POLITECHNIKA WROCŁAWSKA

WYDZIAŁ ELEKTRONIKI

KIERUNEK: INFORMATYKA (INF)

SPECJALNOŚĆ: INŻYNIERIA SYSTEMÓW INFORMATYCZNYCH (INS)

PRACA DYPLOMOWA

INŻYNIERSKA

Symulator graficzny procesu fizycznego w środowisku DirectX

Graphic simulator of a physical process in DirectX

AUTOR:

Wojciech Sobczak

PROWADZACY PRACĘ:

doc. dr inż. Jacek Jarnicki, W4/K8

OCENA PRACY:

WROCŁAW 2016

**Spis treści**

[Spis rysunków 4](#_Toc468058757)

[Spis listingów 5](#_Toc468058758)

[Spis tabel 6](#_Toc468058759)

[Skróty 7](#_Toc468058760)

[1. Wstęp 8](#_Toc468058761)

[1.1. Wprowadzenie 8](#_Toc468058762)

[1.2. Cel i zakres pracy 9](#_Toc468058763)

[2. Problem 10](#_Toc468058764)

[2.1. Sformułowanie problemu 10](#_Toc468058765)

[2.2. Przegląd dostępnych rozwiązań 10](#_Toc468058766)

[2.2.1. Unity 10](#_Toc468058767)

[2.2.2. Unreal Engine 11](#_Toc468058768)

[2.2.3. Blender 12](#_Toc468058769)

[2.2.4. Autodesk 3DSMax 14](#_Toc468058770)

[2.2.5. Posumowanie 15](#_Toc468058771)

[3. Aplikacja 16](#_Toc468058772)

[3.1. Założenia 16](#_Toc468058773)

[3.2. Przyjęte technologie 18](#_Toc468058774)

[3.2.1. DirectX 18](#_Toc468058775)

[3.2.2. Bullet Physics 20](#_Toc468058776)

[3.2.3. DirectXTK 21](#_Toc468058777)

[3.3. Struktura aplikacji 21](#_Toc468058778)

[3.3.1. Architektura 21](#_Toc468058779)

[3.3.2. Klasa Simulation 22](#_Toc468058780)

[3.3.3. Klasa Object 23](#_Toc468058781)

[3.3.4. Przestrzeń nazw Scenario 24](#_Toc468058782)

[3.4. Opis działania 24](#_Toc468058783)

[3.4.1. Potok renderowania 24](#_Toc468058784)

[3.4.2. Tworzenie obiektów świata 30](#_Toc468058785)

[3.5. Opis użytkowania programu 30](#_Toc468058786)

[3.5.1. Sterowanie kamerą 30](#_Toc468058787)

[4. Testy 31](#_Toc468058788)

[4.1. Plan testów 31](#_Toc468058789)

[4.2. Wyniki 32](#_Toc468058790)

[4.3. Wnioski 33](#_Toc468058791)

[5. Literatura 34](#_Toc468058792)

# Spis rysunków

[Rysunek 1 Przykład symulacji wiatru odziałującego na stadion - Autodesk Flow Design 8](#_Toc468058746)

[Rysunek 2 Przykładowa scena z gry Pillars of Eternity 11](#_Toc468058747)

[Rysunek 3 Przykładowa scena z gry Batman: Arkham Knight 12](#_Toc468058748)

[Rysunek 4 Przykładowa scena z animacji Big Buck Bunny, która w całości zrealizowana została w programie Blender 13](#_Toc468058749)

[Rysunek 5 Porównanie sceny z filmu MadMax: Fury Road, przed i po nałożeniu efektów specjalnych 15](#_Toc468058750)

[Rysunek 6 Scenariusz symulacji House of cards 16](#_Toc468058751)

[Rysunek 7 Scenariusz symulacji Towers 17](#_Toc468058752)

[Rysunek 8 Scenariusz symulacji Domino 17](#_Toc468058753)

[Rysunek 9 Drzewo dziedziczenia klasy Object<T> 23](#_Toc468058754)

[Rysunek 10 Potok renderowanie DirectX 25](#_Toc468058755)

[Rysunek 11 Wykres zależności czasu generowania pojedynczej klatki, w zależności od ilości obiektów na scenie 33](#_Toc468058756)

# Spis listingów

[Listing 1 Tworzenie urządzenia karty graficznej 26](#_Toc467452606)

# Spis tabel

[Tabela 1 Czasy pomiaru wydajności generowania pojedynczej klatki, w zależności od ilości obiektów na scenie 32](#_Toc468051444)

# Skróty

**GPL** (ang. *General Public License*)

**API** (ang. *Application Programming Interface*)

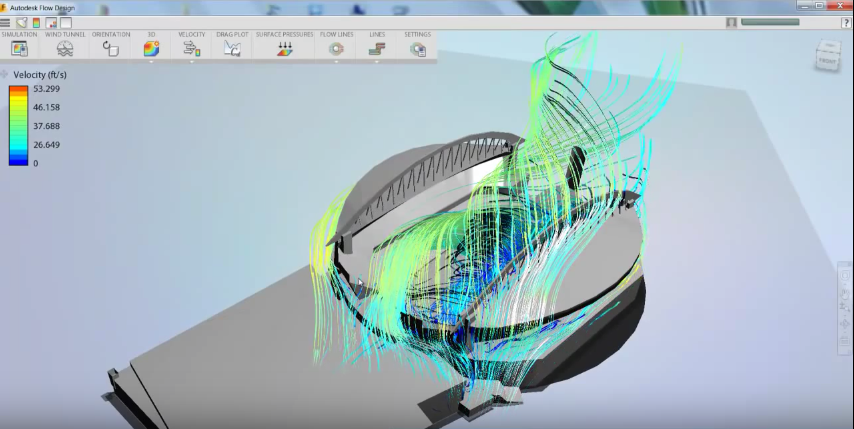
**SIMD** (ang. *Single Instruction, Multiple Data*)

**GPU** (ang. *Graphical Processing Unit*)

**CPU** (ang. *Central Processing Unit*)

1. Wstęp
   1. Wprowadzenie

Symulacje komputerowe świata realnego są nieodzownym elementem dzisiejszej technologii. Dzieje się tak dlatego, że można w ten sposób testować zachowania różnych konstrukcji, pomysłów, prototypów, bez konieczności jednoczesnego posiadania odpowiednich środków na budowę tworzonego modelu w celu tylko jego testowania. Pozwala to znacznie ograniczyć budżet danego projektu oraz ułatwić proces jego powstawania. Przykładem może być projektowanie budynków, gdzie na długo przed rozpoczęciem budów architekci oraz specjaliści budownictwa sprawdzają na symulacjach odporność konstrukcji na różne warunki pogodowe czy trzęsienia ziemi. Przykładami takich programów mogą być Abaqus, Sofistik, Autodesk Simulation CFD, które mają szerokie zastosowanie w budownictwie. Rysunek 1 przedstawia symulację, w której sprawdzane jest, w jaki sposób będzie się zachowywał wiatr wewnątrz i wokół konstrukcji stadionu.



Rysunek Przykład symulacji wiatru oddziałującego na stadion - Autodesk Flow Design

* 1. Cel i zakres pracy

Celem tej pracy jest stworzenie programu, który będzie interaktywnym środowiskiem symulującym proste zjawisko fizyczne. Jej zakres będzie obejmował użycie biblioteki DirectX 3D w celu renderowania grafiki oraz użycie symulatora fizyki Bullet Physics. Program będzie umożliwiał prostą interakcję z otoczeniem, po którym użytkownik będzie mógł swobodnie się poruszać.

1. Problem symulacji graficznej zjawisk fizycznych
   1. Sformułowanie problemu

Celem tej pracy jest przedstawienie graficzne zachowania się obiektów w przestrzeni trójwymiarowej przy jednoczesnym symulowaniu oddziaływań między nimi, powstałych w wyniku zderzeń.

