

Uniwersytet Wrocławski
Wydział Fizyki i Astronomii

Marcin Pietrzak

Galeria modeli komputerowych w silniku Unreal

Computer models gallery in Unreal Engine

Praca inżynierska na kierunku
Informatyka Stosowana i Systemy Pomiarowe

Opiekun
dr hab. Maciej Matyka, prof. UWr

Wrocław, 17 maja 2023

Spis treści

1 Wstęp	5
1.1 Wprowadzenie	5
1.2 Cel i zakres pracy	6
2 Warstwa Użytkowa	8
2.1 Wygląd i Obsługa programu	8
2.2 Wygląd Galerii w Programie	9
3 Warstwa Programistyczna	10
3.1 Unreal Engine 4	10
3.2 Język C++	11
3.3 Oculus Quest	11
4 Modele wykorzystane w programie	12
4.1 Wahadło Podwójne	12
4.1.1 Wahadło podwójne - kod	12
4.1.2 Wahadło podwójne - UE4	15
4.1.3 Wahadło podwójne - Wygląd symulacji w projekcie	16
4.2 Gra w życie	18
4.2.1 Gra w życie - kod	19
4.2.2 Gra w życie - UE4	20
4.2.3 Gra w życie - Wygląd symulacji w projekcie	22
4.3 Efekt Motyla	23
4.3.1 Efekt Motyla - kod	24
4.3.2 Efekt Motyla - UE4	24
4.3.3 Efekt Motyla - Wygląd symulacji w projekcie	26
4.4 Modele Agentowe	27
4.4.1 Modele Agentowe - kod	27
4.4.2 Modele Agentowe - UE4	30
4.4.3 Modele Agentowe - Wygląd symulacji w projekcie	32
4.5 Ptaki (Boids)	34
4.5.1 Ptaki - kod	34
4.5.2 Ptaki - UE4	36
4.5.3 Ptaki - Wygląd symulacji w projekcie	38
5 Sterowanie postacią w grze i mapa	39
5.0.1 AVRCharacter - Postać gracza	39
5.0.2 Pokój galerii w programie	41
6 Wnioski	42

Streszczenie

Celem pracy jest stworzenie programu do pokazania kilku wybranych modeli komputerowych. We wstępie została krótko opisana historia obecnego rynku VR, a także cel i zakres pracy. W kolejnym rozdziale zostało opisane, jak wygląda program dla użytkownika końcowego, jak wygląda podstawowe poruszanie się po programie oraz jak wygląda poziom (pokój galerii). W następnym został krótko opisane silnik Unreal Engine 4, język C++ i gogle Oculus Quest, które pozwoliły na realizację projektu. Rozdział 4 skupia się na modelach komputerowych. Zaczynając od przedstawienia historii, która stoi za danym modelem, kolejno jest opis klas C++, które tworzą dany model oraz jak wygląda implementacja klas w projekcie przy użyciu BluePrintów. Każdy podrozdział dotyczący modeli kończy krótki opis wyglądu danego modelu w projekcie oraz link do filmu który pokazuje model w działaniu. Przedostatni rozdział skupia się na pozostałych aspektach projektu. Pracę inżynierską kończy zbiór wniosków.

Abstract

The aim of the thesis is to create a program showcasing several selected computer models. The introduction briefly describes the history of the current VR market, as well as the purpose and scope of the work. The next chapter describes what the program looks like for the end-user, how basic navigation in the program works, and what the level (gallery room) looks like. The following chapter briefly describes the Unreal Engine 4, the C++ language, and the Oculus Quest goggles that enabled the project's realization. Chapter 4 focuses on computer models. Starting with the presentation of the history behind each model, the C++ classes that create each model are described, as well as how the classes are implemented in the project using Blueprints. Each subchapter about the models ends with a brief description of the model's appearance in the project and a link to a video showing the model in action. The penultimate chapter focuses on the remaining aspects of the project. The engineering thesis concludes with a collection of conclusions.

1 Wstęp

1.1 Wprowadzenie

W ciągu ostatnich 10 lat rynek gogli VR zaczął się budzić na nowo dzięki jednemu z ojców założycieli firmy Oculus, Palmer Luckey. Wiek 16 lat zaczął budować swoje pierwsze gogle VR, a kilka lat później założył firmę Oculus i dzięki udanej zbiórce na Kickstarterze jego firma miała fundusze stworzyć swoje pierwsze sklepowe gogle. Po drodze firma wypuściła kilka prototypów dla deweloperów. Sama firma została przejęta przez Facebooka, dzisiaj znana jako Meta, za 2 miliardy dolarów w 2014 roku. Ich pierwsze komercyjne gogle, Oculus Rift, zostały wydane w 2016 roku i kosztowały na start 599 dolarów. W 2017 roku z firmą pożegnał się Palmer Luckey, który obecnie zajmuje się firmą tworzącą technologię obronne. Natomiast kolejnym komercyjnym sprzętem Oculusa był Oculus Go wydanym w 2018 roku jako sprzęt all-in-one, czyli nie wymagały zewnętrznych urządzeń, czy przewodów do działania. Gogle dzięki brakowi potrzeby podłączania komputera, czy smartfonu okazały się ogromną innowacją na rynku sprzętu VR. Koszt gogli zaczynał się od 199 dolarów w dniu premiery. W kolejnym roku zostały wydane dwa nowe rodzaje gogli. Pierwszym był następca Oculusa Rifta, czyli Oculus Rift S kosztującym 400 dolarów. Podobnie jak jego poprzednik były stworzone zmyślą o PCVR. Recenzentom sprzęt też nie przypadł do gustu, zarzucając mu zbyt małą ilość innowacji od poprzedniej wersji. Inaczej było z drugim produktem, który wypuścili w podobnym czasie, czyli Oculus Quest. Cena premierowa zaczynała się od 399 dolarów. Quest, podobnie jak jego poprzednik nie wymagał żadnych dodatkowych urządzeń do działania. Dzięki dość niskiej cenie, jak za możliwości, które oferowały gogle, okazały się one ogromnym sukcesem dla Oculusa na tyle ogromnym, że zaczęły one powoli wypychać swojego brata Rift S z rynku, a gwoździem do trumny dla Rift S było ogłoszenie przez Oculusa, że można będzie Questa podłączyć do PC i korzystać z nich jak Rift S. Sam Oculus od tego momentu zaczął tworzyć tylko gogle autonomiczne.



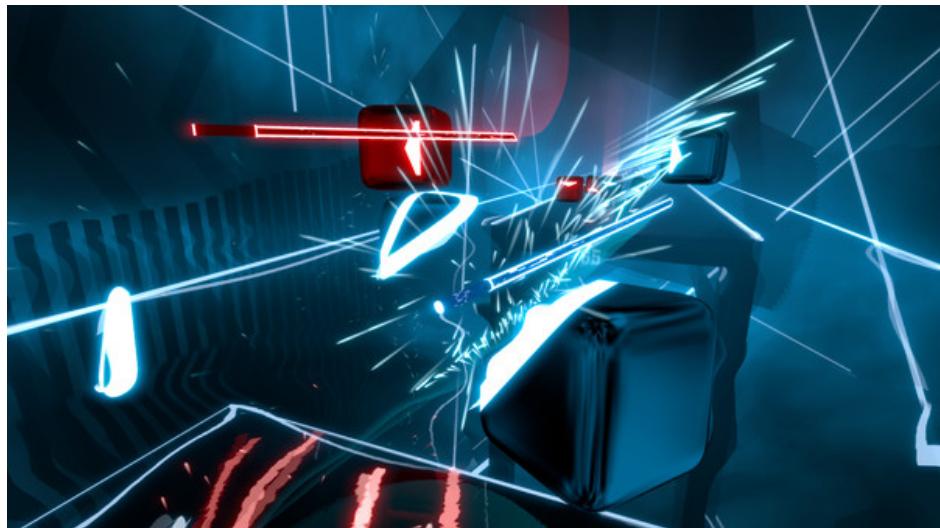
(a) Oculus Quest 1

(b) Meta Quest 2

Rysunek 1: Gogle VR od Reality Labs. [1]

W kolejnym roku, tj. 2020 wypuścili kolejne gogle, czyli Oculus Quest 2, których koszt zaczynał się od 299 dolarów. Dzięki jeszcze niższej cenie i lepszej mocy w stosunku do poprzednika stały się najpopularniejszymi goglami na rynku. W ciągu ostatnich dwóch lat Oculus zmienił nazwę na Reality Labs, Facebook na Meta, a Oculus Quest 2 na Meta Quest 2. Obecnie Meta jest firmą próbującą stworzyć swój pierwszy metavers.

W ostatnich tygodniach wypuścili też gogle z myślą o zastosowaniach biznesowym i dla metaversum, Meta Quest Pro kosztujące 1500 dolarów. Oczywiście same gogle Meta nie są jedyne na rynku. Podczas boomu na rynku VR w 2016 zostały wydane też inne gogle konkurencyjnych firm. Do największych należą HTC Vive, gogle wydane przez HTC we współpracy z firmą Valve, jako główny konkurent Oculus Rifta, bo podobnie jak Rift też były tworzone z myślą o rynku PC. Trochę inną drogo poszło Sony, tworząc PlayStation VR, były to gogle stworzone z myślą o konsoli PlayStation 4. Natomiast w latach 2016-2022 powstała co najmniej setka nowych gogli VR różnych firm [1], z czego największą popularnością są gogle od Mety [2], w 2021 roku zostało sprzedanych 11 milionów sztuk urządzeń, z czego 78% były to Meta Quest 2 [1].



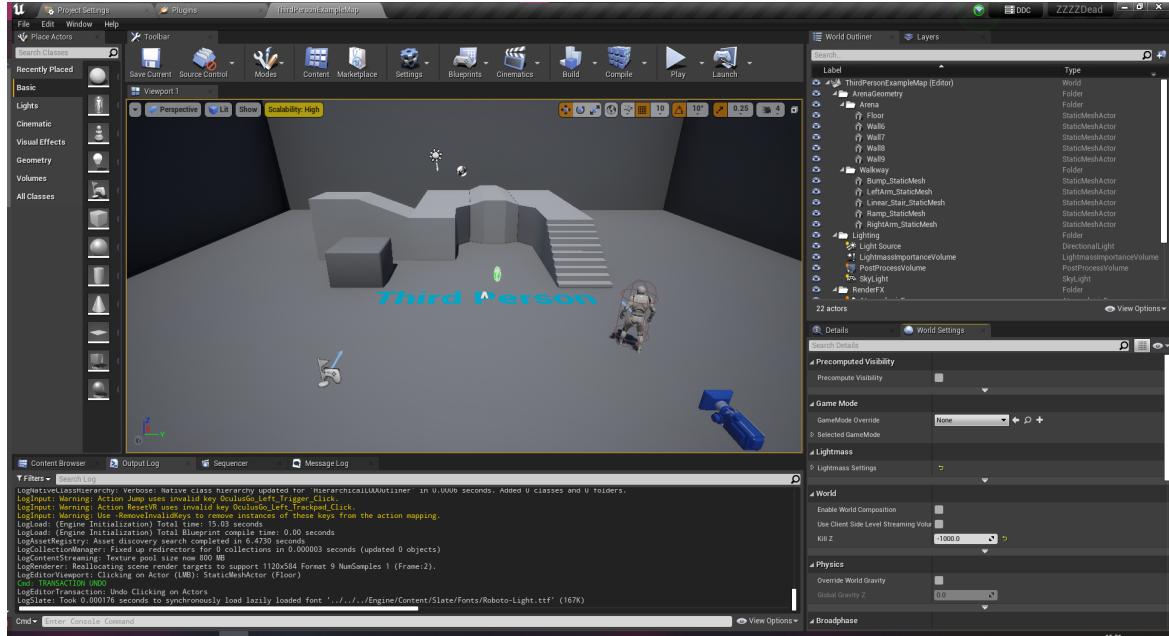
Rysunek 2: Przykład gry stworzonej z myślą o VR: "Beat Saber" firmy Beat Games. [3]

Rynek aplikacji VR też się rozwinął w ciągu ostatnich lat. Producenci silników gier, tacy jak Epic czy Unity dodali wsparcie gogli wirtualnej rzeczywistości. Dzięki wparciu od dużych firm rozpoczął się wysyp różnego rodzaju aplikacji. W oficjalnym sklepie Oculus jest obecnie dostępnych ponad 400 aplikacji [4], na Steam jest ich już ponad 4000 [5]. Oczywiście sam sprzęt nie służy też do rozrywki. Może być też wykorzystywany np. przez wojsko do tworzenia symulacji, czy przez artystów do tworzenia dzieł sztuki lub galerii modelów komputerowych.

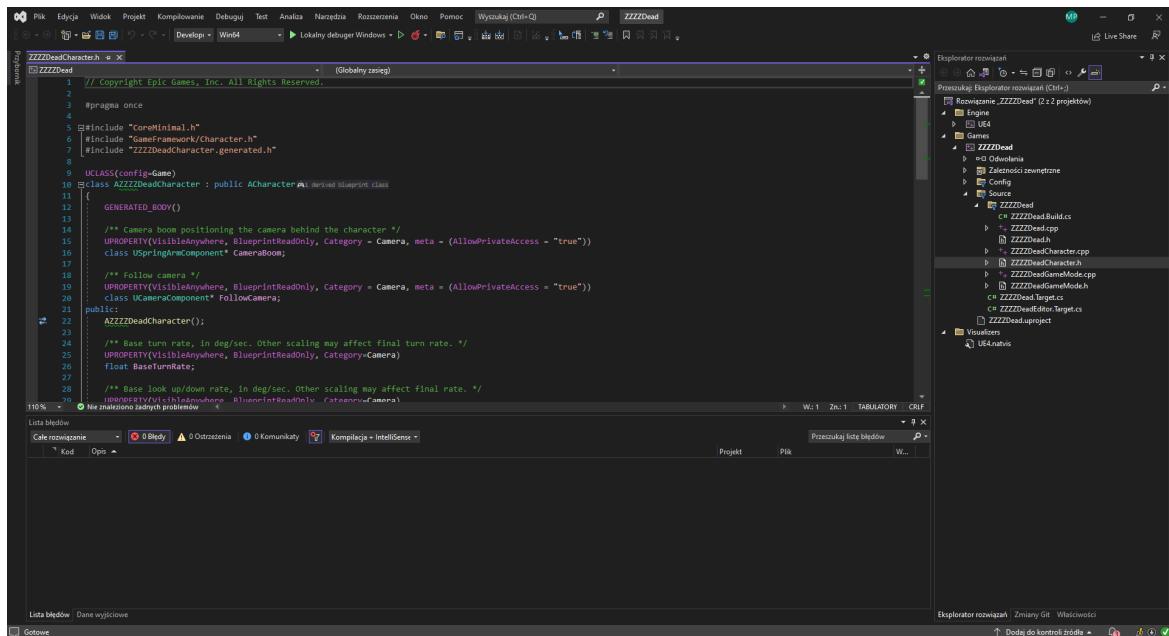
1.2 Cel i zakres pracy

Głównym założeniem pracy jest stworzenie aplikacji VR, która przedstawi kilka wybranych modeli komputerowych. Dodatkowo będą znajdować się tam informacje o modelu w formie galerii, w której znajdować się będzie historia danego modelu i ciekawostki z nim związane. Użyte gogle VR do pomocy przy tworzeniu aplikacji to Oculus Quest. Aplikacja została natomiast napisana w silniku Unreal Engine oraz w środowisku programistycznym Visual Studio 2022. Silnik UE4 posiada wsparcia dla gogli VR, a także można w nim pisać klasy i skrypty w języku C++ oraz przy wykorzystaniu Blueprintów. Jest to wizualny język skryptowy stworzony z myślą o ludziach, którzy nie mieli styczności z językiem programowania, np. dla game designerów, którzy mogą

zrobić proste skrypty, a następnie programista może je przerobić na skrypty C++. Dodatkowo po stronie C++ można stworzyć bazowy system, który może zostać rozszerzony w Blueprintach o funkcje, do których dostęp jest łatwiejszy w Blueprintach. Celem niniejszej pracy, jest pokazanie, że przy dzisiejszej technologii i wiedzy można stworzyć program w sposób, który nie byłby możliwy do zrealizowania jeszcze 10 lat temu.



