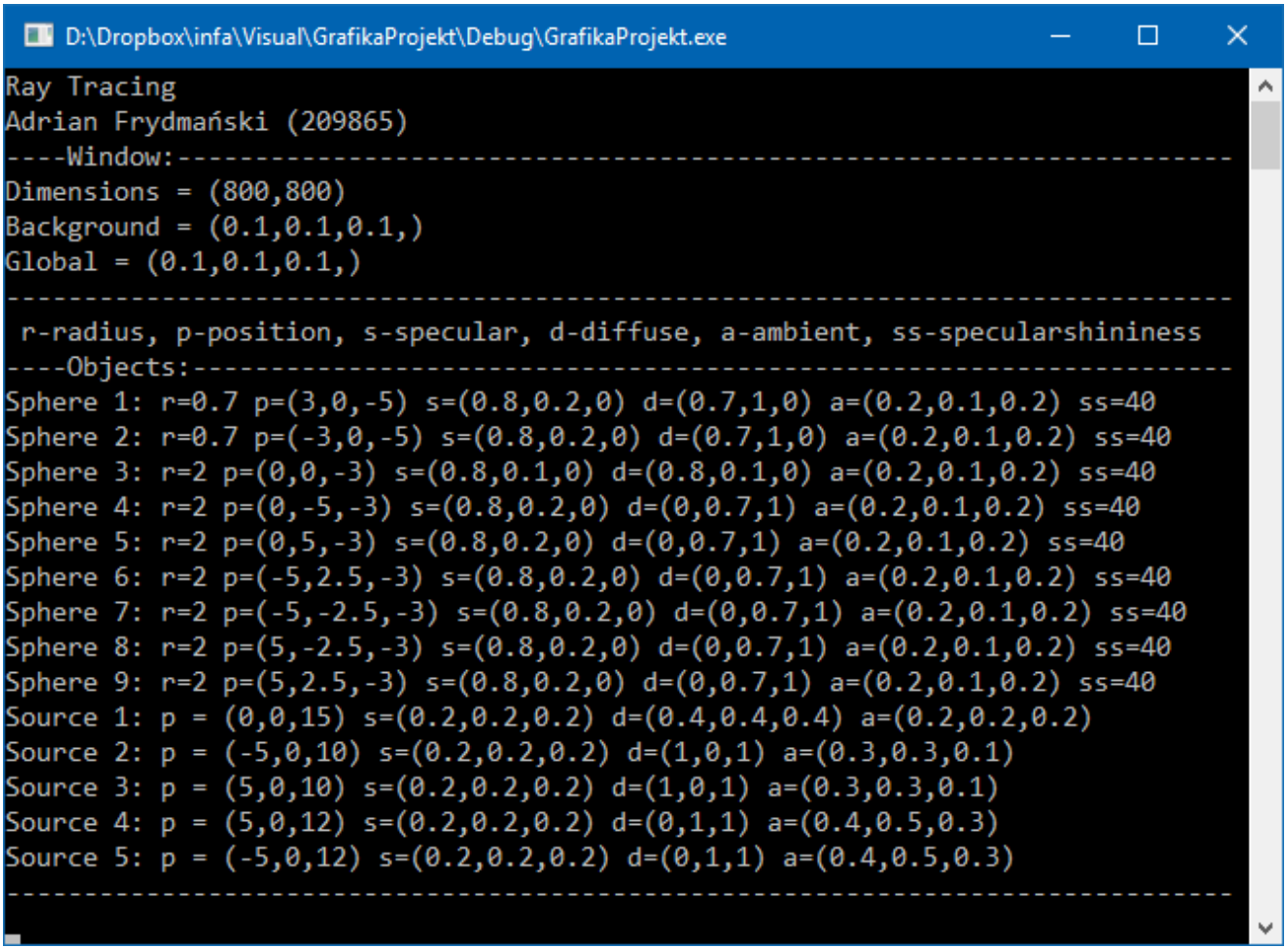
DZIAŁANIE

Program wczytuje odpowiednio przygotowany plik. W sprawozdaniu wyniki działania programu będą opierać się o następujące dane wejściowe w pliku scene.txt:

```
dimensions 800 800
background 0.1 0.1 0.1
global 0.1 0.1 0.1
sphere 0.7   3.0    0.0  -5.0      0.8 0.2 0.0  0.7 1.0 0.0  0.2 0.1 0.2  40
sphere 0.7  -3.0    0.0  -5.0      0.8 0.2 0.0  0.7 1.0 0.0  0.2 0.1 0.2  40
sphere 2.0   0.0    0.0  -3.0      0.8 0.1 0.0  0.8 0.1 0.0  0.2 0.1 0.2  40
sphere 2.0   0.0   -5.0  -3.0      0.8 0.2 0.0  0.0 0.7 1.0  0.2 0.1 0.2  40
sphere 2.0   0.0    5.0  -3.0      0.8 0.2 0.0  0.0 0.7 1.0  0.2 0.1 0.2  40
sphere 2.0  -5.0    2.5  -3.0      0.8 0.2 0.0  0.0 0.7 1.0  0.2 0.1 0.2  40
sphere 2.0  -5.0   -2.5  -3.0      0.8 0.2 0.0  0.0 0.7 1.0  0.2 0.1 0.2  40
sphere 2.0   5.0   -2.5  -3.0      0.8 0.2 0.0  0.0 0.7 1.0  0.2 0.1 0.2  40
sphere 2.0   5.0    2.5  -3.0      0.8 0.2 0.0  0.0 0.7 1.0  0.2 0.1 0.2  40
source       0.0    0.0  15.0      0.2 0.2 0.2  0.4 0.4 0.4  0.2 0.2 0.2
source      -5.0    0.0  10.0      0.2 0.2 0.2  1.0 0.0 1.0  0.3 0.3 0.1
source       5.0    0.0  10.0      0.2 0.2 0.2  1.0 0.0 1.0  0.3 0.3 0.1
source       5.0    0.0  12.0      0.2 0.2 0.2  0.0 1.0 1.0  0.4 0.5 0.3
source      -5.0    0.0  12.0      0.2 0.2 0.2  0.0 1.0 1.0  0.4 0.5 0.3
```