* 1. Przegląd dostępnych rozwiązań

Rozwiązań, które pozwalają na wizualizację obiektów z jednoczesną możliwością opisania ich modelu fizycznego, jest na rynku wiele. Programy te są rozbudowane zarówno pod względem implementowanych procesów fizycznych, jak i znacznie bardziej skomplikowanych, niż opisanych w tej pracy, efektów graficznych opartych o niezwykle skomplikowany aparat matematyczny. Przykładem takich efektów mogą być systemy cząsteczkowe (particles systems), które np. pozwalają w sposób relatywnie realistyczny symulować zachowanie wody. Przykłady opisane w podrozdziałach będą dotyczyć właśnie takich rozwiązań.

* + 1. Unity

Produkt „Unity Game Engine” firmy Unity Technologies jest środowiskiem pozwalającym na w pełni programowalne budowanie dwuwymiarowych oraz trójwymiarowych scen z pomocą graficznego edytora. Docelowo produkt reklamowany jest jako rozwiązanie wspomagające tworzenie gier komputerowych. Jest to narzędzie, którego wytworzony zestaw scen może zostać odtworzony w 27 środowiskach uruchomieniowych, do których należą .: Windows, OSX, Linux/SteamOS, PS3, PS4, Xbox360, XONE oraz wiodące platformy mobilne, takie jak Android, IOS oraz Windows Phone [1].

Rozwiązanie jest niezwykle popularne wśród początkujących twórców gier ze względu na prostotę tworzenia scen, jednak zdarzają się także takie produkcje typu „AAA” (gry wysokobudżetowe), których architektura opiera się właśnie o to rozwiązanie. Przykładem takiego produktu może być „Torment: Tides of Numenera” [2] lub „Pillars of Eternity” [3].



Rysunek Przykładowa scena z gry Pillars of Eternity

Większość etapu budowania polega na użyciu graficznego interfejsu, który umożliwia aktualnie wybranym obiektom przypisanie różnych właściwości, takich jak np. bycie obiektem fizycznym czy statycznym (nie reagującym na fizykę otoczenia), oraz edytowania własności tych właściwości, takich jak w przypadku obiektu fizycznego, powierzchnię opisującą ten obiekt, jego masę lub środek masy tego obiektu.

Możliwość programowania interakcji oraz samych scen została zaimplementowana poprzez umożliwienie użytkownikom używania 3 języków programowania. Najpopularniejszym wyborem, a zarazem najmniej hermetycznym w obrębie środowiska Unity, jest C#, jednak istnieje możliwość wyboru innych języków, takich jak Boo, który składnią przypomina język Python oraz autorski produkt twórców silnika – Unity Script, który jest bardzo podobny do języka rozwiązań webowych JavaScript.

* + 1. Unreal Engine

„Unreal Engine” jest to produkt firmy Epic Games, twórców takich gier jak „Unreal Tournament” czy „Gears of War”, który, podobnie jak Unity, jest pełnoprawnym silnikiem do tworzenia gier oraz różnorakich scen trój- i dwuwymiarowych. Znaczącą jednak różnicą jest fakt, że silnik ten jest dużo częściej wybierany przez twórców gier wysokobudżetowych oraz symulacji. Dzieje się tak dlatego, że ów silnik pozwala na budowanie aplikacji w języku C++, co daje znacznie większe możliwości kontroli nad programem niż w przypadku wysokopoziomowych języków silnika Unity. Drugim powodem częstszego wybierania tego rozwiązania może być fakt, że Epic Games silnik ten tworzy od roku 1998, co daje o 8 lat większe doświadczenie niż to, jakie posiada firma Unity Technologies.

Tworzenie scen oraz definiowanie obiektów w tym silniku to również używanie interfejsu graficznego, w którym definiujemy właściwości obiektów, także pod względem ogólnym te dwa rozwiązania nie różnią się od siebie znacząco.

Unreal Engine to również rozwiązanie multiplatformowe, pozwalające wydać aplikację na różne systemy, po prostu definiując profile ustawień kompilacji.

Najpopularniejszymi przykładami pokazującymi możliwości tego rozwiązania mogą być „Batman: Arkham Knight” [4] czy też polska gra „Hatred” [5].



Rysunek Przykładowa scena z gry Batman: Arkham Knight

* + 1. Blender

Blender jest to program do modelowania obiektów 3D oraz tworzenia animacji. Jest to rozwiązanie typu OpenSource na licencji GPL, którego głównym programistą jest i był od samego początku powstawania programu Ton Roosendaal. Program ten, oprócz możliwości modelowania obiektów 3D, oferuje wachlarz innych, takich jak tworzenie efektów postprocesowych czy symulowanie fizyki tych obiektów, przez co jest on niezwykle popularny na rynku.

Bardzo dużą zaletą programu jest fakt, że posiada on własny silnik renderujący, który umożliwia szeroką ingerencję użytkownika w proces rysowania obiektu na ekranie. Do dyspozycji użytkownika oddano np. możliwość tworzenia własnych filtrów oraz shaderów, możliwość użycia rendererów innych niż domyślny Blender Internal, takich jak YafaRay czy LuxRender, oraz możliwość definiowania własnych, dając do dyspozycji możliwość pisania skryptów w języku Python.

Blender wykorzystuje silnik fizyczny Bullet Physics, użyty również w implementacji pracy inżynierskiej. Pozwala on na budowanie dokładnych symulacji fizycznych z wykorzystaniem modeli tworzonych wewnątrz programu, co przekłada się na wygodę użytkowania, gdyż raz wymodelowane przez nas obiekty posiadają zintegrowaną fizykę, której wystarczy tylko nadać odpowiednie właściwości liczbowe.

Rozwiązanie to, ze względu na wymienione wyżej funkcje, pozwala również na tworzenie efektów specjalnych, filmów i animacji, czego przykładem może być produkcja „Big Buck Bunny” [6] oraz „Big Miracle” [7].



Rysunek Przykładowa scena z animacji Big Buck Bunny, która w całości zrealizowana została w programie Blender

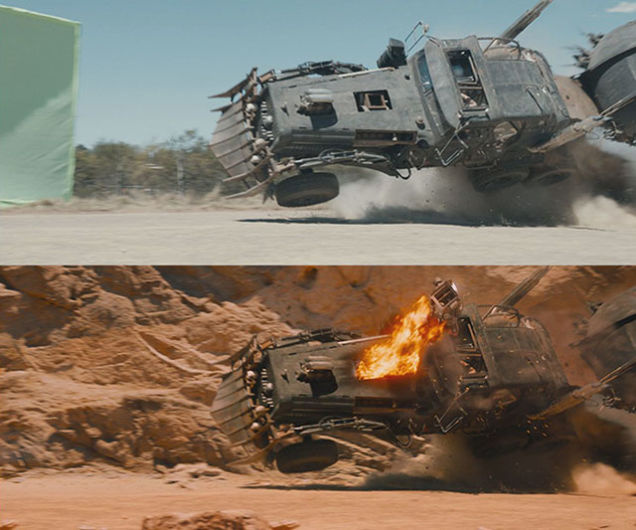
* + 1. Autodesk 3DSMax

3DS Max jest w pełni zamkniętym i komercyjnym produktem firmy Autodesk. Jest on, podobnie jak Blender, programem do tworzenia zaawansowanych modeli 3D oraz tworzenia animacji. Jako że nie jest to rozwiązanie tworzone przez społeczność, posiada znacznie większe i bardziej stałe zaplecze twórców oraz wsparcie, dlatego też jest częściej wybierane w komercyjnych rozwiązaniach.