Rysunek 3: Podstawowy wygląd programu Unreal Engine 4.

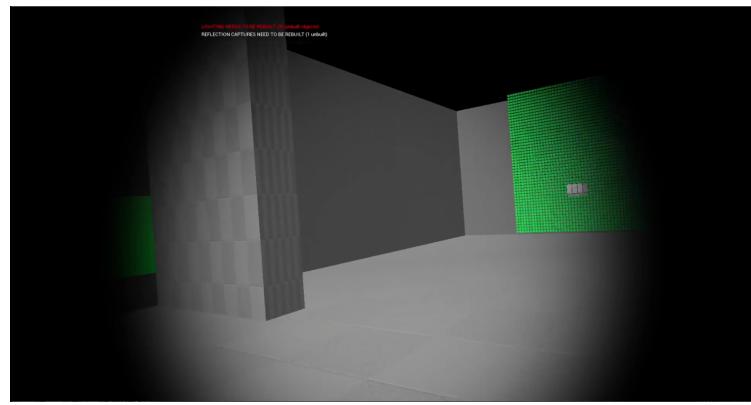


Rysunek 4: Podstawowy wygląd programu Visual Studio 2022.

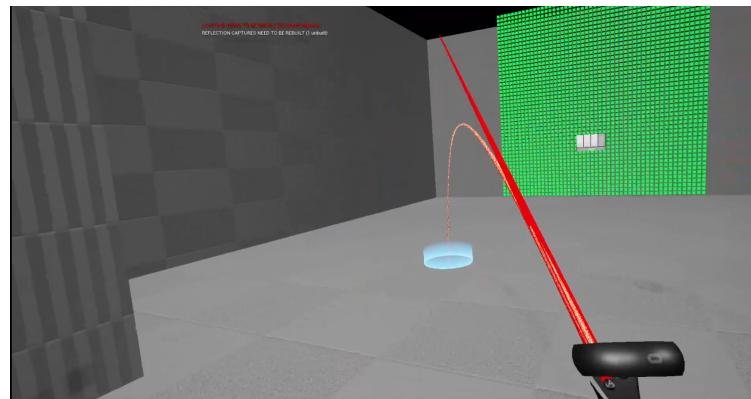
2 Warstwa Użytkowa

2.1 Wygląd i Obsługa programu

Aby uruchomić program potrzebne są gogle VR i kontrolery ruchowe, które są wspierane. W programie wspierane są gogle Oculus Quest i kontrolery Oculus Touch. Program podzielony jest na pokoje, gdzie każdy pokój różni się umieszczonym w nim modelem i możliwymi interakcjami z modelem. Po poziomach można poruszać się na dwa sposoby. Pierwszy sposób wymaga użycia lewego drążka. Dzięki odpowiedniemu wychyleniu drążka można poruszać się w odpowiednie miejsce po pokoju. Jednak przez taki sposób poruszania się niektóre osoby mogą nabawić się choroby symulatorowej [6]. Aby zmniejszyć szansę jej wystąpienia został zastosowany efekt zwany widzeniem tunelowym. Polega on na zmniejszeniu wielkości widocznego obrazu, kiedy poruszamy się po planszy. Im mamy większą prędkość tym efekt jest mocniejszy. Drugi sposób poruszania się polega na teleportacji w inne miejsce na planszy. Po kliknięciu przycisku B na prawym kontrolerze pojawi się kółko informujące nas, że po zwolnieniu przycisku teleportujemy się tam. Ten sposób poruszania się jest bardziej wygodny dla osób z chorobą symulatorową.



(a) Wizja tunelowa

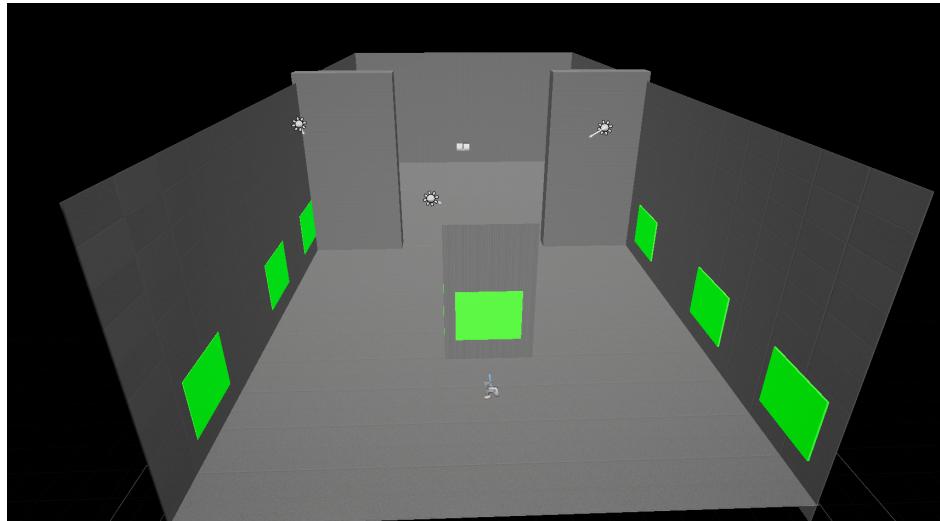


(b) Ruch teleportacyjny

Rysunek 5: Sposób poruszania się w programie.

2.2 Wygląd Galerii w Programie

Każdy pokój został podzielony na dwie części. W części pierwszej znajdują się informacje o modelu, jaki się znajduje w pokoju. Swoim wyglądem przypomina to galerię obrazów, do których można podejść i poczytać ciekawostki o modelu. W drugiej części znajduje się model komputerowy. W zależności od modelu możemy z nim wchodzić w interakcje, aby zobaczyć jak model działa w ruchu.

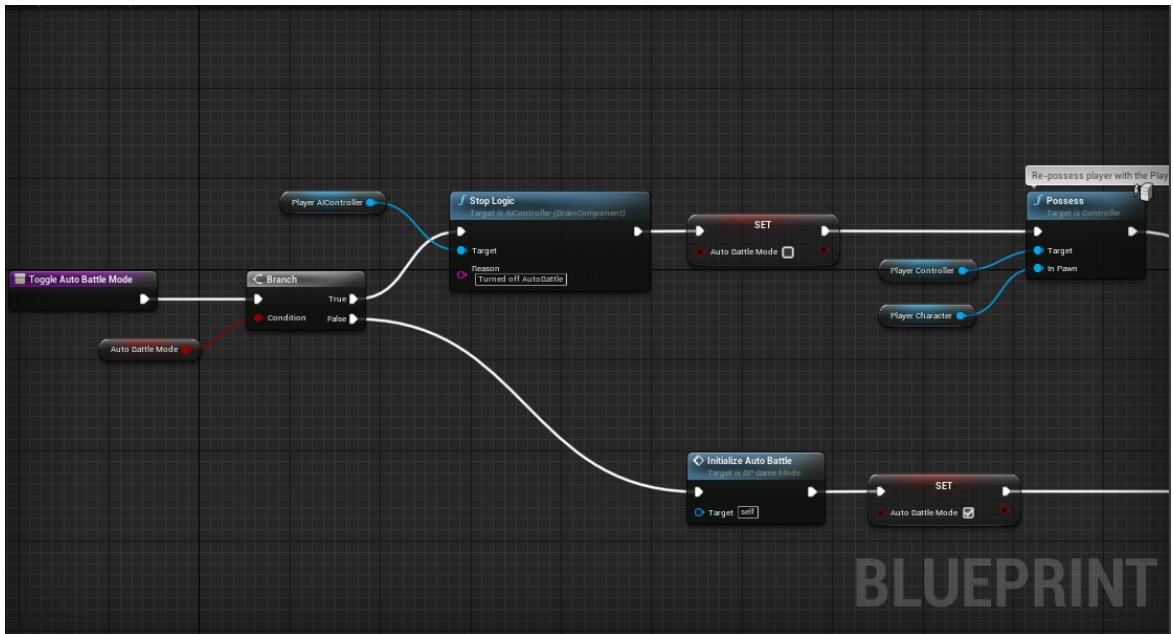


Rysunek 6: Wygląd pokoju galerii w programie.

3 Warstwa Programistyczna

3.1 Unreal Engine 4

Program został napisany na silniku Unreal Engine 4. Został on wybrany z powodu wsparcia gogli VR, dużej społeczności, otwartego kodu źródłowego oraz możliwość pisania kody w języku C++. Dzięki wsparci gogli VR nie trzeba tracić czasu, by napisać odpowiednie narzędzie do ich obsługi. Duża społeczność oznacza, że w internecie można znaleźć wiele pomocnych materiałów przy tworzeniu aplikacji. Otwartość kodu oznacza, że można bez większych problemów wprowadzić własne modyfikacje, jeśli są potrzebne. Jedną z najważniejszych funkcji UE4 jest Unreal Editor, czyli graficzny edytor silnika, w którym bez znajomości programowania można stworzyć własny program. Kolejną ważną funkcja UE4 jest wbudowany język skryptowy zwany Blueprint. Jest on oparty na koncepcji wykorzystywania interfejsu opartego na węzłach, dzięki którym możemy tworzyć elementy programu bezpośrednio w Unreal Editor bez wchodzenia do kodu źródłowego C++. Jest on używany do definiowania klas lub obiektów metodą programowania obiektowego.



Rysunek 7: Przykładowa funkcja napisana w unrealowych blueprintach.

Unreal Editor pozwala też na tworzenie poziomów w prosty i intuicyjny sposób, poprzez przeciąganie interesującego nas obiektu bezpośrednio na ekran, a następnie zmiany jego obrotu czy skali. Edytor pozwala również na uruchomienie obecnie włączonego poziomu, by zobaczyć czy wszystkie funkcje zostały prawidłowo napisane i nie ma żadnych z nimi problemów. Jeśli pojawi się jakiś problem BP pozwala na debugowanie funkcji, które zostały w nim napisane.

3.2 Język C++

Innym sposobem na tworzenie nowej funkcjonalności dla tworzonego programu w Unreal Engine jest napisanie jej w C++. Klasy C++ mogą być używane jako klasy bazowe dla klas Blueprintowych, gdzie podstawy klasy tworzymy w C++, a następnie rozszerzamy jej możliwość w BP. C++ pozwala na tworzenie metod i zmiennych, które następnie mogą być wykorzystane w BP, dzięki odpowiednim specyfikatorom. Dla metod używany jest UFUNCTION z odpowiednimi flagami w zależności od tego, jak dana metoda ma się zachować w BP. Dzięki temu można na przykład w BP odwołać się do metody stworzonej w C++ i korzystać z niej jakby była stworzona w BP. Ma to swoje zalety, z czego największą jest to, że metody w C++ są szybsze niż ich odpowiedniki w BP. Podobnie jak dla metod zmienne też posiadają swój specyfikator UPROPERTY, dzięki któremu zmienne stworzone w C++ możemy użyć w BP.

```
1 #pragma once
2
3 #include "CoreMinimal.h"
4 #include "GameFramework/Actor.h"
5 #include "BoidTarget.generated.h"
6
7 UCLASS()
8 class PRAYVR_API ABoidTarget : public AActor
9 {
10     GENERATED_BODY()
11
12 public:
13     // Sets default values for this actor's properties
14     ABoidTarget();
15
16 protected:
17     // Called when the game starts or when spawned
18     virtual void BeginPlay() override;
19
20 UPROPERTY(VisibleAnywhere, BlueprintReadOnly)
21     class UStaticMeshComponent* Mesh;
22 public:
23     // Called every frame
24     virtual void Tick(float DeltaTime) override;
25
26 };
```

Listing 1: Przykład kodu C++

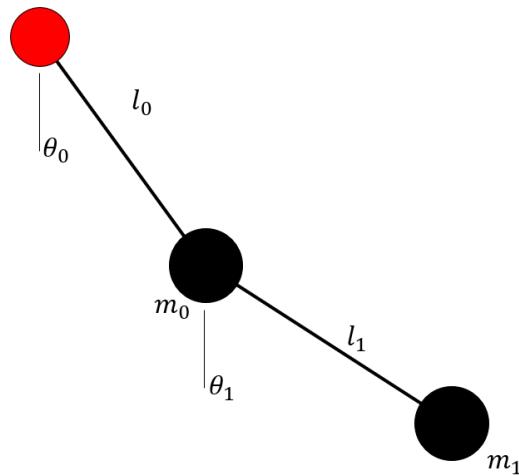
3.3 Oculus Quest

Gogle VR, które były wykorzystywane do testowania projektu to Oculus Quest. Gogle posiadają dwa ekranы OLED o rozdzielczości 1440x1600 na każdy ekran. Częstotliwość odświeżania ekranów wynosi 72 Hz. Do obsługi gogli wykorzystywane są dwa kontrolery Oculus Touch drugiej generacji. Dzięki swojej autonomiczności nie potrzeba podłączać gogli bezpośrednio do komputera, lecz można wykorzystać lokalną sieć WiFi i oficjalne oprogramowanie firmy Reality Labs. Natomiast dzięki oficjalnemu wsparciu w Unreal Engine można od razu po stworzeniu nowego projektu, zacząć pisać go z myślą o goglach VR.

4 Modele wykorzystane w programie

4.1 Wahadło Podwójne

Pierwszy model, który został umieszczony w projekcie to model wahadła podwójnego. Wahadło podwójne składa się z dwóch wahadeł prostych, tzn. pierwsze wahadło o masie m_0 zostało przymocowane za pomocą pręta o długości l_0 do stałego punktu obrotu, gdzie θ_0 jest przesunięciem kątowym wahadła od położenia równowagi. Drugie wahadło o masie m_1 zostało przymocowane za pomocą pręta o długości l_1 do pierwszego wahadła z własnym kątem swobody θ_1 . Z powodu występowania dwóch stopni swobody θ_0 i θ_1 , a przez to ma bardziej złożony ruch, wahadło jest podatne na chaotyczny ruch i jest bardzo wrażliwy na warunki początkowe [7].



Rysunek 8: Wahadło podwójne.