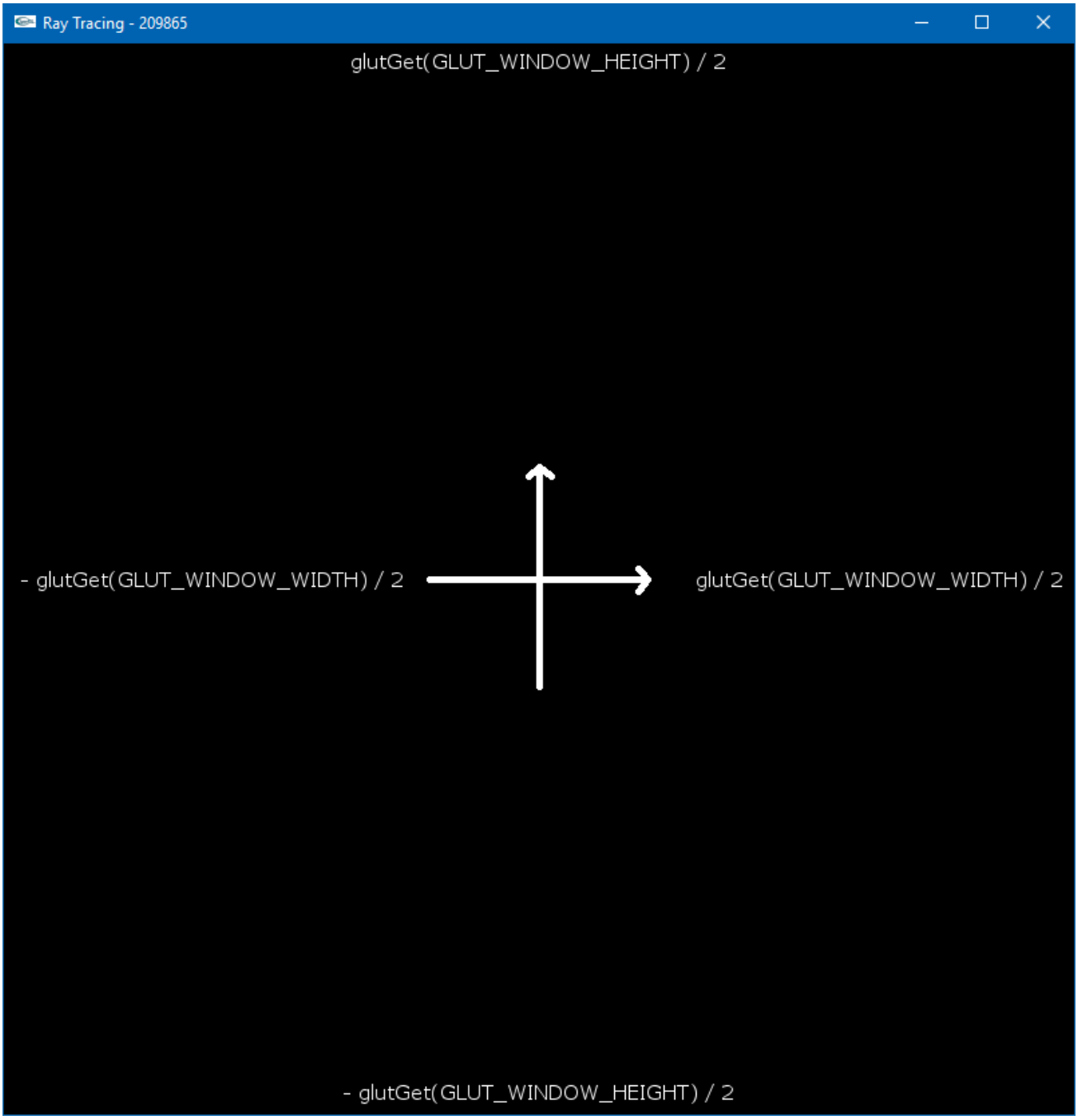
Na początku zostają podane wymiary okna, szerokość i wysokość, kolor tła i kolor globalnego oświetlenia. Następnie, w zależności od pierwszego wyrazu linii, odczytywane są dane sfery (promień, współrzędne środka, współczynniki materiałowe powierzchni dla światła otoczenia, światła rozproszonego i kierunkowego oraz współczynnik połysku), lub źródła światła (współrzędne punktu, w którym umieszczone jest źródło, składowe kolorów określające intensywności świecenia źródła dla światła otoczenia, światła rozproszonego i kierunkowego).

Po uruchomieniu pliki zostają wczytane:



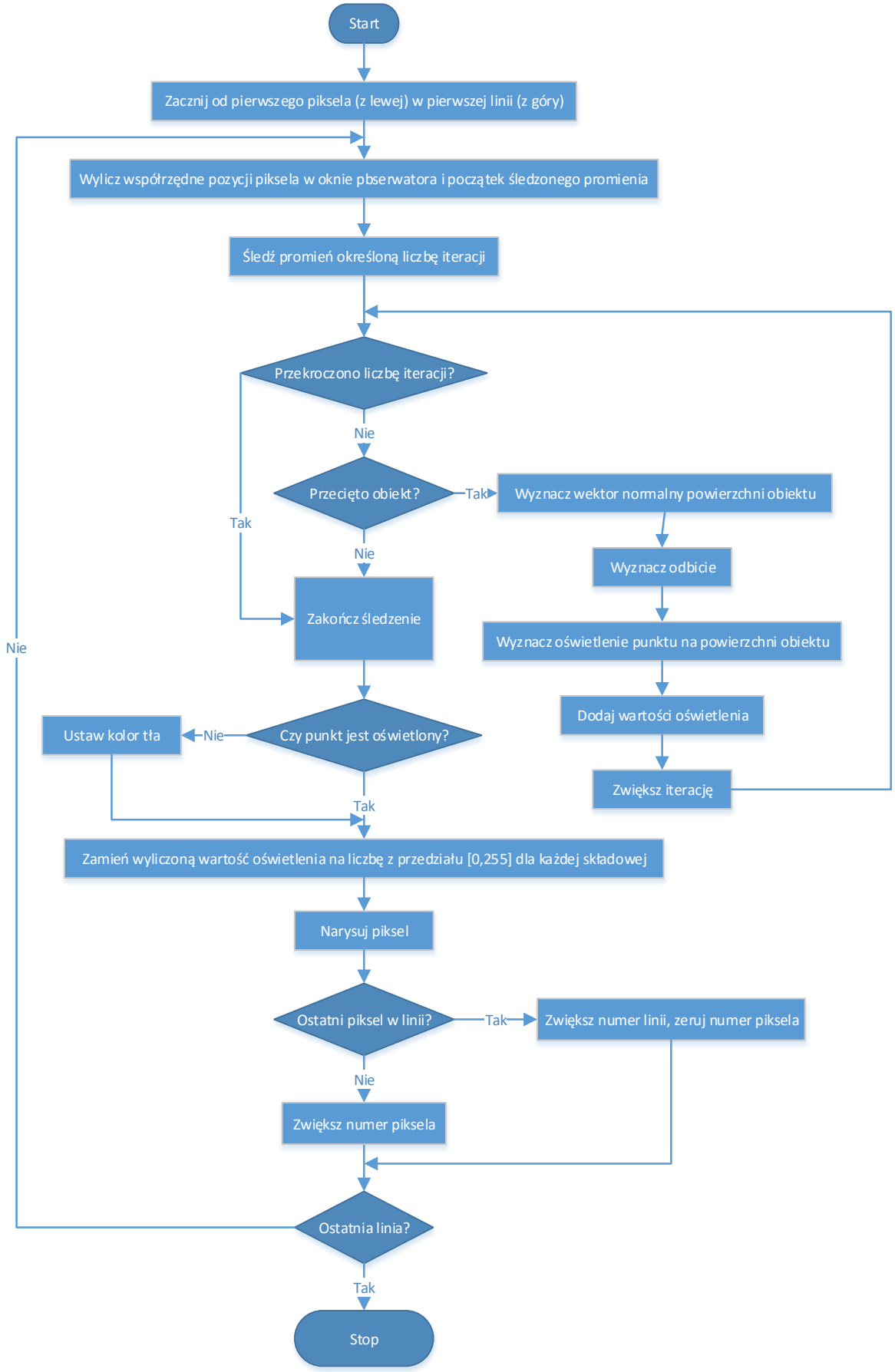
Rysunek 1 Konsolowe okno programu

Po wczytaniu danych rysowanie nadzoruje funkcja Display. Piksele rysowane są od lewego górnego do prawego dolnego narożnika. Granice pętli od –x/2 i y/2 do x/2 i –y/2 sprawiają, że środek wyświetlanego obrazu jest w środku okna, jak widać na poniższym rysunku:



Rysunek 2 Granice pętli

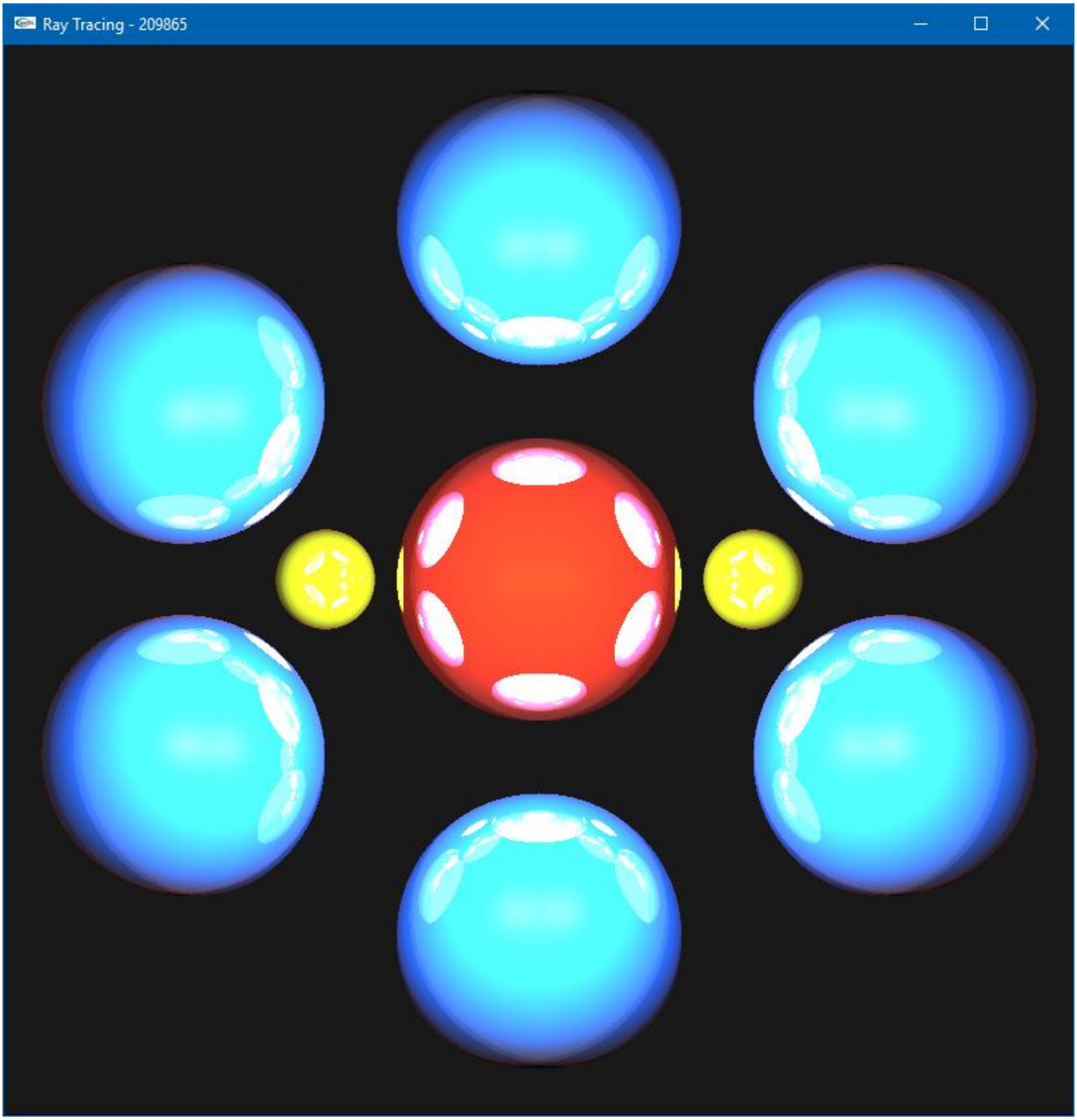
Cały algorytm rysowania jest opisany na poniższym schemacie:



Rysunek 3 Kroki algorytmu rysującego obraz metodą śledzenia promieni

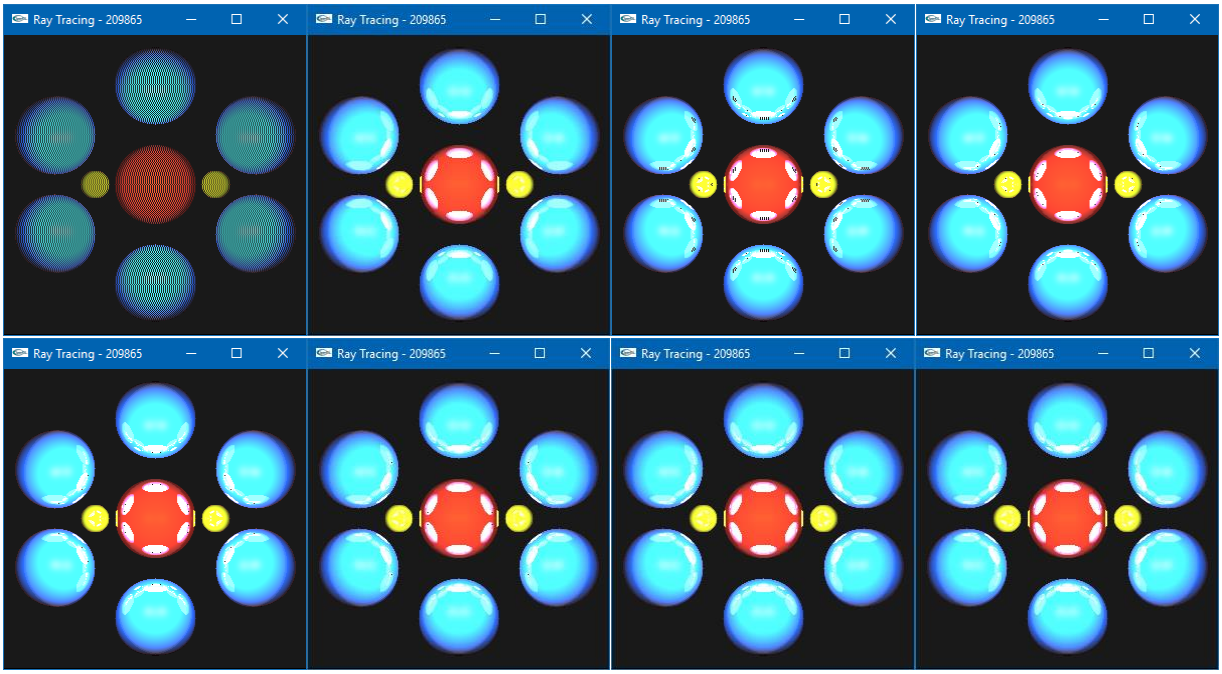
Program w funkcji zwrotnej dla klawiszy pozwala na zmianę proporcji obrazu z kwadratu na rozciągnięcie do granic okna (klawisze 1 i 2). Ponadto możliwa jest zmiana liczby iteracji w śledzeniu promienia (klawisze + i -).

Zrenderowany obraz o wymiarach 800x800 wygląda następująco:



Rysunek 4 Obraz stworzony na podstawie wczytanego pliku

Liczba iteracji w śledzeniu promienia ma wpływ na otrzymany obraz, co ilustrują poniższe przykłady.



Rysunek 5 Renderowany obraz 300x300 w zależności od liczby iteracji (od 1 do 8)

Dla zbyt „płytkich” rekurencji – ze zbyt małym ograniczeniem iteracji – promień nie trafia na kolejny obiekt i śledzenie się kończy. Widać wtedy prześwitujące w dziwny sposób tło zamiast oświetlonej powierzchni obiektu. Już dla dwóch iteracji efekt ten maleje i jest znikomy. Dla 8 iteracji obraz można uznać za ładny.

Jak łatwo się domyślić, wraz ze wzrostem liczby iteracji, liniowo rośnie czas wykonywania się algorytmu.

PODSUMOWANIE

Ćwiczenie pokazało, w jaki sposób tworzony jest obraz w metodzie śledzenia promieni i trudności z nim związane.