Jeżeli chodzi o użytkowanie, Blender i 3DSMax są bardzo zbliżone w sensie ogólnym. Definicja obiektów to przeciąganie obiektów z menu, modelowanie siatek odbywa się poprzez przesuwanie poszczególnych linii, itd. Dodano do niego również obsługę języka MAXScript, jednak nie umożliwia on ingerencji w proces budowania obrazu, a tylko dodaje możliwość definiowania własnych wtyczek do programu czy też automatyzowania niektórych procesów twórczych.

Dokładnie tak samo jak w Blenderze, mamy tu możliwość tworzenia symulacji fizycznych, jednak w tym przypadku mamy do czynienia z symulacją wykorzystującą wewnętrzną implementację fizyki firmy Autodesk. Umożliwia nam ona np. budowanie symulacji cząsteczkowych oraz tworzenie symulacji tkanin.

O przewadze tego rozwiązania nad jego darmowym konkurentem może stanowić portfolio jego filmów, gdyż użyto go do stworzenia efektów specjalnych w takich produkcjach jak „Mad Max: Fury Road” [8], „The Curious Case of Benjamin Button” [9] czy „Black Hawk Down” [10].



Rysunek Porównanie sceny z filmu „MadMax: Fury Road” przed i po nałożeniu efektów specjalnych

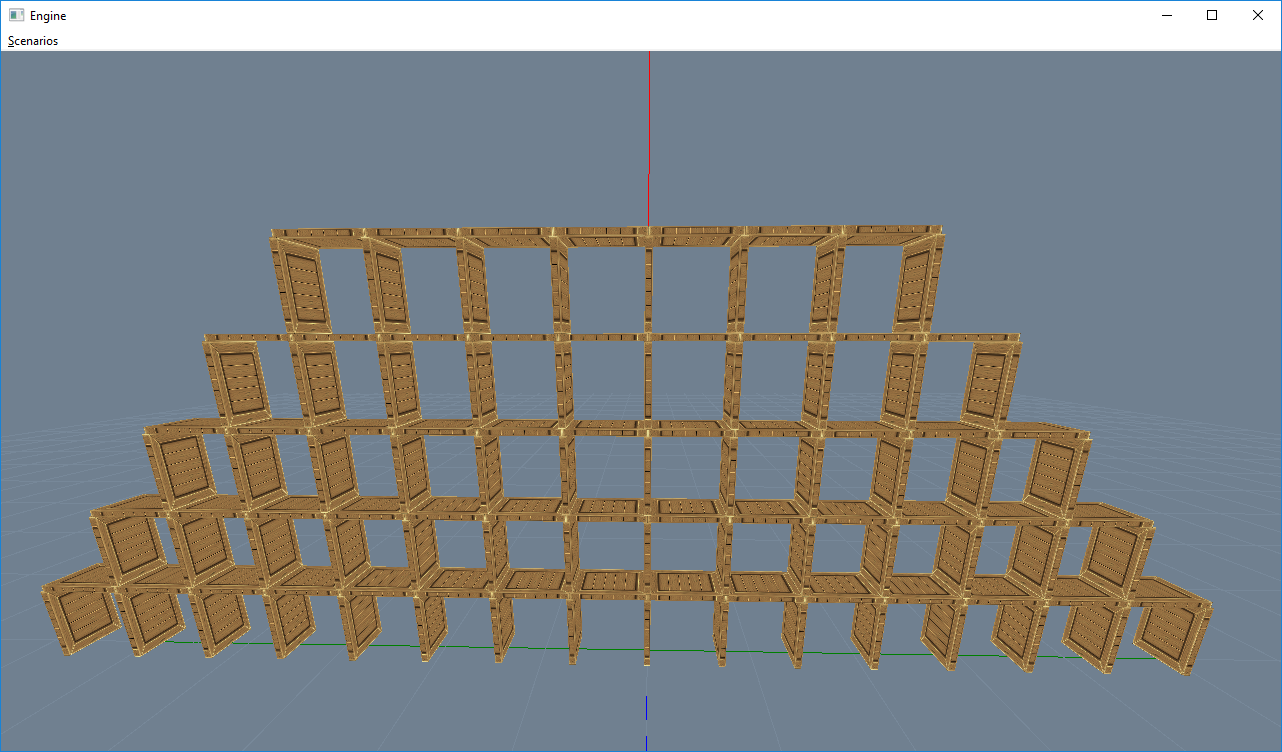
* + 1. Posumowanie

Jak widać, spektrum gotowych już rozwiązań jest bardzo szerokie. Mamy do dyspozycji zarówno przygotowane do tworzenia gier silniki, takie jak Unity, z szerokimi możliwościami symulacji różnych zjawisk, oraz programy do modelowania obiektów 3D, takie jak Blender, w których możliwość symulacji fizyki nie jest główną funkcjonalnością, a tylko dodatkowym atutem.

1. Program symulatora
   1. Założenia

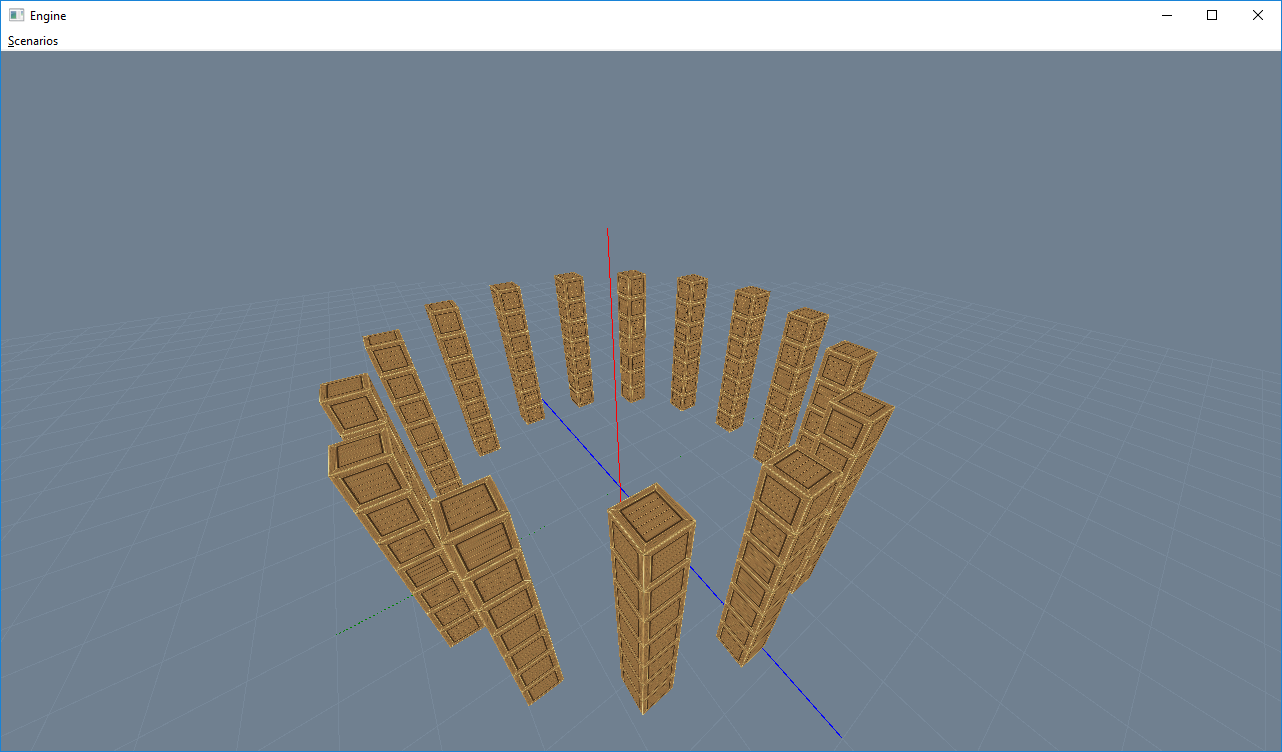
Symulator graficzny procesu fizycznego ma za zadanie pozwolić użytkownikowi na obserwację oraz destrukcję konstrukcji według 3 różnych predefiniowanych scenariuszy. Destrukcja ta będzie odbywała się poprzez wystrzeliwanie sześcianów przez użytkownika, celem zniszczenia wybranej konstrukcji. Sześciany te będą wyrzucane w kierunku patrzenia kamery, a będą one pojawiały się w krótkiej odległości przed nią. Użytkownik do dyspozycji 3 układy obiektów:

* **House of cards**



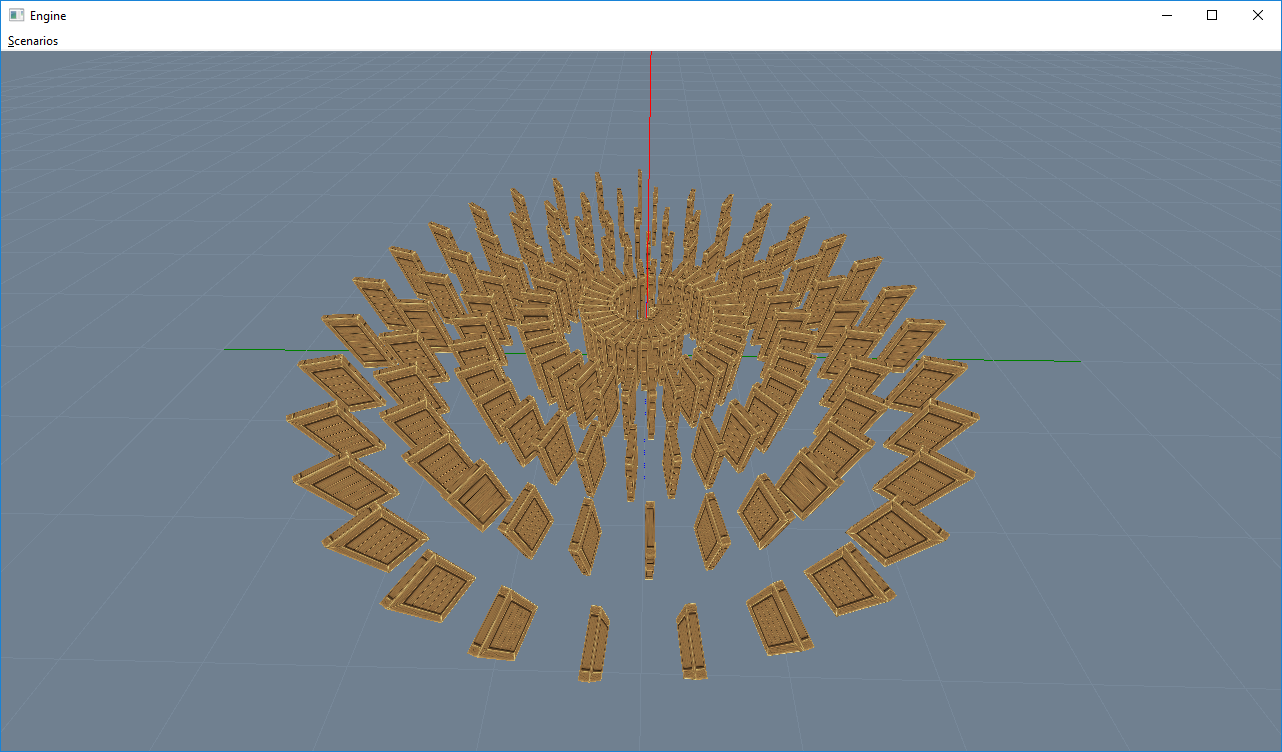
Rysunek Scenariusz symulacji House of cards

* **Towers**



Rysunek Scenariusz symulacji Towers

* **Domino**



Rysunek Scenariusz symulacji Domino

Scenariusze te będą dostępne poprzez rozwijane menu na pasku głównym okna aplikacji. Dodatkowo aplikacja będzie umożliwiała swobodne poruszanie się użytkownika po przestrzeni udostępnionej przez aplikację, umożliwiając tym samym zmianę kierunku oraz kąta wystrzeliwanego obiektu.

Aplikacja ta działać będzie w środowisku Windows, począwszy od wersji 10. W folderze głównym aplikacji wymagać będzie obecności plików tekstur, które zostaną dostarczone wraz z plikiem wykonywalnym.

* 1. Wybrane technologie
     1. DirectX

Główną technologią użytą w tym projekcie, będącą za razem częścią jego tematu, jest biblioteka DirectX.

DirectX jest stworzonym przez Microsoft zestawem relatywnie wysokopoziomowych API skonstruowanych z myślą o obsłudze multimediów takich, jak grafika 3D, dźwięk i inne. Został jednak ukierunkowany w stronę tworzenia gier wideo oraz symulacji. W całości zaimplementowano go w języku C++, budując wielopoziomową strukturę obiektową tworzącą abstrakcję nad używanymi sprzętowymi komponentami.

W skład pakietu wchodzą:

* **Direct3D (D3D)** – biblioteka obsługująca renderowanie obiektów 3D;
* **DXGI** – biblioteka udostępniająca interfejsy programistyczne, tworzące logiczną warstwę pomiędzy sprzętem potrzebnym do wyświetlania grafiki a programistą. Udostępnia ona interfejsy dla monitorów (ekranów wyświetlania), kart graficznych, oraz umożliwia samodzielne zarządzania buforami klatek;
* **Direct2D** – biblioteka obsługująca renderowanie obiektów 2D;
* **DirectWrite** – biblioteka obsługująca renderowanie czcionek;
* **DirectCompute** – biblioteka umożliwiająca prowadzenie zrównoleglonych obliczeń na karcie graficznej;
* **DirectSound3D (DS3D)** – biblioteka umożliwiająca odtwarzanie dźwięku oraz jego manipulację;
* **DirectX Media** – jest to zestaw bibliotek skupiający następujące narzędzia:
  + **DirectAnimation –** do tworzenia animacji 2D/3D w środowisku webowym;
  + **DirectShow** – do odtwarzania multimediów oraz ich strumieniowania;
  + **DirectX Transform –** do obsługi, edycji oraz animacji obrazów;
* **DirectX Diagnostics (DxDiag)** – diagnostyczne narzędzie dla systemu Windows, pozwalające na tworzenie raportów na temat obecnych w systemie komponentów DirectX, takich jak urządzenia audio, wideo oraz urządzenia wejścia, takie jak kontrolery gier;
* **DirectX Media Objects** – jest to biblioteka podobna do przestarzałej już DirectShow. Służy do strumieniowego przesyłania i przetwarzania danych z wejścia do wyjścia. Zwykle są to interfejsy kodeków służące do przetwarzania danych multimedialnych;
* **DirectSetup** – narzędzie stworzone do instalacji komponentów DirectX oraz wykrywania ich wersji;
* **XACT3** – stworzona z myślą o platformie XBOX wysokopoziomowa biblioteka do wieloplatformowej, w obrębie firmy Microsoft, obsługi dźwięku;
* **XAudio2** – biblioteka do obsługi dźwięku podobna do XACT3, jednak z tą różnicą, że udostępniony tu interfejs jest znacznie niżej poziomowy.

Z wielu funkcjonalności pakietu w tym projekcie został użyty Direct3D w wersji 11. Biblioteka ta zawiera w sobie zdefiniowane nagłówki do biblioteki DirectXMath, która to jest jednym z ważniejszych jej modułów.

DirectXMath jest główną i polecaną przez twórców poradników oraz dokumentacji Microsoftu biblioteką do ułatwienia obliczeń. Jest to o tyle pożyteczna biblioteka, że jej typy zostały zaprojektowane pod kątem obsługi ich przez urządzenia wpierające SIMD. Oczywiście, jest to tylko dodatek, o którym zdecyduje środowisko kompilacji, całość natomiast jest kompatybilna z najbardziej podstawowym zestawem operacji w obrębie języka C++.