4.1.1 Wahadło podwójne - kod

Aby obliczyć wartość $\dot{\theta}_0$ i $\dot{\theta}_1$ potrzebne są najpierw prędkości kątowe $\dot{\theta}_0$ i $\dot{\theta}_1$ oraz ich przyśpieszenie kątowe $\ddot{\theta}_0$ i $\ddot{\theta}_1$. Aby obliczyć zmianie kąta w czasie trzeba rozwiązać układ równań różniczkowych. Najpierw robimy do dla kątów θ_0 i θ_1 , gdzie pochodna kąta od czasu jest równa $\dot{\theta}_0$ i $\dot{\theta}_1$. Zapisujemy równanie na pochodną prędkości od czasu dla $\dot{\theta}_0$ i $\dot{\theta}_1$ co daje nam przyśpieszenie kątowe $\ddot{\theta}_0$ i $\ddot{\theta}_1$.

$$\begin{aligned} \frac{\partial \theta_0}{\partial t} &= \dot{\theta}_0 \\ \frac{\partial \theta_1}{\partial t} &= \dot{\theta}_1 \\ \frac{\partial \dot{\theta}_0}{\partial t} &= \ddot{\theta}_0 \\ \frac{\partial \dot{\theta}_1}{\partial t} &= \ddot{\theta}_1 \end{aligned} \tag{1}$$

Równania [1] możemy zapisać jako równanie różnicowe, tzn. dokonujemy przekształcenia, w którym pochodną po czasie zastępujemy prostym operatorem liniowym:

$$\begin{aligned}\theta_0 &= \theta_0 + \dot{\theta}_0 * dt; \\ \theta_1 &= \theta_1 + \dot{\theta}_1 * dt; \\ \dot{\theta}_0 &= \dot{\theta}_0 + \ddot{\theta}_0 * dt; \\ \dot{\theta}_1 &= \dot{\theta}_1 + \ddot{\theta}_1 * dt;\end{aligned}\quad (2)$$

gdzie :

dt – krok czasowy

Jest to realizacja metody Eulera. Brakuje nam już tylko $\ddot{\theta}_0$ i $\ddot{\theta}_1$, które można wyrowadzić ze wzoru [8]:

$$\begin{aligned}\ddot{\theta}_0 &= \frac{g(\sin \theta_1 \cos(\theta_0 - \theta_1) - \mu \sin \theta_0) - (l_1 \dot{\theta}_1^2 + l_0 \dot{\theta}_0^2 \cos(\theta_0 - \theta_1)) \sin(\theta_0 - \theta_1)}{l_0(\mu - \cos^2(\theta_0 - \theta_1))} \\ \ddot{\theta}_1 &= \frac{g\mu(\sin \theta_0 \cos(\theta_0 - \theta_1) - \sin \theta_1) - (\mu l_0 \dot{\theta}_0^2 + l_1 \dot{\theta}_1^2 \cos(\theta_0 - \theta_1)) \sin(\theta_0 - \theta_1)}{l_1(\mu - \cos^2(\theta_0 - \theta_1))}\end{aligned}\quad (3)$$

gdzie :

$$\mu = 1 + (m_0 + m_1)$$

Kod C++ przeznaczony do tworzenia i zarządzania wahadłami składa się z trzech klas: Pendulum, PendulumSpawn, PendulumControl.

Tak wyżej utworzone równania możemy wykorzystać w kodzie do obliczenia wartości θ_0 i θ_1 w danym kroku czasowym.

```

1 void APendulum::computeAnglesEuler( float dt )
2 {
3     double u = 1 + mass0 + mass1;
4     theta0bis =
5         (g * (sin(theta1) * cos(theta0 - theta1) - u * sin(theta0))
6          - (length1 * pow(theta1prim, 2) + length0 * pow(theta0prim, 2) *
7              cos(theta0 - theta1)) * sin(theta0 - theta1))
8         / (length0 * (u - pow(cos(theta0 - theta1), 2)));
9     theta1bis =
10        (g * u * (sin(theta0) * cos(theta0 - theta1) - sin(theta1)) + (u *
11           length0 * pow(theta0prim, 2)
12           + length1 * pow(theta1prim, 2) * cos(theta0 - theta1)) * sin(theta0
13           - theta1))
14         / (length1 * (u - pow(cos(theta0 - theta1), 2)));
15
16
17     theta0prim = theta0prim + theta0bis * dt;
18     theta1prim = theta1prim + theta1bis * dt;
19 }
```

Listing 2: Obliczanie wartości θ_0 i θ_1

Tak wyliczone wartości θ_0 i θ_1 są wykorzystane do obliczenia położenia wahadła w kolejnej funkcji. Pręta wahadła są stworzone ze "Spline Mesh Component", jest to zdeformowany Static Mesh, w którym podajemy mu obecnie wyliczone współrzędne wahadła, dzięki temu uzyskujemy odpowiednio wygładzające wahadło.

```

1 void APendulum::computePosition()
2 {
3     x0 = px + length0 * FMath::Sin(theta0);
4     y0 = py + length0 * FMath::Cos(theta0);
5
6     x1 = x0 + length1 * FMath::Sin(theta1);
7     y1 = y0 + length1 * FMath::Cos(theta1);
8
9     auto Frector = GetActorLocation();
10    FVector StarPos1 = { Frector.X, px, py, };
11    FVector EndPos1 = { Frector.X, x0, y0, };
12    FVector EndPos2 = { Frector.X, x1, y1, };
13
14    TArray<FVector> Path;
15    Path.Add(StarPos1);
16    Path.Add(EndPos1);
17    Path.Add(EndPos2);
18
19    FirstColumn->ClearSplinePoints(false);
20    int32 index = 0;
21    for (auto& Point : Path)
22    {
23        FVector LocalPosition = FirstColumn->GetComponentTransform() .
24            InverseTransformPosition(Point);
25        FirstColumn->AddPoint(FSplinePoint(index, LocalPosition,
26            ESplinePointType::Constant), false);
27        index++;
28    }
29
30    FirstColumn->UpdateSpline();
31
32    int32 SegmentNum = Path.Num() - 1;
33    for (int32 i = 0; i < SegmentNum; ++i)
34    {
35        if (ColumnsPathMeshPool.Num() <= i)
36        {
37            USplineMeshComponent* SplineMesh = NewObject<USplineMeshComponent>(
38                this);
39            SplineMesh->SetMobility(EComponentMobility::Movable);
40            SplineMesh->AttachToComponent(FirstColumn,
41                FAttachmentTransformRules::KeepRelativeTransform);
42            SplineMesh->SetStaticMesh(FirstColumnArchMesh);
43            SplineMesh->SetMaterial(0, FirstColumnArchMaterial);
44            SplineMesh->RegisterComponent();
45
46            ColumnsPathMeshPool.Add(SplineMesh);
47        }
48
49        USplineMeshComponent* SplineMesh = ColumnsPathMeshPool[i];
50        SplineMesh->SetVisibility(true);
51
52        FVector StarPos, StartTangent, EndPos, EndTangent;

```

```

49     FVector Tangent = { 0,0,0 };
50     FirstColumn->GetLocalLocationAndTangentAtSplinePoint(i, StarPos,
51     StartTangent);
52     FirstColumn->GetLocalLocationAndTangentAtSplinePoint(i + 1, EndPos,
53     EndTangent);
54     SplineMesh->SetStartAndEnd(StarPos, Tangent, EndPos, Tangent);
55 }

```

Listing 3: Aktualizacja pozycji wahadła

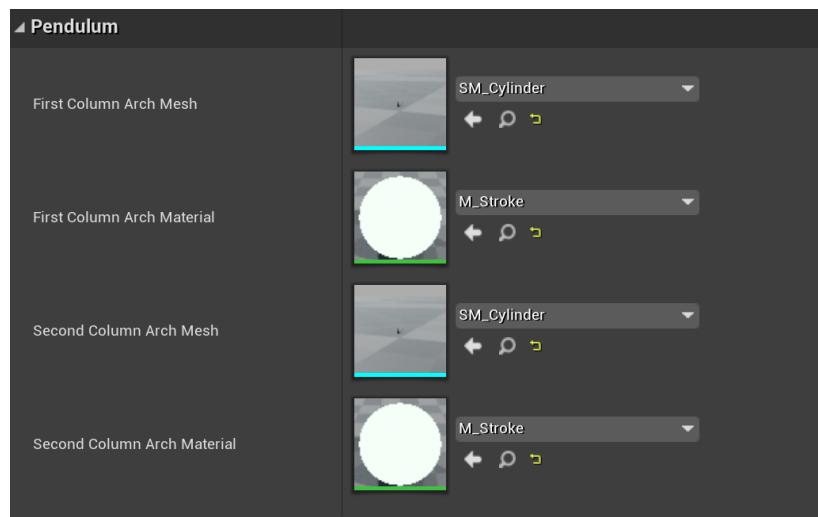
Klasa PendulumSpawn jest natomiast odpowiedzialna za dodawanie, usuwanie wahadeł. Klasa jest też odpowiedzialna za uruchomianie i resetowanie wszystkich wahadeł, które zostały przez dany PendulumSpawn stworzone.

Ostatnią klasą jest klasa PendulumControl, w której są zawarte metody i zmienne potrzebne do stworzenia interfejsu użytkownika, odpowiedzialnego za kontakt między użytkownikiem programu, a PendulumSpawn.

4.1.2 Wahadło podwójne - UE4

Na podstawie klas C++ z poprzedniego podrozdziału stworzone zostały klasy BP.

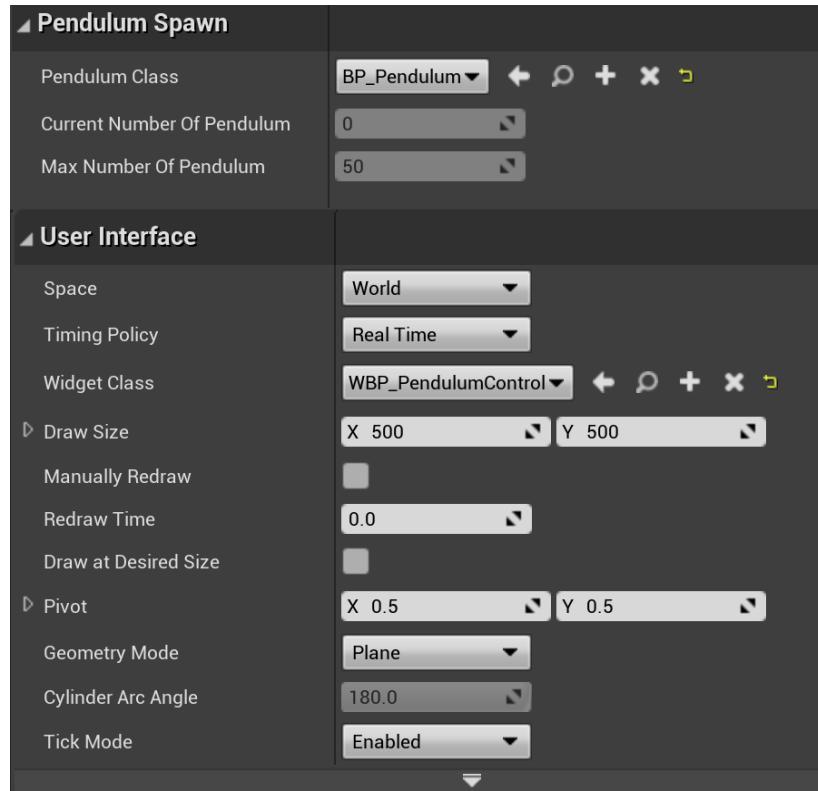
W klasie BP_Pendulum w blueprincie do najważniejszej rzeczy, którą można zróbić, jest możliwość zmiany siatki 3D i materiału, z którego jest stworzone wahadło:



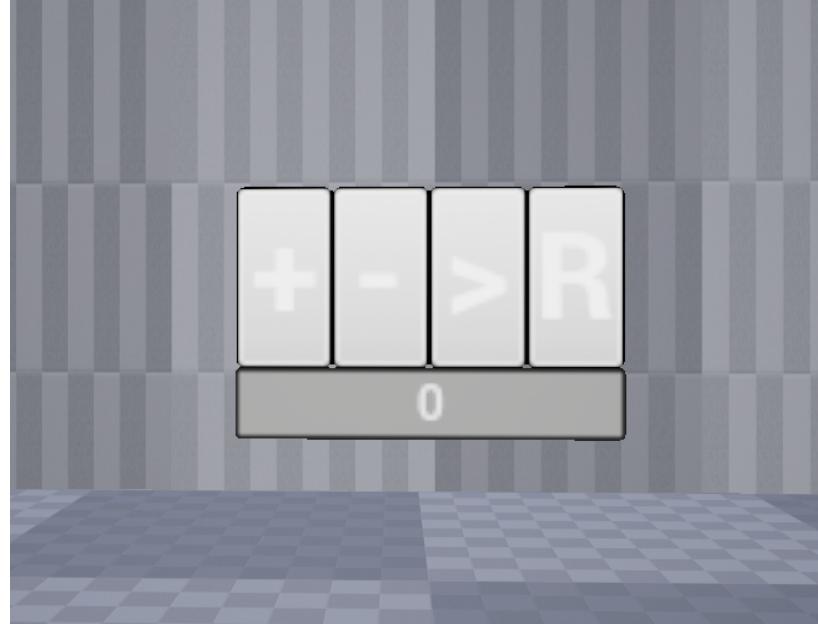
Rysunek 9: Ustawiony mesh i tekstura dla wahadła .

W klasie BP_PendulumSpawn ustawiamy tylko jakie ma tworzyć wahadła oraz jaki widget ma być umieszczony do obsługi wahadeł. Po ustawieniu wszystkich potrzebnych rzeczy klasę można umieścić na poziomie:

Klasa WBP_PendulumControl jest klasą typu widget, czyli klasą interfejsu użytkownika. W klasie tej trzeba stworzyć odpowiednie jej elementy na podstawie bazowej klasy C++, aby móc obsługiwać wahadła stworzone przez BP_PendulumSpawn



Rysunek 10: Ustawione wahadło do stworzenia i widget.

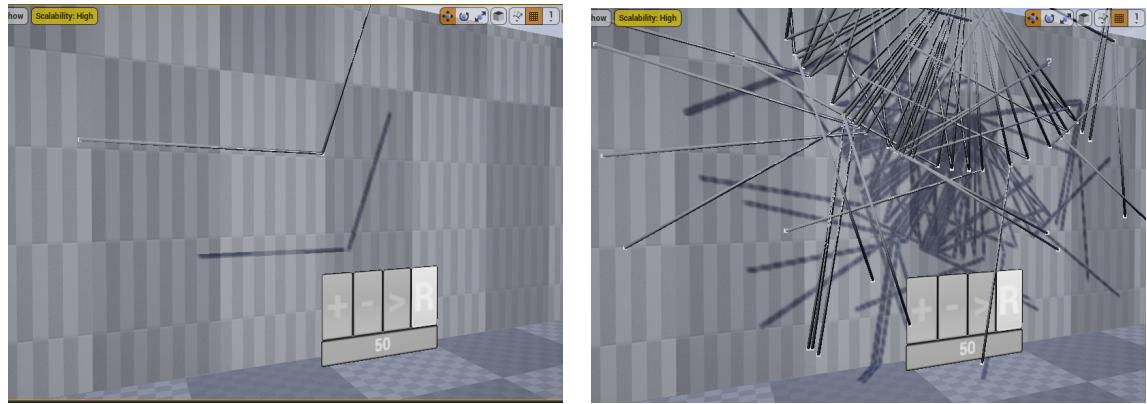


Rysunek 11: Wygląd widgetu w programie.