Udostępnia ona API do operacji na wektorach różnej długości (od 2 do 4), macierzy (3x3 oraz 4x4) oraz operacji rachunku macierzowego, takich jak mnożenie, odwracanie, transpozycja i inne. Dodatkowo jest dostosowana do obsługi operacji najczęściej używanych i potrzebnych w tworzeniu aplikacji 3D, np. rotacje wektorów, transformacje wektorów na podstawie kwaternionów czy też różnych macierzy (macierze obrotów, skalowania, translacji), łączenia tych macierzy w macierze transformacji, tworzenie macierzy widoków, perspektyw i wiele, wiele innych przydatnych funkcjonalności, które długo by wymieniać.

Jest to technologia na tyle rozwinięta i popularna, że jest wykorzystywana niemal w każdym rozwiązaniu dla technologii gier wideo. DirectX implementują wcześniej już wspomniane Unity oraz Unreal Engine oraz każdy silnik chcący posiadać możliwość uruchomienia swojej aplikacji na systemie Windows czy XBOX z najbardziej optymalnym wsparciem sprzętowym.

* + 1. Bullet Physics

Bullet Physics jest to biblioteka przeznaczona do wykrywania kolizji, symulowania dynamiki brył sztywnych oraz ciał deformowalnych (miękkich), takich jak np. tkaniny czy sprężyny. Struktura tej aplikacji została stworzona w języku C++, wykorzystując w pełni model obiektowy, jednak jej niższe warstwy napisane są w języku C, celem zwiększenia wydajności przetwarzania danych.

Główne zalety tego silnika to:

* wykrywanie kolizji brył sztywnych oraz ciał deformowalnych w trybie ciągłym lub dyskretnym;
* pełne wsparcie dla obiektów deformowalnych, takich jak tkanina czy sprężyna;
* udostępnione zestawy określonych „kształtów kolizji”, czyli obiektów geometrycznych, na podstawie których wyznaczane są kolizje oraz według których obliczane są reakcje na te kolizje. W skład tych kształtów wchodzą:
  + - sfera;
    - prostopadłościan;
    - walec;
    - Stożek
    - otoczka wypukła, wykorzystująca algorytm Gilberta-Johnsona-Keerthiego;
    - otoczka niewypukła;
    - siatka trójkątów;
  + opcjonalna możliwość wykorzystania technologii CUDA oraz OpenCL celem zmniejszenia czasu obliczeń kroków symulacji.

Dodatkowym atutem dla potencjalnego użytkownika tej biblioteki może być dosyć obszerne forum projektu, na którym dyskutowane są problemy programistów podczas użytkowania tej biblioteki, gdzie często wypowiadają się jej kontrybutorzy. Znacząco ułatwia to użytkowanie podczas realnego tworzenia aplikacji, ponieważ ze względu na złożoność rozwiązania nie można poznać go dogłębnie z każdej strony w stosunkowo krótkim czasie.

Rozwiązanie to jest bardzo docenione w środowisku, o czym świadczy fakt, że jest ono zintegrowane w takich programach, jak Blender, Houdini, SoftImage czy Cinema 4D. Dodatkowo można wspomnieć, że jako rozwiązanie działające w czasie rzeczywistym również sprawdza się doskonale, o czym świadczy fakt, że zostało ono użyte w takich produkcjach, jak „Grand Theft Auto V”, „DIRT” oraz „Red Dead Redemption”.

* + 1. DirectXTK

DirectXTK, czyli DirectX Tool Kit, jest to biblioteka, a właściwie zestaw klas i struktur pomocniczych, ułatwiających implementację najczęściej budowanych szablonów i konstrukcji aplikacji używających DirectX, a jest to np. tworzenie macierzy widoków, perspektyw, zarządzanie pamięcią buforów wierzchołków oraz predefiniowane typy wierzchołków wejściowych dla shaderów.

Projekt ten powstał pod egidą firmy Microsoft i jest on oficjalnie wspierany przez pracowników tej firmy. Jest stale rozwijany, co potwierdzają daty udostępnień nowych kawałków kodu na oficjalnym repozytorium. Wersja, która została użyta w tym projekcie, odnosi się do wersji 11 DirectX, jednak teraz skupiono się na rozwoju wersji dla najnowszej wersji biblioteki Microsoftu i to ona jest głównym przedmiotem zainteresowania kontrybutorów.

Jednak o jakich klasach pomocniczych mowa? DirectXTK dostarcza np. klasy predefiniowanych efektów, np. mgły. Proces implementacji takiego efektu sprowadziłby się normalnie do żmudnej implementacji skomplikowanego shadera, opartego na nietrywialnym zapewne modelu matematycznym, powodując tym samym niedostępność dla przeciętnego twórcy aplikacji (np. na Universal Windows Platform, czyli użytkową aplikację Windows 10, do której również można użyć DirectX). W przypadku tego frameworku sprowadzi się to do inicjalizacji klasy i użycie jednej z jej metod na początku potoku renderowania, czy też w jego trakcie, w zależności od zastosowania. Prowadzi to bezpośrednio do znacznego zwiększenia wydajności pracy i efektowności jej wyników, w niewymagających dużej wiedzy o grafice komputerowej w aplikacjach użytkowych.

* 1. Struktura aplikacji
     1. Architektura

Aplikacja została napisana w języku C++ z zastosowaniem paradygmatu programowania obiektowego. Było to niejako wymuszone przez użyte narzędzia, ponieważ DirectX został napisany całkowicie obiektowo, a sam Microsoft poleca takie praktyki. Robi to w sposób dosłowny, gdy czytamy o tym w pierwszym artykule dotyczącym DirectXa oraz realizując wszystkie przykłady w tym właśnie stylu. Bullet Engine w używanej w tym projekcie wersji również posiada całkowicie obiektową strukturę kodu.

Klasy używanych przeze mnie bibliotek są deklarowane jako inteligentne wskaźniki. Było to zaleceniem, ze względu na szczególny nacisk na wydajność wszystkich użytych przeze mnie rozwiązań, z jednoczesnym uwzględnieniem łatwości w zarządzaniu kodem oraz pamięcią. W przypadku klas Microsoftu użyta została klasa ComPtr, która ma być inteligentnym wskaźnikiem na typ IUnknown, który jest klasą bazową wszystkich klas biblioteki DirectX. W przypadku Bullet Engine, użycie shared\_ptr lub ComPtr, skutowało tym, że klasy zarządzając samymi sobą kolidowały z klasami wskaźników, co wymusiło użycie ich jako zwykłych wskaźników znanych z C++.

Prawie każda klasa ma swój plik nagłówkowy oraz plik implementacji. Jest to model zalecany, dlatego też został użyty w tym projekcie. Jedynie klasa DXDebugDraw, która jest realizacją interface’u silnika Bullet do rysowania obiektów w celach debugowania działania programu, cała znajduje się w pliku nagłówkowym. Dzieje się tak ze względu na jej prostotę oraz fakt, że zaimplementowana została tylko 1 metoda, która była wymagana. Dodatkowo, bez plików implementacji zrealizowane zostały funkcje przestrzeni nazw Debug, ze względu na deklarację inline, oraz makra z pliku Math.h.

Klasa Simulation, jako największa, została rozbita na wiele plików implementacji ze względu na łatwiejsze zarządzanie kodem programu. Wyodrębnione zostały funkcje obsługi myszy, klawiatury, funkcja renderowania, inicjalizacji oraz rekonfiguracji widoku kamery oraz okna.

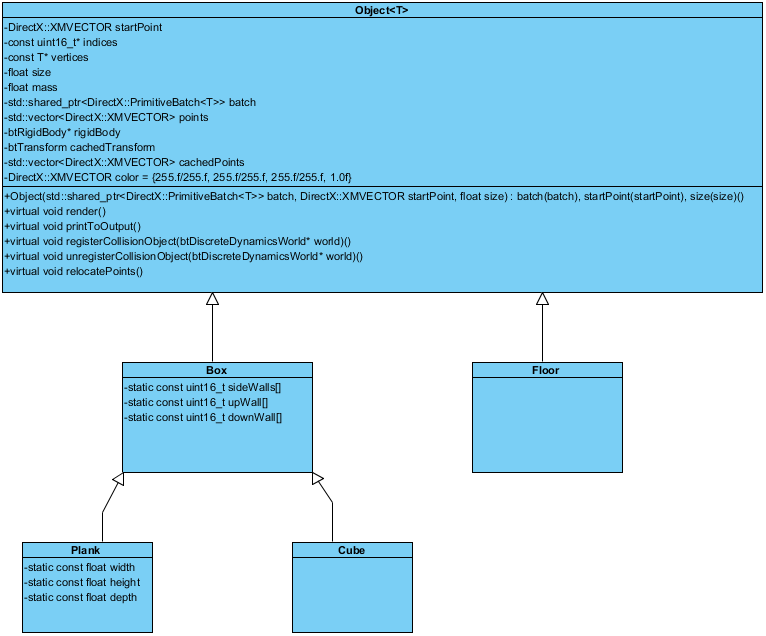
Poszczególne klasy opisane zostaną poniżej.

* + 1. Klasa Simulation

Główną klasą, na którą należałoby spojrzeć, analizując działanie tej aplikacji, jest klasa Simulation. Jest to klasa, której metoda initialize inicjuje powstanie całego potoku renderowania DirectX oraz obiektów silnika fizycznego, przeprowadzając dodatkowo jego konfigurację. Interesującą z punktu widzenia użytkownika metodą tej klasy jest jeszcze metoda initScenario, która poprzez umieszczoną wewnątrz funkcję definiuje, jakie obiekty mają się pojawić w środowisku symulacji.

* + 1. Klasa Object

Klasa Object jest to klasa bazowa dla klas mających być wyrenderowanymi oraz posiadających fizykę. Drzewo obiektów zaprezentowano na Rysunek 9.



Rysunek Drzewo dziedziczenia klasy Object<T>

Jak widać na powyższym diagramie, rdzeniem jest klasa Object, która, jako klasa szablonowa, definiuje, jaki typ wierzchołka otrzyma dany obiekt, a może to być np. DirectX::VertexPositionColor reprezentujący informację na temat położenia oraz koloru wierzchołka lub DirectX::VertexPositionColorTexture reprezentujący informację na temat pozycji, koloru oraz współrzędnej tekstury, która do wierzchołka jest przypisana. Klasie Box typ definiuje makro TEXTURED\_VERTEX\_TYPE.

* + 1. Przestrzeń nazw Scenario

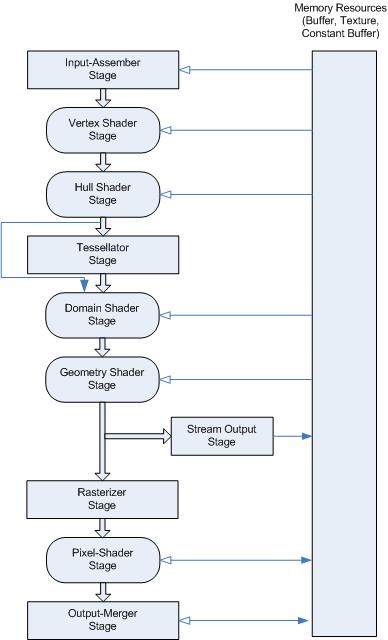
Plik Scenario.h definiuje przestrzeń nazw Scenario, która to jest zbiorem 3 funkcji, odpowiadających za wygenerowanie odpowiedniej scenerii dla użytkownika do testów aplikacji. Funkcje te to:

* boxTowers – generuje scenę wież z pudełek;
* plankDomino – generuje scenę z domino;
* houseOfCards – generuje scenę domku z klocków.

Pominę ich opis, ponieważ ten został już napisany podczas definiowania założeń.

* 1. Opis działania
     1. Potok renderowania

Potok renderowania w DirectX to zbiór stanów/procesów, przez ciąg których przechodzą dane wygenerowane przez użytkownika, a które mają być przekształcone na 2-wymiarową tablicę pikseli, reprezentującą pojedynczą klatkę [11]. Składa się on z 10 stanów, pokazanych na Rysunku 10.



Rysunek Potok renderowanie DirectX

Poziome strzałki symbolizują dostęp do pamięci urządzenia.

Każdy stan ma swoją określoną funkcję, a mianowicie:

* Input Assembler Stage – stan potoku, w którym definiowane są dane wejściowe do potoku;
* Vertex Shader Stage – stan potoku, w którym operuje się na wierzchołkach zdefiniowanych w poprzednim stanie potoku. Podczas trwania tego procesu dokonuje się np. transformacji lub morphingu;
* Hull Shader Stage – stan odpowiedzialny za przekształcenie przekazanych doń wierzołków w obiekty wyższego rzędu, tak zwane łaty;
* Tessalation Stage – stan potoku odpowiedzialny za przeprowadzenie tesalacji, czyli podzielenie posiadanych wielokątów na mniejsze, przez co wyświetlany obiekt może być wyświetlany jako bardziej szczegółowy;
* Domain Shader Stage – przekształca dostarczone łaty z poprzednich stanów na obiekty pierwotne, takie jak linia czy trójkąt;
* Geometry Shader Stage – stan potoku odpowiedzialny za przekształcenia wierzchołków, jednak różniący się od stanu „Vertex Shader Stage” tym, że może on operować na całych prymitywach takich jak linie, trójkąty etc.;
* Stream Output Stage – stan potoku pozwalający zapisać dane przetworzone przez poprzednie stany do pamięci urządzenia;
* Rasterizer Stage – stan potoku odpowiedzialny za przekształcenie dotychczas wyliczonych danych na obraz 2D;
* Pixel Shader Stage – stan potoku odpowiedzialny za przekształcenia danych o pixelach w celu np. wyliczania oświetlenia lub aplikacji różnych postprocesów;
* Output Merger Stage – stan potoku odpowiedzialny za ostateczną decyzję co ma zostać wyświetlone, które piksele są widoczne (na podstawie testu głębokości), oraz dokonuje mieszania kolorów ostatecznych pikseli.

Warto wspomnieć, że nie wszystkie te stany muszą być zaimplementowane, np. proces

tesalacji jest całkowicie opcjonalny.

Całość procesu przebiega w klasie Simulation. Przy wywołaniu metody initialize, zaraz po utworzeniu się obiektu okna aplikacji, zostanie wywołana metoda createDevice. Metoda ta jest odpowiedzialna za stworzenie obiektów definiującego abstrakcję nad kartą graficzną. Przy użyciu funkcji D3D11CreateDevice z pliku nagłówkowego d3d11.h, wypełniamy zawartość obiektów ComPtr wcześniej zadeklarowanych w pliku nagłówkowym. Odbywa się to w następujący sposób:

Listing Tworzenie urządzenia karty graficznej

HRESULT hr = D3D11CreateDevice(

nullptr,

D3D\_DRIVER\_TYPE::D3D\_DRIVER\_TYPE\_HARDWARE,

nullptr,

creationFlags,

featureLevels,

\_countof(featureLevels),

D3D11\_SDK\_VERSION,

device.ReleaseAndGetAddressOf(),

&dxFeatureLevel,

deviceContext.ReleaseAndGetAddressOf()

);

if (hr == E\_INVALIDARG) {

hr = D3D11CreateDevice(

nullptr,

D3D\_DRIVER\_TYPE\_HARDWARE,

nullptr,

creationFlags,

&featureLevels[1],

\_countof(featureLevels) - 1,

D3D11\_SDK\_VERSION,

device.ReleaseAndGetAddressOf(),

&dxFeatureLevel,

deviceContext.ReleaseAndGetAddressOf()

);

}

Widzimy, jak w pierwszym wywołaniu metody próbujemy uzyskać od systemu obiekt, dzięki któremu możemy sterować urządzeniem sprzętowym. Funkcje te nie różnią się tylko jednym parametrem, a mianowicie wskaźnikiem na featureLevels, który to jest tablicą stałych liczbowych reprezentujących wersję obsługiwanej biblioteki DirectX. Blok ten próbuje pobrać od systemu urządzenie kompatybilne z DirectX11, w przypadku niepowodzenia, pobiera urządzenie obsługujące poziom niżej. Jeżeli wówczas mu się nie uda, aplikacja zostanie zakończona z błędem. Tworzą się dwa bardzo istotne obiekty, a mianowicie obiekt device (ID3D11Device), będący abstrakcją nad urządzeniem graficznym, który np. odpowiedzialny jest za tworzenie zasobów oraz deviceContext (ID3D11DeviceContext), będący obiektem służącym do generowania komend renderowania.