4.1.3 Wahadło podwójne – Wygląd symulacji w projekcie

W projekcie po najechaniu wskaźnikiem z kontrolera ruchowego na panel użytkownika możemy dodać, usunąć, uruchomić lub zresetować wahadła stworzone przez

spawner. Jak pokazano na rysunku 12a, na początku symulacji wahadła są stosunkowo blisko siebie. Lecz w trakcie jej działania w pewnym momencie wahadła zaczną się zachowywać w sposób chaotyczny, tak jak to widać na rysunku 12b.



Rysunek 12: Działanie postępowania symulacji wahadeł.

W załączonym filmie można zobaczyć jak model wygląda w trakcie działania <https://youtu.be/9zGF36V0aLI>

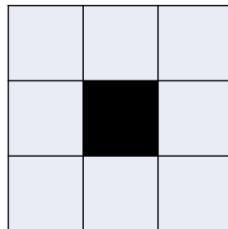
4.2 Gra w życie

Gra w życie, jest automatem komórkowym stworzonym przez Johna Conwaya. Jest to sieć komórek, symulowanych w pamięci komputera, w którym w danej chwili każda z komórek przyjmuje określony stan, według wcześniej ustanowionych reguł [9].

John Conway zainteresował się problemem przedstawionym w latach 40 XX wieku przez matematyka Johna von Neumanna, który to próbował znaleźć hipotetyczną maszynę, która mogłaby budować kopie samej siebie. Neumannowi udało się, gdy znalazł matematyczny model takiej maszyny z bardzo skomplikowanymi regułami na prostokątnej siatce. Gra w życie powstała jako udana próba Conwaya uproszczenia idei von Neumanna [10]. Gra w życie Conwaya pierwotnie ukazała się w październiku 1970 roku w magazynie "Scientific American" w kolumnie "Mathematical Games" Martina Gardnера, pod tytułem: "The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game 'life'" [11], gdzie z miejsca zdobyła ogromną popularność.

Sama Gra w życie nie jest do końca grą. Conway nazywał ją "gra bez graczy", czyli gra w której przebieg jest niezależny od gracza, a jego rola sprowadza się w tym wypadku tylko do utworzenia stanu początkowego, czyli pierwszej generacji komórek [12].

Gra w pierwotnym założeniu rozgrywa się na 2 wymiarowej siatce składającej się z komórek. Każda komórka w danej turze (generacji) może być albo żywa, albo martwa. To czy pojedyncza komórka w kolejnej turze będzie żyć lub nie, zależy od stanu jej 8 sąsiadów i ustanowionych początkowych reguł.



Rysunek 13: Pojedyncza komórka i 8 sąsiadów w grze w życie.

Gra w życie w pierwotnych założeniach składa się z 4 zasad [10]:

- Każda żywa komórka z mniej niż dwoma żywymi sąsiadami umiera
- Każda żywa komórka mająca więcej niż trzech żywych sąsiadów umiera
- Każda żywa komórka z dwoma lub trzema żywymi sąsiadami żyje, niezmieniona, do następnego pokolenia.
- Każda martwa komórka z dokładnie trzema żywymi sąsiadami ożywa.

Na podstawie kodu [13] została stworzona wersja Gry w Życie, która działa z kontrolerami ruchów VR.

4.2.1 Gra w życie - kod

W C++ kod gry w życie składa się z trzech klas: CellActor, GridActor, GameOfLifeControl.

CellActor jest klasą, w której znajdują się informacje o jednej komórce znajdującej się w siatce. W klasie znajdują się informacje o położeniu na dwuwymiarowej siatce (X i Y), również informację o stanie życia w obecnej generacji oraz o stanie życia w kolejnej generacji. Klasa posiada metodę Clicked, dzięki której jak użytkownik wejdzie w interakcję z komórką zmienia jej status początkowy z martwej na żywą i visa versa.

```
1 void ACellActor::Clicked()
2 {
3     if (Alive) {
4         StaticMeshComponent->SetMaterial(0, BeginCursorOverMaterial);
5         Alive = false;
6     }
7     else {
8         StaticMeshComponent->SetMaterial(0, ClickedMaterial);
9         Alive = true;
10    }
11 }
```

Listing 4: Aktualizacja stanu danej komórki przez użytkownika

Metoda Update, która jest wykorzystywana przez GridActora, podobnie jak metoda Clicked zmienia stan życia komórki, lecz w tym wypadku wykorzystuję zmienną AliveNext.

```
1 void ACellActor::Update()
2 {
3     if (AliveNext) {
4         StaticMeshComponent->SetMaterial(0, ClickedMaterial);
5         Alive = true;
6         SetActorHiddenInGame(false);
7     }
8     else {
9         SetActorHiddenInGame(true);
10        StaticMeshComponent->SetMaterial(0, EndCursorOverMaterial);
11        Alive = false;
12    }
13 }
```

Listing 5: Aktualizacja stanu danej komórki

Klasa GridActor jest odpowiedzialna za tworzenie dwuwymiarowej siatki składającej się z CellActorów i o podanej wysokości oraz długości. W klasie odbywają się wszystkie obliczenia związane z działaniem gry w życie od obliczania obecnie żyjących sąsiadów danej komórki w metodzie CountAliveNeighbors(const int i, const int j)

```
1 int AGridActor::CountAliveNeighbors(const int i, const int j)
2 {
3     int NumAliveNeighbors = 0;
4     for (int k = -1; k <= 1; k++) {
5         for (int l = -1; l <= 1; l++) {
6             if (!(l == 0 && k == 0)) {
7                 const int effective_i = i + k;
8                 const int effective_j = j + l;
```

```

9      if ((effective_i >= 0 && effective_i < Height) && (effective_j >=
10     0 && effective_j < Width)) {
11         if (CellActors[effective_j + effective_i * Width]->GetAlive())
12     {
13         NumAliveNeighbors++;
14     }
15 }
16 }
17 return NumAliveNeighbors;
18 }
```

Listing 6: Zliczanie żyjących sąsiadów danej komórki

Następnie na podstawie obecnie żyjących sąsiadów i reguł jakie zostały ustalone w metodzie UpdateAliveNext(const int Index, const int NumAliveNeighbors) ustawiamy czy dana komórka w następnej klatce będzie żywa lub martwa.

```

1 void AGridActor::UpdateAliveNext( const int Index , const int
2 NumAliveNeighbors)
{
3     const bool IsAlive = CellActors[Index]->GetAlive();
4     if (IsAlive && (NumAliveNeighbors < 2))
5     {
6         CellActors[Index]->SetAliveNext(false);
7     }
8     else if (IsAlive && ((NumAliveNeighbors == 2) || (NumAliveNeighbors ==
9         3)))
10    {
11        CellActors[Index]->SetAliveNext(true);
12    }
13    else if (IsAlive && (NumAliveNeighbors > 3))
14    {
15        CellActors[Index]->SetAliveNext(false);
16    }
17    else if (!IsAlive && (NumAliveNeighbors == 3))
18    {
19        CellActors[Index]->SetAliveNext(true);
20    }
21    else
22    {
23        CellActors[Index]->SetAliveNext(CellActors[Index]->GetAlive());
24    }
}
```

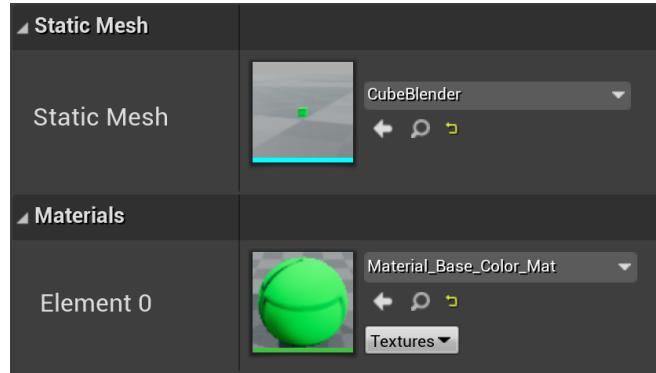
Listing 7: Aktualizacja stanu komórki w następnej klatce

Ostatnią klasą jest GameOfLifeControll która jest odpowiedzialna za stworzenia interfejsu użytkownika, dzięki któremu użytkownik może włączyć grę w życie, zmieniać szybkość działania gry oraz resetować ją do stanu początkowego.

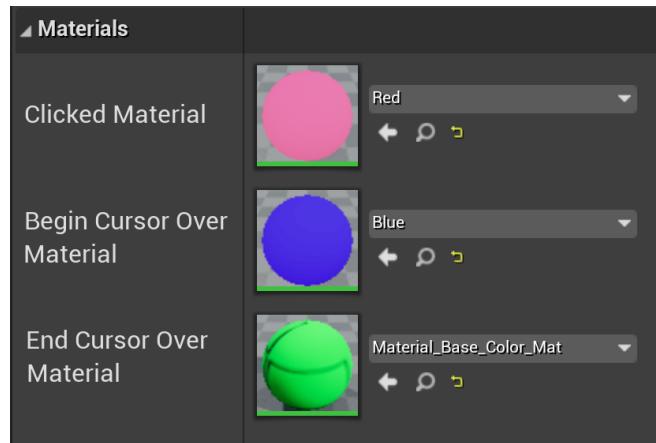
4.2.2 Gra w życie - UE4

Na podstawie powyższych klas zostały stworzone klasy Blueprintowe, które można potem umieścić w na poziomie w programie. W BP_CellActor ustawiamy jak dana

komórka ma wyglądać w świecie gry i jak się zachować, kiedy najedziemy na nią kontrolerem ruchowym:



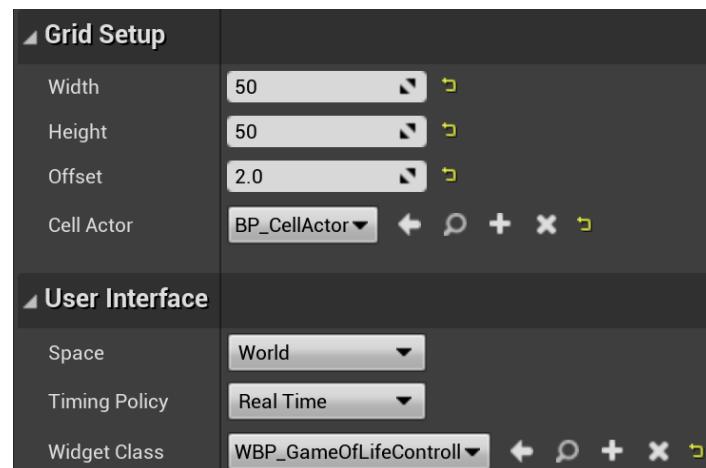
(a) Ustawiony mesh w programie dla komórki.



(b) Ustawiony wygląd w programie podczas akcji.

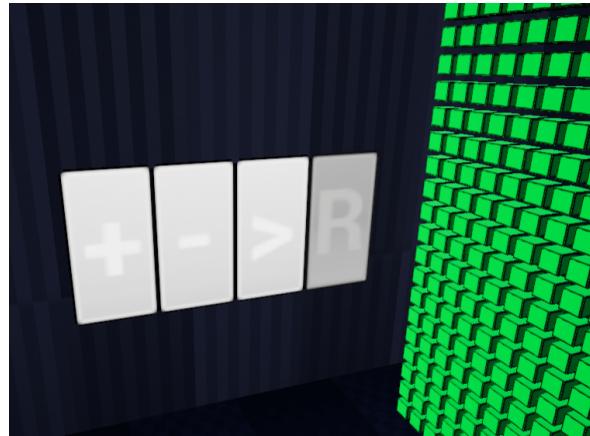
Rysunek 14: Ustawienia dla CellActora w silniku Unreal.

BP_GridActor2D jest klasą Blueprint, która znajdzie się na poziomie gry. W klasie ustawiamy, na jaką szerokość i wysokość ma zostać stworzona siatka składająca się z BP_CellActor oraz dodajemy widget, dzięki któremu możemy sterować symulacją:



Rysunek 15: Ustawienia BP_GridActor2D.

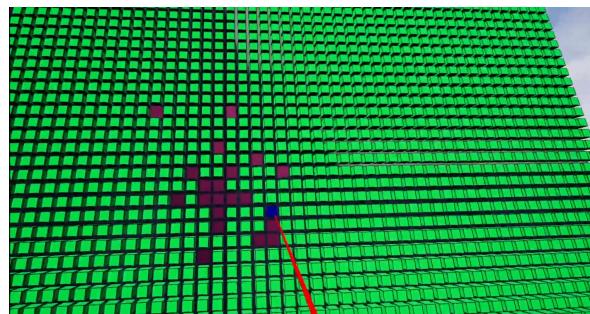
Klasa WBP_GameOfLifeControll jest odpowiedzialna kontakt między użytkownikiem a programem, klasa ta jest widgetem, dzięki któremu poprzez najechanie kontrolerem ruchowym na odpowiednie opcje możemy włączyć symulację, przyśpieszyć lub ją spowolnić oraz zresetować do stanu początkowego:



Rysunek 16: Wygląd widgetu w programie.

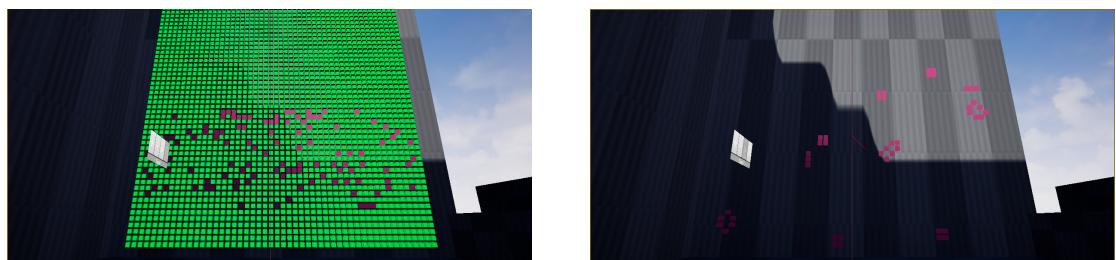
4.2.3 Gra w życie - Wygląd symulacji w projekcie

W programie za pomocą kontrolerów możemy ustawić stan początkowy każdej komórki w poprzez najechanie na nią wskaźnikiem wystającym z kontrolerów.



Rysunek 17: Ożywianie i uśmiercanie komórek z pomocą kontrolera

Po lewej stronie od tablicy z komórkami znajduje się widżet, za pomocą którego możemy włączyć grę, przyśpieszyć jej działanie lub spowolnić, albo zresetować komórki do stanu początkowego.