Następnie w tejże funkcji tworzone są tekstury. Tekstury w pojęciu grafiki komputerowej rozumiemy jako obraz, bitmapę, która zostaje zmapowana na obiekt trójwymiarowy. W DirectX jednak teksturę rozumie się jako zasób, nie muszący być przy tym w żaden sposób powiązany z obrazem. Wyróżniamy 3 typy tekstur: 1-, 2- oraz 3-wymiarowe. Można je sobie wyobrazić jako n-wymiarowe tablice znane chociażby z C++. Pojedyncza komórka tekstury nazwana została tekselem, czyli najmniejszym zdefiniowanym typem zdolnym do bycia weń zapisanym i odczytanym. Teksturę można utworzyć również bez typu, lecz wiąże się to z komplikacjami na dalszych etapach tworzenia potoku. W przypadku tej funkcji tworzą się tekstury w rozumieniu grafiki komputerowej, czyli wczytany zostaje plik z obrazem reprezentującym ścianę boczną drewnianej skrzynki.

Kolejną ważną operacją, którą wykonuje się po wczytaniu tekstur, jest tworzenie shaderów. Shader jest to program, którego skompilowany kod jest wykonywany przez kartę graficzną. Do jego tworzenia w środowisku DirectX służy język HLSL (High Level Shader Language), choć samych języków tworzenia shaderów jest znacznie więcej. Głównym konkurentem HLSL jest GLSL (OpenGL Shading Language), który jest zdefiniowany w standardzie OpenGL. Idea shadera została stworzona w celu wykorzystania potencjału współczesnych kart graficznych, które zdolne są do szybkiego przetwarzania bardzo wielu instrukcji równolegle i jest aktualnie standardem podczas tworzenia aplikacji wykorzystujących grafikę komputerową.

Język ten został wyposażony w zarówno podstawowe typy liczbowe, jak i najczęściej wykorzystywane w grafice wektory tych typów np. float3, float4, które są wektorami długości n liczby zmiennoprzecinkowej standardu IEEE-754 od długości 32-bitów oraz np. macierze. Żeby ułatwić pisanie przejrzystego kodu, projektanci języka, oprócz funkcji obliczających np. iloczyn skalarny wektorów, zdefiniowali operatory, które w intuicyjny sposób potrafią uprościć strukturę kodu, np. operator „\*” będzie odpowiadał właśnie temu iloczynowi. Bardzo bogata biblioteka standardowa języka zawiera dodatkowo wiele przydatnych funkcji, takich jak odwracanie lub transpozycja macierzy czy iloczyn wektorowy, co czyni ten język wygodnym podczas wykonywania różnych operacji. Główną zaletą jednak jest fakt, że kod ten będzie wykonany ze wsparciem wydajności GPU.

W przypadku tej aplikacji shadery tworzone są przez DirectXTK, ponieważ ich samodzielna realizacja wiąże się z samodzielnym zarządzaniem pamięcią oraz implementowaniem efektów o nietrywialnym modelu matematycznym.

Pierwszy z utworzonych shaderów odpowiedzialny jest za renderowania obiektów mających dane tylko o ich pozycji i kolorach przypisanych do jego wierzchołków, drugi zaś obiektów mających dane o pozycji i kolorach wierzchołków oraz współrzędnych mapowanych nań tekstury. By teksturowanie z udziałem shaderów mogło zadziałać, potrzebny jest tzw. Sampler. Tworzy się go poprzez zdefiniowanie stanu potoku, który to jest jednym z elementów stanu „Pixel Shader Stage”, a jest odpowiedzialny za enkapsulację informacji na temat próbkowania tekstury.

Po funkcji inicjalizacji następuje wywołanie metody createResources, również z klasy Simulation. W niej tworzone są widoki zasobów, czyli definicje dostępu do danych zasobów, takich jak np. cel renderowania (może to być bufor wyjściowy na kartę graficzną lub obszar pamięci, do którego zapiszemy dane, by np. zapisać je jako obraz na dysk). Funkcja ta jest każdorazowo wywoływana przy zmianie wielkości okna, ponieważ od niej bezpośrednio zależy np. rozmiar buforów testu głębokości czy buforów używanych podczas podwójnego lub potrójnego buforowania klatek.

W pierwszym etapie wykonania tej funkcji sprawdzane jest, czy wybrany aktualnie poziom multisamplingu jest przez wspierany przez kartę graficzną. Klasa Simulation definiuje tablicę możliwych poziomów multisamplingu, ale możliwe jest, że nie każda karta obsłuży je wszystkie. Następnie tworzony jest tzw. SwapChain, czyli obiekt odpowiadający za zarządzanie buforami klatek. Jego konfiguracja odbywa się poprzez wypełnienie struktury DXGI\_SWAP\_CHAIN\_DESC z odpowiednim sufiksem w zależności od definiowanego łańcucha (np. dla IDXGISwapChain1 wykorzystamy DXGI\_SWAP\_CHAIN\_DESC1). Następnie tworzony jest tzw. bufor tylni (back buffer), czyli bufor aktualnie generowanej klatki oraz do niego tworzony jest widok (Render Target View) poprzez wywołanie metody z obiektu device, który stanowi interfejs urządzenia.

Jako że będziemy potrzebowali skorzystać z testu głębokości (depth-stencil test), musimy utworzyć wymagane do tego procesu zasoby. W przypadku DirectX zasób ten to także widok (Depth Stenicl View), który również tworzony jest poprzez obiekt interfejsu urządzenia. Dodatkowo tworzony jest proces testu głębokości, którego konfiguracja odbywa się poprzez stworzenie obiektu klasy D3D11\_DEPTH\_STENCIL\_DESC.

Następnie definiuje się stan rasteryzacji (Rasterizer Stage), którego właściwości konfiguruje się poprzez utworzenie instancji klasy CD3D11\_RASTERIZER\_DESC, która to jest klasą pomocniczą zdefiniowaną w nagłówku d3d11.h, a następnie przekazanie jej do metody CreateRasterizerState, zdefiniowanej w interfejsie dostępu urządzenia.

Należy wspomnieć, że istnieje możliwość włączenia warstwy debugowania na karcie graficznej. Warstwa ta została stworzona, ponieważ bardzo trudnym zadaniem jest stworzenie programu pozwalającego na podglądanie w czasie rzeczywistym zasobów karty oraz ze względu na fakt, iż na karcie wykonywanych jest wiele procesów równoległych, niemożliwym wręcz byłoby śledzenie wykonania kolejnych wydawanych karcie graficznej komend. Warstwa debugowania pozwala jednak aplikacji na sprawdzanie podanych parametrów w czasie wykonania kodu, zanim ten zostanie wykonany przez kartę graficzną, co znaczenie ułatwia pisanie aplikacji. Jest ona domyślnie wyłączona ze względu na wydajność.