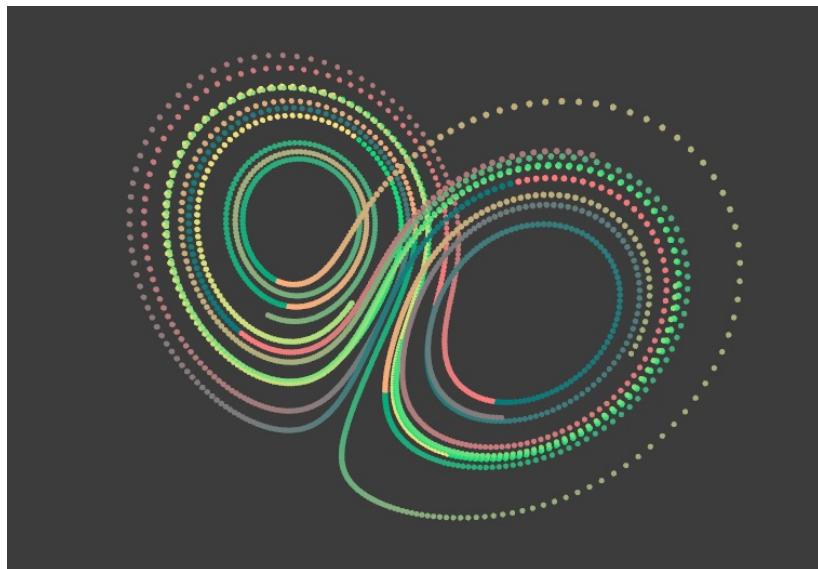


(a) Wygląd tablicy z komórkami i widżetu (b) Wygląd tablicy w trakcie uruchomienia gry

W załączonym filmie można zobaczyć jak model wygląda w trakcie działania <https://youtu.be/OiSlqG-6q6M>

4.3 Efekt Motyla

"Czy trzepot skrzydeł motyla w Brazylii może wywołać tornado w Teksasie?" Jest to pytanie Edwarda Lorenza, meteorologa, który zadał je na 139 spotkaniu American Association for the Advancement of Science w stolicy USA w 1972 roku [14]. Lorenz jako pierwszy odkrył, że nie można przewidzieć dobrej prognozy pogody na dłużej niż kilka dni do przodu. W 1960 roku pracował on nad programem komputerowym, który miał prognozować pogodę, na podstawie zbioru równań określających zależności między prędkością wiatru, temperaturą, ciśnieniem i wilgotnością [15]. Gdy Lorenz testował swój program po wprowadzeniu danych i po wydrukowaniu wyniku w formie wykresu. Rozkład maksimów i minimów na wykresie wyglądał tak, jak się tego spodziewał Edward. Postanowił jednak ponownie zbadać wyniki, dlatego uruchomił program ponownie, wprowadzając jak myślał takie same wyniki [15]. Okazało się jednak, że wyniki wyszły na odwrót. Po sprawdzeniu danych zauważył, że podał je w postaci przybliżonej z mniejszą liczbą cyfr po przecinku. Było to dla niego tak ciekawe, że spróbował to samo z innymi zbiorami danych i zaobserwował identyczne zjawisko. Lorenz w ten sposób odkrył "efekt motyla", gdzie dla pewnych układów deterministycznych nawet minimalne zmiany wartości danych początkowych zostają bardzo szybko wzmacnione i powodują ogromne zmiany w ewolucji układu [15].



Rysunek 19: Atractor Lorenza

Obecnie układ Lorenza jest bardziej znany jako układ 3 nieliniowych równań różniczkowych [16]:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= \sigma(y - x), \\ \dot{y} &= x(\rho - z) - y, \\ \dot{z} &= xy - \beta z,\end{aligned}\tag{4}$$

gdzie:

σ - liczba Prandtla,
 ρ - liczba Rayleigha,
 β - obszar obejmujący równania
 $\sigma, \rho, \beta > 0$,
Jednakże zwykle podaje się [16]:

$$\begin{aligned}\sigma &= 10 \\ \rho &= 28 \\ \beta &= \frac{8}{3}\end{aligned}\tag{5}$$

4.3.1 Efekt Motyla - kod

Kod C++ składa się z dwóch klas ButterflyActor i ButterflySpawner. W ButterflyActor najważniejszą metodą jest UpdatePosition(FVector position), w której poprzez rozwiązywanie wcześniej pokazanych równań różniczkowych po przecałkowaniu. Następnie odpowiednio ustawiamy te równania dla pozycji X, Y i Z danego aktora [17]

```
1 FVector AButterflyActor::UpdatePosition(FVector position)
2 {
3     float LocalDeltaTime = ButterflyChange;
4
5     position.X = (position.X + sigma * (position.Y - position.X) *
6         LocalDeltaTime);
6     position.Y = (position.Y + (-position.X * position.Z + rho * position.X
7         - position.Y) * LocalDeltaTime);
7     position.Z = (position.Z + (position.X * position.Y - beta * position.Z
8         ) * LocalDeltaTime);
8
9     return position;
10 }
```

Listing 8: Metoda UpdatePosition()

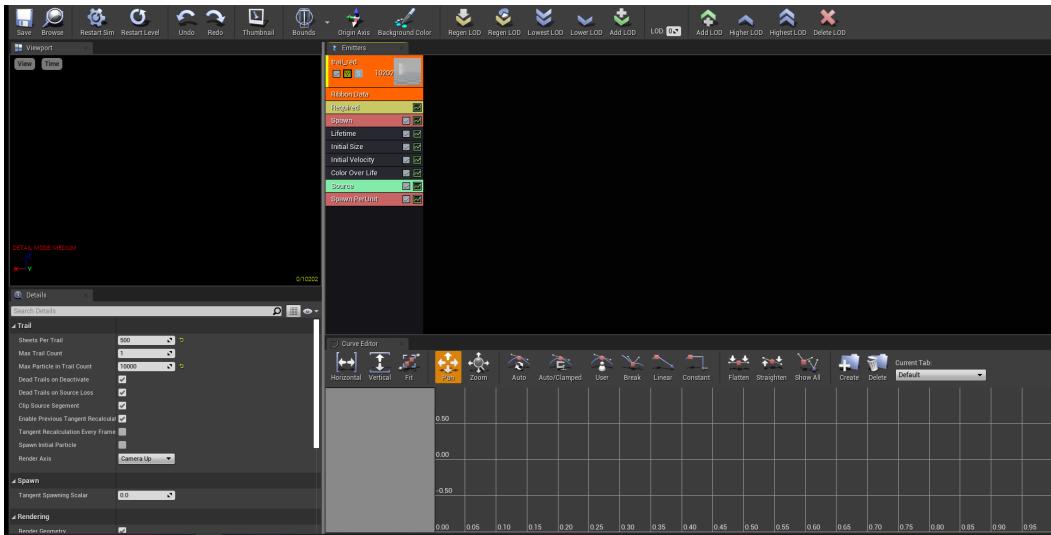
Jedyną rolą ButterflySpawner jest utworzenie tyle ButterflyActor ile zostanie mu zadane na początku, z drobną zmianą odległości dla każdego kolejnego aktora.

```
1 for (size_t i = 0; i < numberOfButterfly; i++)
2 {
3     const FVector Loc(Origin.X + i * 15, Origin.Y, Origin.Z);
4     AButterflyActor* const SpawnedActorRef = GetWorld()->SpawnActor<
5         AButterflyActor>(ButterflyActor, Loc, GetActorRotation());
6     ButterflyActors.Add(SpawnedActorRef);
6 }
```

Listing 9: Tworzenie nowych atraktorów

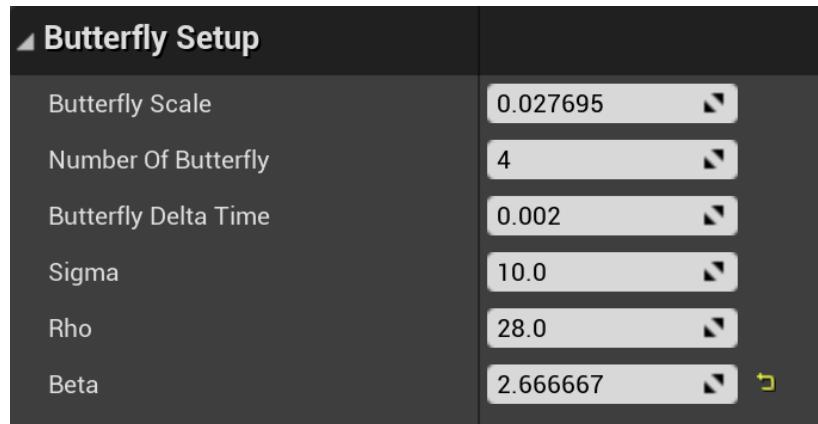
4.3.2 Efekt Motyla - UE4

Na podstawie powyższych klas zostały stworzone klasy BluePrintowe, które można potem umieścić w na poziomie w programie. Dodatkowo dla BP_ButterflyActor został stworzony efekt cząsteczkowy, który zostawia ścieżkę jaką poruszał się dany aktor.



Rysunek 20: Wygląd menu do tworzenia efektów cząsteczkowych w UE4.

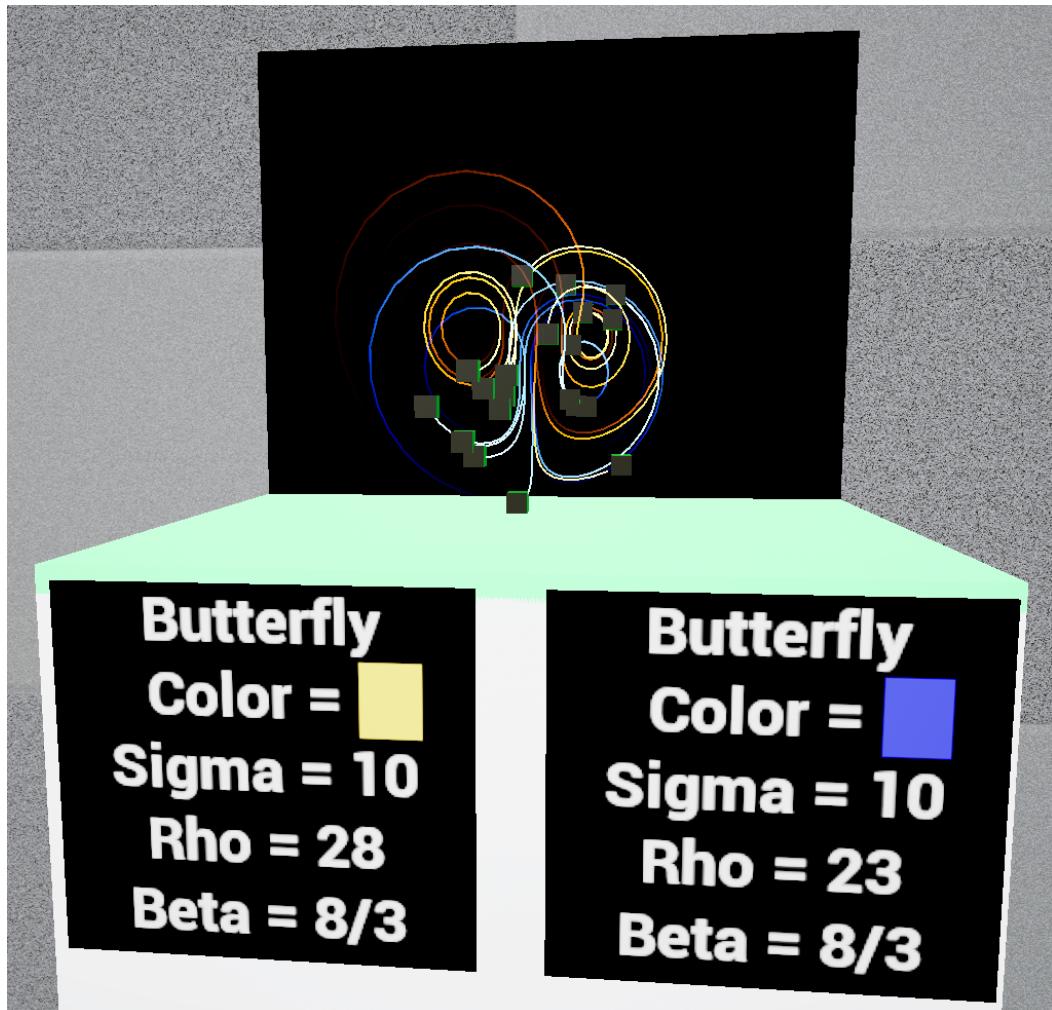
W BP_ButterflySpawner, w której ustawiamy ilość tworzonych atraktorów ich delta time oraz sigma, rho i beta, które są wspólne dla wszystkich stworzonych atraktorów przez BP_ButterflySpawner



Rysunek 21: Ustawienia BP_ButterflySpawner.

4.3.3 Efekt Motyla - Wygląd symulacji w projekcie

W programie użytkownik może obserwować układ Lorenza z wybranymi parametrami dla atraktorów [5], łącznie ze ścieżką, po jakiej się poruszają się atraktorzy. Dzięki temu może zobaczyć jak zmienia się zachowanie układu po zmienieniu wartości zmiennych



Rysunek 22: Wygląd motyli w programie.

W załączonym filmie można zobaczyć jak model wygląda w trakcie działania <https://youtu.be/jLChp4Ga7aU>

4.4 Modele Agentowe

Model agentowy jest typem modelu gdzie analizujemy wpływ agenta na dane środowisko i vice versa. Agentem może być np. komórka, człowiek, zwierzę itd. W modelu agentowym ustawiamy zachowanie poszczególnego lub grup agentów i obserwujemy jak wpływają na resztę w danym środowisku testowym. Główną ideą jest sprawdzenie, w jaki sposób czynniki w mikro skali wpływają na czynniki w środowisku makro. Dzięki temu możemy wykorzystać tak zdobytą wiedzę do różnych celów np. Sprawdzenie roznoszenia się epidemii, badać zachowania konsumenckie u ludzi czy tworzyć proste środowiska, by zobaczyć jak populacja danych agentów zmieniała się w czasie [18].

W projekcie został stworzony prosty model środowiska, gdzie są 3 rodzaje agentów: Rośliny, Króliki i Lisy. Celem królików jest rozmnożenie się poprzez znalezienie najbliższego królika do tego zdolnego. Jeśli trakcie trwania symulacji zdrowie królika spadnie poniżej danego poziomu, ponieważ w trakcie trwania symulacji każdy agent nieustannie traci zdrowie lub w trakcie rozmnażania, jego celem wtedy jest znalezienie najbliższej rośliny i skonsumowanie jej. Po zjedzeniu rośliny może ponownie szukać partnera do rozmnażania. Celem lisa podobnie jak królika jest znalezienie partnera do reprodukcji. Podobnie jak królik w wyniku rozmnażania lub czasu traci zdrowie, wtedy jego celem jest znalezienie najbliższego królika i zjedzenie go. Aby każdy miał jakieś szansę na przeżycie wartości prędkości danej grupy agentów różnią się. W obecnym modelu króliki są szybsze od lisów, ale mają też mniej od nich mniej zdrowia. Króliki mają też wyższy licznik reprodukcji.

Wykorzystane modele 3D zostały pobrane ze strony <https://clara.io> oraz <https://free3d.com>

4.4.1 Modele Agentowe - kod

Kod C++ składa się z następujących klas: AgentBase, PlantAgent, RabbitAgent, WolfAgent, AgentSpawner, AgentSpawnBox, AgentTable i AgentControl. AgentBase jest klasą bazową dla kolejnych trzech rodzajów agentów. W jego skład wchodzi informacja, jaki mesh ma dany agent, prosty system kolizji wykorzystywany do interakcji z innymi agentami i użytkownikiem, stan zdrowia oraz informacja o spawnerze na mapie. Każdy agent ma odpowiednio własny zakres zachowań, takich jak: początkowy stan zdrowia czy prędkość. Każdy agent ma też funkcję, które odziedziczyli po klasie bazowej, odpowiedzialne za inne zachowania. Do najważniejszych należą funkcja Move(), w której dzieje się ruch danego agenta. Przykładowa w RabbitAgent, w zależności od jego stanu zdrowia albo szuka pożywienia, albo partnera do kopulacji w pewnej odległości od niego, by następnie się do niego zbliżać z zadaną mu prędkością. Jeśli jego zdrowie jest równe 0, to dany agent umiera.

```
1 void ARabbitAgent :: Move()
2 {
3     Super :: Move();
4
5     float ConstantZ = GetActorLocation().Z;
6
7     if (hp <= RABBIT_MAX_HUNGRY_HP_LEVEL) {
8         TArray<AActor*> Plants;
```

```

10    UGameplayStatics::GetAllActorsOfClass(GetWorld(), APlantAgent::
11        StaticClass(), Plants);
12    if (Plants.Num() > 0) {
13        size_t atractorIndex = 0;
14        auto atractor = Cast<APlantAgent>(Plants[atractorIndex])->
15            GetActorLocation() - GetActorLocation();
16        float atractortDist = atractor.Size();
17        for (int j = 1; j < Plants.Num(); j++) {
18            auto* plant = Cast<APlantAgent>(Plants[j]);
19            FVector vec = plant->GetActorLocation() - GetActorLocation();
20            float dist = vec.Size();
21            if (dist < atractortDist) {
22                atractorIndex = j;
23                atractor = vec;
24                atractortDist = dist;
25            }
26        }
27        SetActorLocation(GetActorLocation() + atractor / atractortDist * RABBIT_VELOCITY);
28    }
29 }
30 else {
31     TArray<AActor*> Rabbits;
32
33     UGameplayStatics::GetAllActorsOfClass(GetWorld(), ARabbitAgent::
34         StaticClass(), Rabbits);
35
36     int i = 0;
37     for (int j = 1; j < Rabbits.Num(); j++) {
38
39         if (Cast<ARabbitAgent>(Rabbits[j]) == this)
40         {
41             i = j;
42             break;
43         }
44     }
45
46     size_t atractorIndex = 0;
47     auto atractor = GetActorLocation();
48     float atractortDist = 1000;
49     for (int j = 1; j < Rabbits.Num(); j++) {
50         auto partner = Cast<ARabbitAgent>(Rabbits[j]);
51         auto vec = partner->GetActorLocation() - GetActorLocation();
52         float dist = vec.Size();
53         if (dist < atractortDist && partner->hp > RABBIT_MAX_HUNGRY_HP_LEVEL && j != i) {
54             atractorIndex = j;
55             atractor = vec;
56             atractortDist = dist;
57         }
58     }
59     auto partner = Cast<ARabbitAgent>(Rabbits[atractorIndex]);
60     if (this != partner) {

```

```

61     SetActorLocation( GetActorLocation() + atractor / attractortDist * 
62     RABBIT_VELOCITY) ;
63 
64     atractorRabbit = partner ;
65   }
66 }
67 
68 SetActorLocation(FVector( GetActorLocation() .X, GetActorLocation() .Y,
69   ConstantZ)) ;
70 
71 if (hp != 0) {
72   hp--;
73 } else {
74   OnDestroy() ;
75 }
76 }
```

Listing 10: Metoda Move()

Kolejną ważną metodą w każdym agencie jest OnOverlapBegin(), jest to metoda, która jest wywoływana, kiedy jakiś inny obiekt wejdzie w obszar jego interakcji. Na przykład dla RabbitAgent, w zależności od aktora i obecnych potrzeb ma inne zastosowania. Jeśli królik obecnie poszukuje rośliny i wejdzie z nią w obszar interakcji, roślina zostanie usunięta, a sam zyskuje zdrowie. Jeśli obecnie poszukuję partnera i wejdzie w jego obszar interakcji, dany agent, jak i jego partner tracą zdrowie do danego poziomu, a następnie tworzą nowych agentów.

```

1 void ARabbitAgent :: OnOverlapBegin(UPrimitiveComponent* OverlappedComp ,
2   AActor* OtherActor ,
3   UPrimitiveComponent* OtherComp , int32 OtherBodyIndex , bool bFromSweep ,
4   const FHitResult& SweepResult )
5 {
6   Super :: OnOverlapBegin(OverlappedComp , OtherActor , OtherComp ,
7   OtherBodyIndex , bFromSweep , SweepResult ) ;
8 
9   if ( Cast< APlantAgent >(OtherActor) == atractorPlant && atractorPlant )
10  {
11    atractorPlant->OnDestroy() ;
12    hp = RABBIT_MAX_HP;
13    atractorPlant = nullptr ;
14  }
15  else if ( Cast< ARabbitAgent >(OtherActor) == atractorRabbit &&
16    atractorRabbit )
17  {
18    hp = RABBIT_MAX_HUNGRY_HP_LEVEL;
19    atractorRabbit->hp = RABBIT_MAX_HUNGRY_HP_LEVEL;
20    for ( int j = 0; j < RABBIT_REPRODUCE_COUNT; j ++ ) {
21      const FVector Loc( GetActorLocation() .X + FMath :: RandRange(-50 , 50) ,
22        GetActorLocation() .Y + FMath :: RandRange(-50 , 50) , GetActorLocation()
23        .Z );
24      auto const SpawnedActorRef = GetWorld ()->SpawnActor< ARabbitAgent >(
25        RabbitActor , Loc , GetActorRotation() );
26      if ( SpawnedActorRef )
27      {
28        SpawnedActorRef->hp = RABBIT_MAX_HUNGRY_HP_LEVEL;
```

```

22     SpawnedActorRef->SetUpAgent(true);
23 }
24 }
25 ActorRabbit = nullptr;
26 }
27 }
28 }
```

Listing 11: Interacja agenta z innymi agentami

Kolejną klasą jest AgentSpawner, którego głównym zadaniem jest kontrola populacji, aby nie przekroczyła zadanej ilości oraz by w razie potrzeby dodał nowych agentów danego rodzaju, jeśli ci się skończą na planszy. Na przykład, kiedy na planszy nie ma już AgentRabbit, spawner generuje nowe króliki w danej ilości i umieszcza je w losowych miejscach na planszy

```

1 if (Rabbits.Num() == 0)
2 {
3     const FVector Origin = GetActorLocation();
4     TArray<UStaticMeshComponent*> Components;
5     RabbitActor.GetDefaultObject()->GetComponents<UStaticMeshComponent>(
6         Components);
7     ensure(Components.Num() > 0);
8     for (int i = 0; i < RABBIT_COUNT; i++) {
9         const FVector Loc(Origin.X + FMath::RandRange(-50, 50), Origin.Y +
10             FMath::RandRange(-50, 50), Origin.Z);
11         auto const SpawnedActorRef = GetWorld()->SpawnActor<ARabbitAgent>(
12             RabbitActor, Loc, GetActorRotation());
13         if (SpawnedActorRef)
14         {
15             SpawnedActorRef->hp = RABBIT_MAX_HUNGRY_HP_LEVEL;
16             SpawnedActorRef->SetUpAgent(true);
17         }
18     }
19 }
```

Listing 12: Dodawanie nowych agentów metodzie Tick(float DeltaTime)

Drugim zadaniem jest też włączanie i wyłączanie wszystkich agentów na planszy.

Kolejną klasą jest AgentSpawnBox. Podobnie jak AgentSpawner tworzy nowych agentów, ale z tą różnicą, że do pomocy potrzebuję gracza. W klasie tej nowy agent danego rodzaju jest tworzony, kiedy gracz wejdzie w interakcję z tym obiektem za pomocą kontrolera ruchowego. Dzięki temu gracz może "wyciągnąć" nowego agenta i postawić go na planszy w takim miejscu, jakim chce.

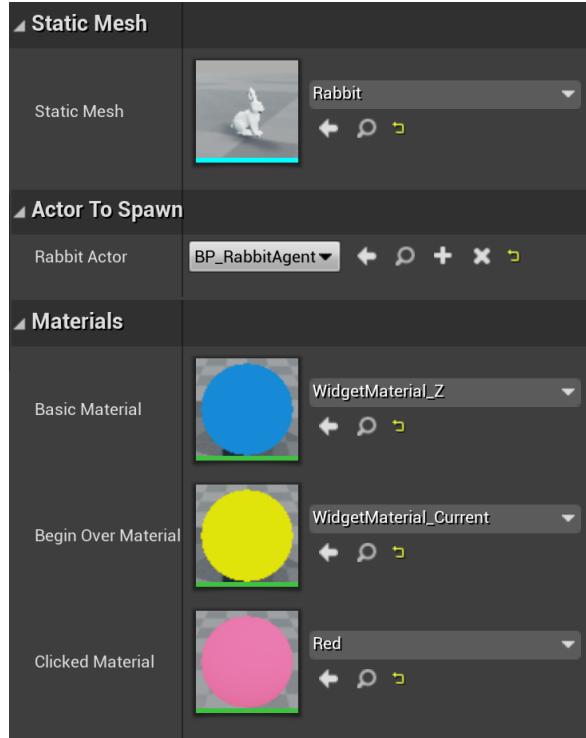
Kolejną klasą jest AgentTable. Ustawia on jedynie tych agentów, których gracz postawi na planszy.

Ostatnią klasą jest AgentControl, który odpowiada za tworzenie UI i komunikację pomiędzy graczem, a klasą odpowiedzialną za działanie agentów, czyli AgentSpawner.

4.4.2 Modele Agentowe - UE4

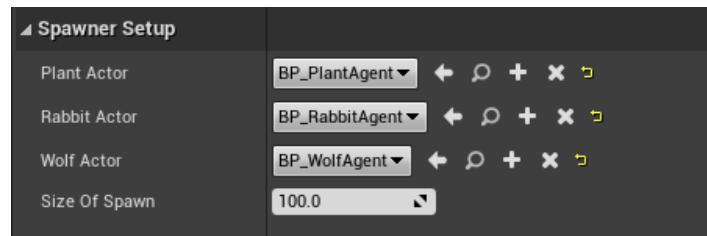
Na podstawie kodów C++ stworzone zostały klasy BP będące dziećmi odpowiednich klas bazowych z kodu źródłowego. Klasy BP_RabbitAgent, BP_PlantAgent i BP_WolfAgent ustawia się w następujący sposób, poprzez wybranie odpowiedniego

obiekty, jak agent ma wyglądać w programie oraz wybrać jakiego aktora ma stworzyć w trakcie etapu reprodukcji, z wyjątkiem PlantAgent, który powstaje tylko w AgentSpawner. Tutaj też wybieramy, jaki kolor ma mieć aktor, kiedy będziemy w nim wchodzić w interakcje na etapie ręcznego tworzenia planszy.



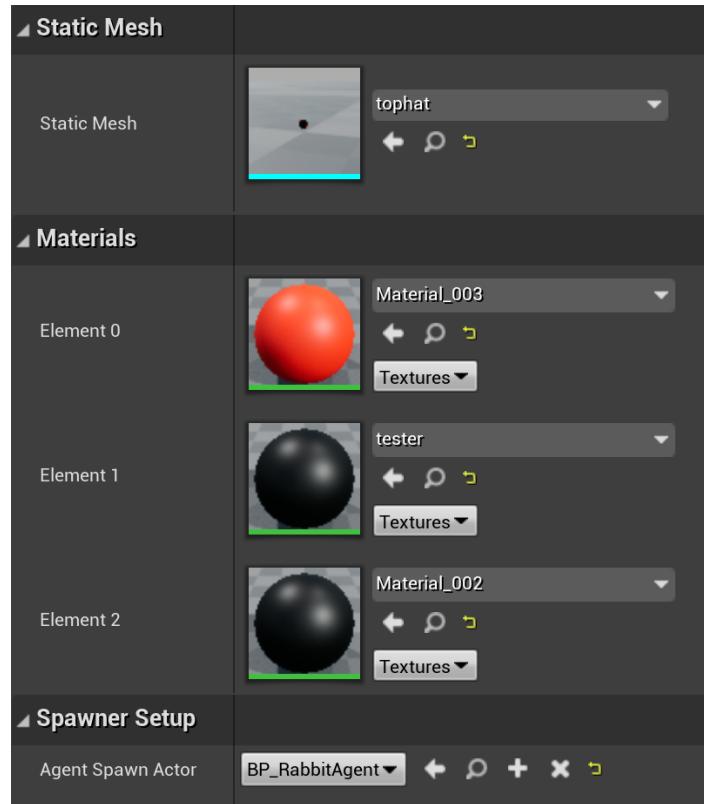
Rysunek 23: Ustawienia Agentów w UE4

Kolejną klasą jest BP_Spawner, która zostanie umieszczona na poziomie. W niej ustawiamy, jakich dokładnie agentów chcemy ustawić, których stworzyliśmy w Blueprintach oraz jak duży ma być obszar tworzenia nowych agentów przez spawner.



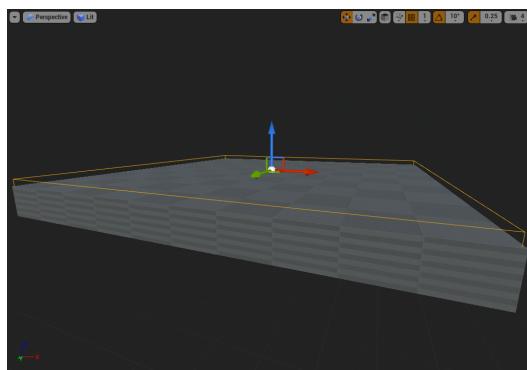
Rysunek 24: Ustawienia BP_Spawner w UE4

Kolejną klasą jest BP_AgentSpawnBox. Podobnie jak BP_Spawner tworzy nowych agentów, z tą różnicą, że w nim ustawiamy tylko jeden rodzaj agenta do stworzenia. Po ustawieniu agenta za pomocą kontrolerów ruchowych możemy go postawić na planszy.



Rysunek 25: Ustawienia BP_AgentSpawnBox w UE4

Ostatnie dwie klasy to BP_AgentTable i BP_AgentControl. Pierwsza w nim jest planszą, w której ustawiamy jak plansza ma wyglądać oraz miejsce, gdzie możemy położyć i zabrać agentów. Druga klasa jest widgetem i tak jak w poprzednich modelach, poprzez najechanie kontrolerem na odpowiednią opcję symulacja startuje, albo się resetuje.



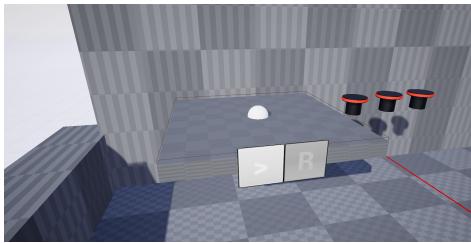
(a) Wygląd planszy w UE4



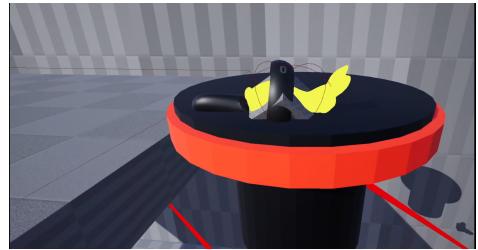
(b) Wygląd widgetu w UE4

4.4.3 Modele Agentowe - Wygląd symulacji w projekcie

W programie za pomocą kontrolerów możemy wyciągać agentów z SpawnBoxów i położyć ich następnie na planszy. Każdy rodzaj agenta ma swój własny SpawnBox różniący się wyglądem.

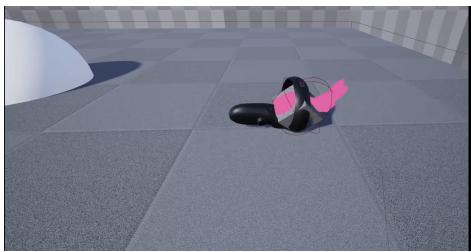


(a) Plansza w programie

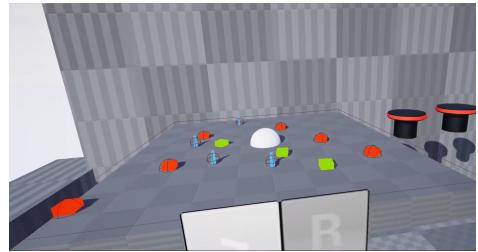


(b) Wyciąganie agenta z SpawnBoxu

Każdego agenta z SpawnBoxu możemy położyć w dowolnym miejscu na planszy. Kiedy agent zmieni kolor na żółty, oznacza to, że możemy go spokojnie postawić i że nie zniknie. Agenta z planszy możemy też przełożyć w inne miejsce lub go usunąć poprzez wyciągnięcie go z planszy, a następnie poprzez puszczenie trzymanego agenta poza planszą.



(a) Kładzenie agenta na planszy



(b) Plansza z agentami

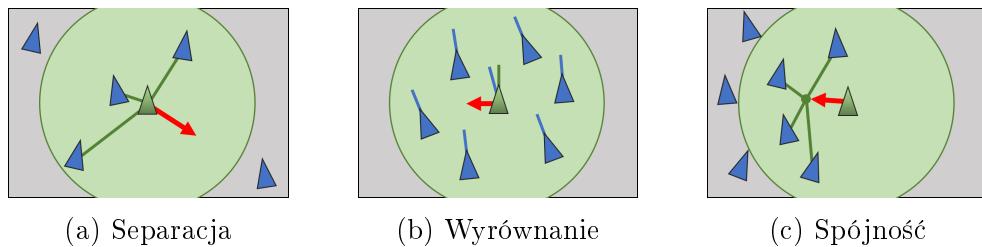
Symulację uruchamiamy poprzez najechanie kontrolerem na przycisk start, który znajduje się na widgecie przed planszą. Symulacja będzie trwać, dopóki nie wyłączymy jej drugim przyciskiem. Podczas symulacji agenci będą się poruszać zgodnie z zachowaniami, jakie zostały stworzone w kodzie.

W załączonym filmie można zobaczyć jak model wygląda w trakcie działania <https://youtu.be/2fvBIVX4U5c>

4.5 Ptaki (Boids)

W roku 1986 w ciągu dwóch miesięcy Craig Reynolds pracujący wtedy w firmie "Symbolics" stworzył model komputerowy skoordynowanego ruchu zwierząt takich, jak ławica ryb czy stado ptaków. Model ten był oparty na trójwymiarowej geometrii, którą zwykle używa się animacji komputerowej. Stworzenia wchodzące w skład modelu nazwał "boid", które w dialekcie nowojorskim oznaczają również ptaki, a samą nazwę podobno zainspirował się z filmu "The Producers" Mela Brooksa [19]. Sam podstawowy model stada opiera się na 3 prostych zasadach [20]:

- Separacja (a): Odpowiedzialne za unikanie kolizji pobliskich członków stada poprzez unikanie nagromadzenia ich w pobliżu. Czerwona strzałka oznacza kierunek steru, zielone linie odległości do pobliskich ptaków, które są w zasięgu, a zielone koło to zasięg "widzenia" innych ptaków
- Wyrównanie (b): Odpowiedzialne, aby przemieszanie było uśrednione do innych pobliskich członków stada. Czerwona strzałka oznacza kierunek steru, zielone linia oznacza obecny kierunek, niebieska żądany kierunek ruchu, a zielone koło to zasięg "widzenia" innych ptaków
- Spójność (c): Odpowiedzialne za utrzymanie bliskości członków stada, poprzez poruszanie się obiektu w kierunku średniej pozycji pobliskich członków. Czerwona strzałka oznacza kierunek steru, zielone linie odległości od środka masy pobliskich ptaków, a zielone koło to zasięg "widzenia" innych ptaków



W początkowych eksperymentach, model był trochę bardziej rozbudowany, dzięki czemu ptaki, mogły omijać obiekty i poszukiwać celu [21]. Ptaki w projekcie zostały stworzone na podstawie kodu [22].

4.5.1 Ptaki - kod

Kod C++ składa się z następujących klas: BoidTarget, BoidManager, BoidSpawner Boid i BoidsMenu.

BoidTarget jest z nich najmniej rozbudowany, ponieważ jest tylko aktor z ustalonim meshem i materiałem. Jego jedynym celem jest ustalenie miejsca, do którego mają zmierzać ptaki, kiedy będziemy tego chcieli.

BoidManager jest klasą odpowiedzialną za zarządzaniem wszystkimi ptakami na poziomie. W każdej klatce dla każdego ptaka odpalanie jego obliczanie rotacji oraz ją aktualizuje. W taki sam sposób aktualizuję obecną pozycję każdego ptaka.

```

1 void ABoidManager::Tick(float DeltaTime) {
2     Super::Tick(DeltaTime);
3
4     if (ManagedBoids.Num() != 0) {
5         for (ABoid* Boid : ManagedBoids) {
6             Boid->CalculateBoidRotation();
7             Boid->UpdateBoidRotation(DeltaTime);
8             Boid->CalculateBoidPosition(DeltaTime);
9             Boid->UpdateBoidPosition();
10        }
11    }
12 }
```

Listing 13: Metoda Tick()

W BoidManager są też informacje o tym, czy ptaki mają udać się w stronę wyznaczonego celu. Znajdują się również informacje, z jaką siłą mają działać stosowane aktualnie zasady. Siłę działania zasad oraz podążanie za celem ustawiamy potem w widżecie, który jest dzieckiem klasy BoidsMenu.

BoidSpawner jest odpowiedzialny za tworzenie nowych ptaków, w takiej ilości, jaką mu zadamy oraz w danej mu odległości.

W klasie Boid odbywają się wszystkie obliczenia dotyczące 3 zasad. Dla każdej zasady pomiędzy obecnym ptakiem a wszystkimi w pobliżu, obliczamy wektor separacji, spójności i wyrównania. Po obliczeniu, wektory są dzielone przez liczbę pobliskich ptaków i normalizowane.

```

1 void ABoid::CalculateSeparation(FVector& Separation, ABoid* Boid) {
2     FVector Sub = GetActorLocation() - Boid->GetActorLocation();
3     Separation += Sub * Sub.GetSafeNormal().Size();
4 }
5
6 void ABoid::CalculateAlignment(FVector& Alignment, ABoid* Boid) {
7     Alignment += Boid->GetActorForwardVector();
8 }
9
10 void ABoid::CalculateCohesion(FVector& Cohesion, ABoid* Boid) {
11     Cohesion += Boid->GetActorLocation();
12 }
```

Listing 14: Metody obliczające odpowiednie wektory

Jeśli śledzimy cel, to dodajemy też znormalizowany wektor pomiędzy pozycją celu i ptaka. Na koniec każdy wektor, po wcześniejszym pomnożeniu przez ich siłę działania danej zasady z BoidManger, dodajemy do wektora interpolacji i mnożymy przez daną prędkość obrotu oraz normalizujemy, aby stworzyć rotator, który będzie kolejną rotacją ptaka.

```

1 void ABoid::CalculateBoidRotation() {
2     TArray<ABoid*> CloseBoids = CalculateClosestBoids(
3         AmountOfBoidsToObserve);
4     FVector InterpolatedForwardVector = FVector::ZeroVector;
5     FVector AlignmentVector = FVector::ZeroVector;
6     FVector CohesionVector = FVector::ZeroVector;
7     FVector SeparationVector = FVector::ZeroVector;
8     FVector TargetVector = FVector::ZeroVector;
9
10    if (CloseBoids.Num() != 0) {
```

```

10    for (int index = 0; index < CloseBoids.Num(); index++) {
11        ABoi* Boid = CloseBoids[index];
12        CalculateAlignment(AlignmentVector, Boid);
13        CalculateCohesion(CohesionVector, Boid);
14        CalculateSeparation(SeparationVector, Boid);
15    }
16    AlignmentVector /= CloseBoids.Num();
17    CohesionVector /= CloseBoids.Num();
18    SeparationVector /= CloseBoids.Num();
19
20    AlignmentVector.Normalize();
21    CohesionVector.Normalize();
22    SeparationVector.Normalize();
23}
24
25 if (Manager->IsBoidsFollowTarget()) {
26     TargetVector = CalculateTarget();
27 }
28
29 InterpolatedForwardVector += AlignmentVector * Manager->
30     GetAlignmentWeight();
31 InterpolatedForwardVector += CohesionVector * Manager->
32     GetCohesionWeight();
33 InterpolatedForwardVector += SeparationVector * Manager->
34     GetSeparationWeight();
35 InterpolatedForwardVector += TargetVector * Manager->GetTargetWeight();
36 InterpolatedForwardVector *= TurnSpeed;
InterpolatedForwardVector.Normalize();
NextBoidRotation = UKismetMathLibrary::MakeRotFromX(
    InterpolatedForwardVector);
36 }

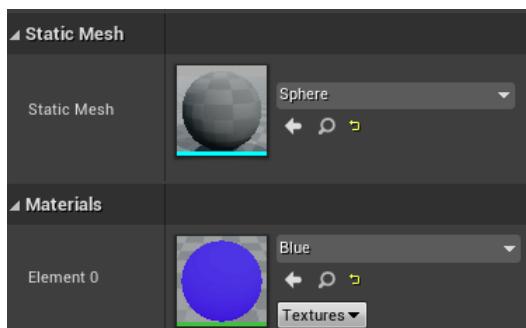
```

Listing 15: Obliczanie rotacji boida

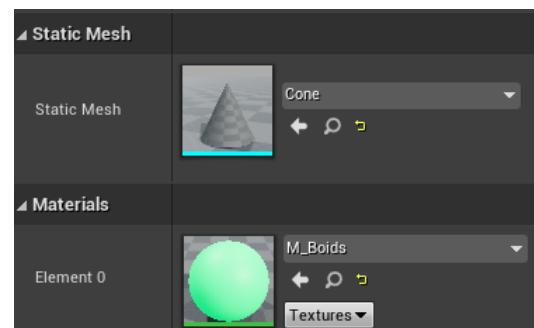
4.5.2 Ptaki - UE4

Na podstawie kodów C++ stworzone zostały klasy BP będące dziećmi odpowiednich klas bazowych z kodu źródłowego.

W BP_BoidTarget ustawiamy tylko mesh i materiał, a następnie umieszczamy ją na poziomie. Podobnie z BP_Boid w którym też ustawiamy tylko mesh i materiał, ponieważ cała logika została stworzona w C++.



(a) Ustawienia BoidTarget w UE4

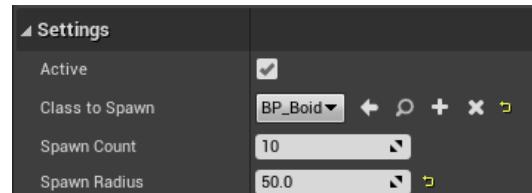


(b) Ustawienia Boid w UE4

BP_BoidManager i BP_BoidSpawner też nie mają rozbudowanych opcji. W pierwszym nic nie zmieniamy, ponieważ jego ustawienia będę wykorzystywane przez widget. W drugim natomiast ustawiamy, czy ma być aktywny, jakie ptaki ma tworzyć, w jakiej ilości i wielkość obszaru w którym mają być tworzone od niego.



(a) Ustawienia BoidManager w UE4



(b) Ustawienia BoidSpawner w UE4

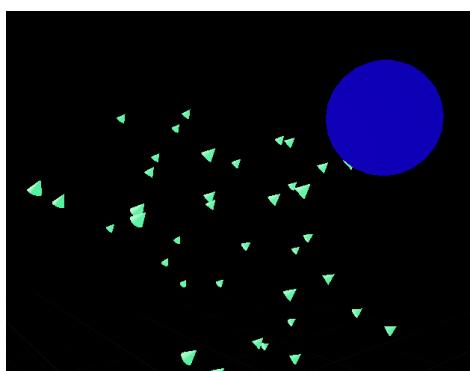
WBP_BoidHud, tak jak wszystkie widgety w poprzednich symulacjach, po najechniu kontrolerem ruchowym, możemy wybrać to, czy ptaki mają podążać za celem, czy się będą rozpraszać po okolicy. Możemy też wybrać, z jaką siłą ma być wykonywana jedna z trzech zasad oraz jak blisko ptaki mają się zbliżyć celu.



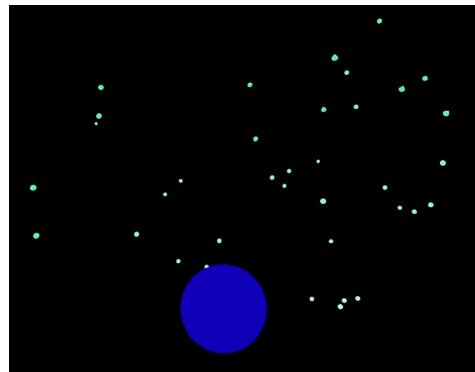
Rysunek 32: Wygląd widgetu do sterowania zachowaniem ptaków

4.5.3 Ptaki - Wygląd symulacji w projekcie

W programie nad lewym kontrolerze mamy widget, którym sterujemy zachowaniem ptaków. Przy pomocy prawego kontrolera możemy ustawić opcje np. ustawić czy ptaki mają podążać za calem oraz możemy wrócić do galerii.

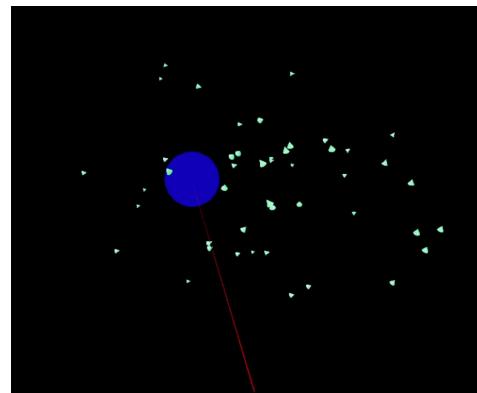
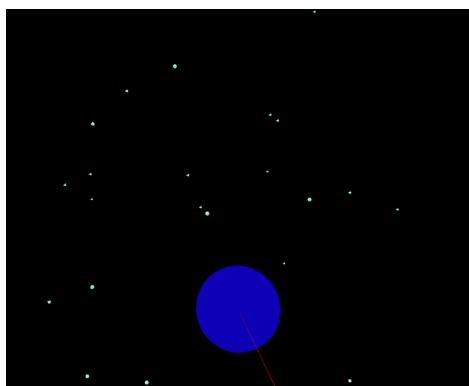


(a) Boidy zmierzają w kierunku celu



(b) Boidy się rozpraszają

Po kliknięciu na prawym kontrolerze spustu możemy zmienić położenie celu do którego mogą zmierzać ptaki.



Rysunek 34: Przesuwanie celu w programie

W załączonym filmie można zobaczyć jak model wygląda w trakcie działania <https://youtu.be/uj8UxW5x9GQ>

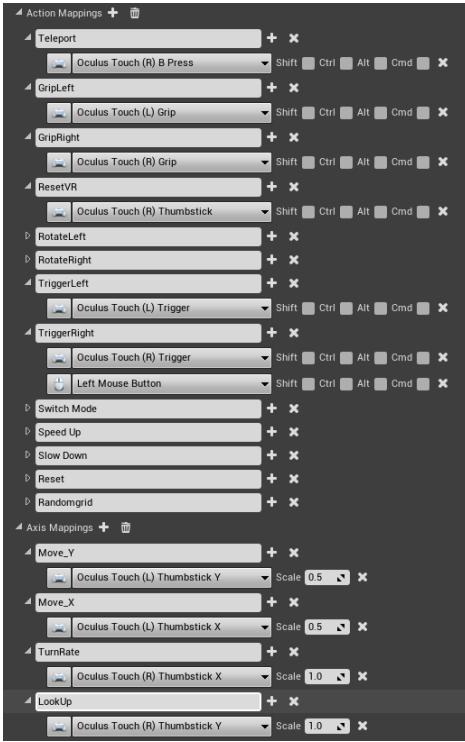
5 Sterowanie postacią w grze i mapa

5.0.1 AVRCharacter - Postać gracza

Jedną z pierwszych rzeczy stworzonych w projekcie była klasa odpowiedzialna za poruszanie się postaci. Klasa AVRCharacter jest dzieckiem klasy ACharacter. Klasa jest "pionkiem", którym może sterować gracz. Jest fizyczną reprezentacją gracza na poziomie z wbudowaną informacją o meshu, kolizji i logice ruchu. W klasie tej znajdują się wszystkie informacje potrzebne postaci w tym informacja o klasie kontrolerów ruchu, które w zależności od mapy, na którym są modele, różnią się między sobą. Metoda SetupPlayerInputComponent, która jest metodą wirtualną, jest wywołana w celu powiązania metod klasy z przyciskami, które zdefiniowaliśmy w ustawieniach projektu.

```
1 void AVRCharacter::SetupPlayerInputComponent(UInputComponent*  
      PlayerInputComponent)  
2 {  
3     Super::SetupPlayerInputComponent(PlayerInputComponent);  
4  
5     PlayerInputComponent->BindAxis(TEXT("Move_Y")) , this , &AVRCharacter::  
      MoveForward);  
6     PlayerInputComponent->BindAxis(TEXT("Move_X")) , this , &AVRCharacter::  
      MoveRight);  
7     PlayerInputComponent->BindAxis(TEXT("TurnRate")) , this , &AVRCharacter::  
      TurnAtRate);  
8     PlayerInputComponent->BindAxis(TEXT("LookUp")) , this , &AVRCharacter::  
      LookUpAtRate);  
9     PlayerInputComponent->BindAction(TEXT("Teleport")) , IE_Pressed , this , &  
      AVRCharacter::SetupTeleport);  
10    PlayerInputComponent->BindAction(TEXT("Teleport")) , IE_Released , this , &  
      AVRCharacter::BeginTeleport);  
11    PlayerInputComponent->BindAction(TEXT("GripLeft")) , IE_Pressed , this , &  
      AVRCharacter::GripLeft);  
12    PlayerInputComponent->BindAction(TEXT("GripLeft")) , IE_Released , this , &  
      AVRCharacter::ReleaseLeft);  
13    PlayerInputComponent->BindAction(TEXT("GripRight")) , IE_Pressed , this , &  
      AVRCharacter::GripRight);  
14    PlayerInputComponent->BindAction(TEXT("GripRight")) , IE_Released , this , &  
      AVRCharacter::ReleaseRight);  
15    PlayerInputComponent->BindAction(TEXT("TriggerRight")) , EInputEvent::  
      IE_Pressed , this , &AVRCharacter::RightTriggerPressed);  
16    PlayerInputComponent->BindAction(TEXT("TriggerRight")) , EInputEvent::  
      IE_Released , this , &AVRCharacter::RightTriggerReleased);  
17    PlayerInputComponent->BindAction(TEXT("TriggerLeft")) , EInputEvent::  
      IE_Pressed , this , &AVRCharacter::LeftTriggerPressed);  
18    PlayerInputComponent->BindAction(TEXT("TriggerLeft")) , EInputEvent::  
      IE_Released , this , &AVRCharacter::LeftTriggerPressed);  
19  
20    PlayerInputComponent->BindAction(TEXT("ResetVR")) , IE_Pressed , this , &  
      AVRCharacter::ResetVR);  
21    PlayerInputComponent->BindAction<FFooDelegate>(TEXT("RotateLeft")) ,  
      IE_Pressed , this , &AVRCharacter::Rotation,-30.f);  
22    PlayerInputComponent->BindAction<FFooDelegate>(TEXT("RotateRight")) ,  
      IE_Pressed , this , &AVRCharacter::Rotation,30.f);  
23 }
```

Listing 16: Przypisanie metod do przycisków



Rysunek 35: Przypisanie przycisków w projekcie

W projekcie można poruszać się na dwa sposoby. Pierwszy z nich polega na używaniu joysticka na lewym kontrolerze do płynnego poruszania się po mapie w zależności od jego wychylenia przy pomocy kciuka. Drugi sposób jest natomiast o wiele bardziej przyjemny do poruszania się dla osób mających chorobę symulatorową. Jest to teleportacja do miejsca, gdzie obecnie wskazuję znacznik celu. Znacznik aktywujemy poprzez kliknięcie przycisku na prawym kontrolerze. Do znalezienia miejsca, w które się teleportowaliśmy zostały użyte kilka struktur silnikowych. FPredictProjectilePathParams, do którego wstawiamy parametry wejściowe, są to:

- promień naszej teleportacji używany podczas śledzenia kolizji,
- lokalizacja początku śladu teleportacji, jako punkt startowy przyjęty został prawy kontroler,
- początkowa prędkość startowa na początku śladu teleportacji, jako prędkości początkowa została przyjęty kierunek, który znajduje się na wprost kontrolera,
- maksymalny czas symulacji pocisku,
- kanał śledzenia używany do śledzenia kolizji.

Kolejną strukturą jest FPredictProjectilePathResult. Jest to kontener na wynik śledzenia ścieżki teleportacji, który dostajemy przy użyciu funkcji silnikowej PredictProjectilePath. Z FPredictProjectilePathResult możemy wyciągnąć informacje o tym, jak wygląda cała przewidziana ścieżka dla naszej teleportacji i miejsce, w które uderzy. Dodatkowo sprawdzana jest jeszcze, czy nasz punkt trafi w miejsce, gdzie możemy spokojnie się teleportować poprzez sprawdzenie, czy w miejscu teleportacji jest

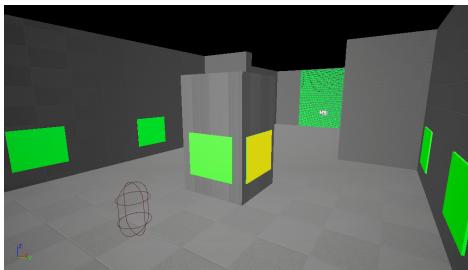
navmesh. Jeśli tak, to poпусzczeniu przycisku na kontrolerze zostaniemy teleportowani w miejsce, gdzie wskazaliśmy.

```
1 bool AVRCharacter::FindTeleportDestination(TArray< FVector>& OutPath,
2                                             FVector& OutLocation)
3 {
4     if (!RightController)
5     {
6         return false;
7     }
8     FVector Start = RightController->GetActorLocation();
9     FVector Look = RightController->GetActorForwardVector();
10
11    FPredictProjectilePathParams Params(TeleportProjectileRadius, Start,
12                                         Look * TeleportProjectileSpeed,
13                                         TeleportSimulationTime, ECC_Visibility, this);
14
15    FPredictProjectilePathResult Result;
16
17    bool bHit = UGameplayStatics::PredictProjectilePath(this, Params,
18                                                       Result);
19
20    if (!bHit)
21    {
22        return false;
23    }
24
25    for (auto& PointData : Result.PathData)
26    {
27        OutPath.Add(PointData.Location);
28    }
29
30    FNavLocation NavLocation;
31
32    if (!UNavigationSystemV1::GetCurrent(GetWorld())->
33        ProjectPointToNavigation(Result.HitResult.Location, NavLocation,
34        TeleportProjectionExtent))
35    {
36        return false;
37    }
38
39    OutLocation = NavLocation.Location;
40
41    return true;
42 }
```

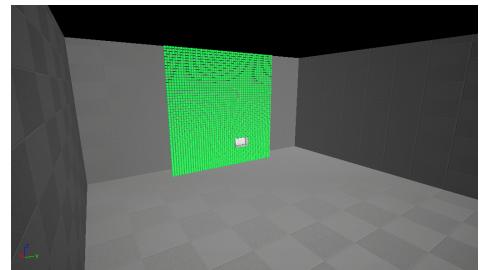
Listing 17: Metoda do znajdowania miejsca gdzie będziemy się teleportować

5.0.2 Pokój galerii w programie

Ostatnie co zostało stworzone do projektu to pokoje (mapy), na których zostały umieszczone modele. Każdy pokój został podzielony na dwa segmenty. W pierwszym segmencie użytkownik może przeczytać informację o modelu, na którego poziomie się znajduje. W drugim segmencie może zobaczyć jak dany model działa oraz uruchomić dany model.



(a) Pierwszy segment pokoju



(b) Drugi segment pokoju

Elementy pokoju zostały stworzone w programie do grafiki 3D Blender3D. Jest to darmowy program, z którego w łatwy sposób można wrzucać stworzone tam meshy do UE4. Natomiast ściany, podłoga i sufit zostały stworzone przy pomocy meshy znajdujących się już w silniku UE4.

6 Wnioski

Stworzenie projektu programu w VR skłania do kilku wniosków:

- Dobrze napisana dokumentacja do programu to rzadkość, a UE4 niestety takowej dobrze napisanej nie posiada.
- Do projektowania grafiki 3D trzeba mieć odpowiednie umiejętności i czas by stworzyć coś ładnego, a zarazem optymalnego dla VR.
- Wybrane modele komputerowe w przyszłości można rozbudować o nowe funkcje lub dodać jeszcze inne modele do galerii.
- Pisanie projektu z myślą o VR uczy myślenia by projektować grę w taki sposób, aby nie wywołać u osób korzystających z niego choroby symulatorowej.
- Unreal Engine pozwala wszystko napisać przy pomocy BluePrintów, co dla osób mało technicznych może być zaletą, lecz w rozbudowanym projekcie BP mogą powodować problemy, które nie występują w C++
- Tworzenie projektu VR może być dla niektórych męczące, przykładowo może to być spowodowane ciągłym zdejmowaniem i zakładaniem gogli.

Literatura

- [1] VRcompare. VR Devices.
<https://vr-compare.com>.
[Internet; Data wejścia: 04.04.2022].
- [2] Steam. Ankieta używanego sprzętu na steam.
<https://store.steampowered.com/hwsurvey>.
[Internet; Data wejścia: 04.04.2022].
- [3] Beat Games. Zdjęcie przykładowej gry na VR.
https://store.steampowered.com/app/620980/Beat_Saber/.
[Internet; Data wejścia: 05.11.2022].
- [4] Ben Lang. Quest App Lab Soars to 1,440 Apps, More Than Tripling Those on the Main Store.
<https://www.roadtovr.com/oculus-quest-app-lab-100-apps-best-rated-most-popular/>
[Internet; Data wejścia: 05.11.2022].
- [5] Valve. Steam VR Game List.
<https://store.steampowered.com/vr>.
[Internet; Data wejścia: 05.11.2022].
- [6] Michał Brzeżański. Choroba Symulatorowa.
<https://vрpolska.eu/skad-sie-bierze-choroba-symulatorowa/>.
[Internet; Data wejścia: 04.04.2022].
- [7] James A. Blackburn Gregory L. Baker. The Pendulum A Case Study in Physics.
https://www.academia.edu/34415707/The_pendulum_A_case_study_in_physics_pdf.pdf.
[Internet; Data wejścia: 24.07.2022].
- [8] Krzysztof Jankowski. Dynamics of double pendulum with parametric vertical excitation.
https://web.archive.org/web/*/http://www.team.kdm.p.lodz.pl/master/Jankowski.pdf.
[Internet; Data wejścia: 05.05.2022].
- [9] Encyklopedia PWN. Automat Komórkowy.
<https://encyklopedia.pwn.pl/haslo/;3872571>.
[Internet; Data wejścia: 31.07.2022].
- [10] Conway's Game of Life.
https://conwaylife.com/wiki/Conway's_Game_of_Life.
[Internet; Data wejścia: 31.07.2022].
- [11] Martin Gardner. The fantastic combinations of John Conway's new solitaire game "life".
<https://web.stanford.edu/class/sts145/Library/life.pdf>.
[Internet; Data wejścia: 01.08.2022].

- [12] Staffan Björk i Jesper Juul. Zero-Player Games.
<https://www.jesperjuul.net/text/zeroplayergames/>.
[Internet; Data wejścia: 01.08.2022].
- [13] Steve Weyns. GameOfLife.
<https://github.com/sweyns/GameOfLife>.
[Internet; Data wejścia: 11.09.2021].
- [14] Edward N.Lorenz. The Essence of Chaos.
Jessie and John Danz Lecture Series.
[Data Wydania: 1993]
[Wydawca: University of Washington Press].
- [15] Paul Halpern. O motylach i burzach.
https://web.archive.org/web/20100909161235/http://czytelnia.onet.pl/0_1161316_do_czytania.html.
[Internet; Data wejścia: 19.05.2022].
- [16] Jarosław Demkowski. Efekt motyla i dziwne atraktory.
<https://silo.tips/download/efekt-motyla-i-dziwne-atraktory>.
[Internet; Data wejścia: 26.07.2022].
- [17] Maciej Matyka. Jak narysować Motyle Lorenza .
<https://www.youtube.com/watch?v=XZ5QKKxHTXQ>.
[Internet; Data wejścia: 20.05.2022].
- [18] Bassel Karami. Intro to Agent Based Modeling.
<https://towardsdatascience.com/intro-to-agent-based-modeling-3eea6a070b72>.
[Internet; Data wejścia: 25.05.2022].
- [19] DonHopkins. Boids Name.
<https://news.ycombinator.com/item?id=22710201>.
[Internet; Data wejścia: 31.05.2022].
- [20] Wayne Carlson. Flocking Systems.
<https://ohiostate.pressbooks.pub/graphicshistory/chapter/19-2-flocking-systems/>.
[Internet; Data wejścia: 31.05.2022].
- [21] Craig Reynolds. Boids.
<https://www.red3d.com/cwr/boids/>.
[Internet; Data wejścia: 01.06.2022].
- [22] Darman1136. UE4Boids.
<https://github.com/Darman1136/UE4Boids>.
[Internet; Data wejścia: 12.08.2022].