* + 1. Tworzenie obiektów świata

Obiekty świata, tj. obiekty będące obiektami podatnymi na interakcje (obiekty fizyczne), tworzą się poprzez konstruktory poszczególnych z nich. Jednak ich obecność musi zostać odnotowana w silniku Bullet, dlatego każdy z nich posiada metodę registerCollisionObject oraz unregisterCollisionObject. Metoda pierwsza musi zostać wywołana, gdy chcemy uczynić nasz obiekt fizycznym. W przeciwnym razie będzie on statycznym obiektem widocznym na ekranie. Statycznym obiekt można uczynić wyrejestrowując go metodą wymienioną jako drugą.

Jeżeli chcemy, by obiekt został wyrenderowany, musimy go dodać do odpowiednich wektorów. W klasie Simulation zdefiniowane są 2 wektory obiektów w zależności od typów ich wierzchołków:

* std::vector<std::shared\_ptr<Object<DirectX::VertexPositionColor>>> coloredShapes
* std::vector<std::shared\_ptr<Object<TEXTURED\_VERTEX\_TYPE>>> texturedShapes

Wektory te są przeiterowywane w każdej iteracji pętli symulacji w celu ich wyrenderowania na ekranie.

* 1. Opis użytkowania programu
     1. Sterowanie kamerą

Poruszanie się po przestrzeni symulacji umożliwiono przez operacje wykonywane przy pomocy klawiatury. Po naciśnięciu klawisza:

* **W** – kamera poruszać się będzie w kierunku, w którym spogląda kamera;
* **S** – kamera poruszać się będzie w kierunku przeciwnym do kierunku spoglądania kamery;
* **A** –kamera poruszać się będzie na lewo od kierunku spoglądania kamery;
* **D** –kamera poruszać się będzie na prawo od kierunku spoglądania kamery.

Poruszanie się w tych kierunkach będzie się odbywać równolegle do płaszczyzny wyznaczającej podłoże dla znajdujących się na niej obiektów. Aplikacja umożliwia również poruszanie się w dół i w górę, tym razem prostopadle do podłoża. Po naciśnięciu klawisza:

* **Q** – kamera poruszać się będzie do góry;
* **E** – kamera poruszać się będzie w dół.

Za pomocą myszy możliwe jest rozglądanie się wokół punktu, który wyznacza położenie kamery. Przesuwając myszkę odpowiednio:

* w prawo, przekraczając granicę 80% szerokości okna, kamera obróci się w prawo;
* w lewo, przekraczając granicę 20% szerokości okna, kamera obróci się w lewo;
* w dół, przekraczając granicę 80% wysokości okna, kamera obróci się w dół;
* w górę, przekraczając granicę 20% wysokości okna, kamera obróci się w górę.

Analogicznie, przesuwając kursor myszy w prawy górny róg ekranu, kamera obróci się jednocześnie w prawo i w górę.

Wystrzeliwanie obiektów odbywa się poprzez kliknięcie lewego klawisza myszy. Aby obiekt od razu po kliknięciu zaczął się poruszać, należy mieć odblokowany tryb symulacji fizyki, który jest domyślnie wyłączony, a uruchamia się go i blokuje za pomocą klawisza **Z**. Dodatkowo, by umożliwić użytkownikowi minimalne polepszenie jakości obrazu, może on kontrolować poziom multisamplingu wykonywanego przez kartę graficzną. Poziom ten podnosi się za pomocą klawisza **P** i jest on podnoszony kolejno po obsługiwanych trybach, nie pozwalając na dalsze jego podnoszenie. Analogicznie klawisz **O** poziom ten zmniejsza.

Wybór stosownego scenariusza odbywa się poprzez wybranie go z rozwijanego menu „Scenarios” w lewym górnym rogu okna aplikacji.

1. Testy programu symulatora
   1. Plan testów

Testy tej aplikacji obejmowały badanie wydajności generowania pojedynczej klatki w zależności od ilości znajdującej się na scenie ilości obiektów. Jako że obiekty poruszają się i oddziałują na siebie, dojść może do sytuacji gdy przestaną mieć ze sobą kontakt, lub będzie on na tyle nieznaczny (obiekty będą na sobie leżeć w bezruchu), że w pewnym momencie obliczenia związane z symulacją fizyki zostaną przerwane przez wzgląd na wydajność. Z tego powodu pobrany zostanie największy czas, jaki został odnotowany.

Scenariusz pomiaru przedstawiał pudełka ułożone w sześcian. Sześcian ten będzie położony na wysokości połowy długości boku pojedynczego pudełka nad płaszczyzną ZY.

Pomiar został wykonany 10-krotnie dla sześcianów o długości boku „**n**” kolejno 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10. Wyniki każdego pomiaru zostaną uśrednione.

* 1. Wyniki

Tabela Czasy pomiaru wydajności generowania pojedynczej klatki, w zależności od ilości obiektów na scenie

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
|  | 0,018 | 0,019 | 0,141 | 0,296 | 0,637 | 0,962 | 1,825 | 1,959 | 3,226 |
| 0,025 | 0,018 | 0,149 | 0,294 | 0,628 | 1,016 | 1,43 | 2,193 | 2,935 |
| 0,018 | 0,018 | 0,14 | 0,312 | 0,632 | 0,978 | 1,605 | 2,183 | 2,933 |
| 0,018 | 0,019 | 0,137 | 0,3 | 0,706 | 0,985 | 1,657 | 2,057 | 2,915 |
| 0,018 | 0,02 | 0,14 | 0,322 | 0,579 | 0,947 | 1,541 | 2,336 | 3,222 |
| 0,018 | 0,024 | 0,159 | 0,32 | 0,596 | 1,17 | 1,428 | 2,134 | 3,096 |
| 0,018 | 0,029 | 0,154 | 0,337 | 0,627 | 0,963 | 1,59 | 2,11 | 3,057 |
| 0,024 | 0,03 | 0,138 | 0,296 | 0,659 | 0,933 | 1,429 | 2,201 | 3,415 |
| 0,032 | 0,019 | 0,137 | 0,335 | 0,596 | 0,936 | 1,401 | 2,126 | 3,449 |
| 0,018 | 0,018 | 0,144 | 0,29 | 0,583 | 0,977 | 1,439 | 2,142 | 2,995 |
|  | **0,021** | **0,021** | **0,144** | **0,310** | **0,624** | **0,987** | **1,535** | **2,144** | **3,124** |

Tabela przedstawia wyniki pomiarów przeprowadzonych w czasie trwania testu. Pierwszy wiersz pokazuje, dla jakiej wysokości sześcianu zrealizowano pomiary. Następne 10 wierszy, pokazują jaki był największy odnotowany czas podczas każdego z 10 pomiarów. Wiersz ostatni prezentuje uśredniony czas obliczony z 10 czasów, znajdujących się nad nim.

Rysunek Wykres zależności czasu generowania pojedynczej klatki w zależności od ilości obiektów na scenie

Na wykresie zaprezentowane wyniki pomiarów, już nie od wysokości sześcianu, a w zależności od wyliczonej ilości obiektów, dla których pomiar został wykonany. Oprócz linii łączącej punkty zaobserwować można linię trendu, która uwydatnia liniową tendencję wzrostu czasu.

* 1. Wnioski

Wyniki pomiarów pozwalają na wyciągnięcie wniosku, że czas generowania klatki przyrasta liniowo. Jednak należy podkreślić różnicę pomiędzy czasem obliczeń oddziaływań obiektów oraz samego jego renderingu. Obliczenia prowadzone przez Bullet Engine, to choć dostosowane pod SIMD obliczenia, przeprowadzane są na CPU. Sam rendering jednak, jest już przeprowadzany na karcie graficznej, która sprzętowo dostosowana jest do obliczeń związanych z grafiką komputerową. Powoduje to, że obliczenia związane z fizyką znacznie spowalniają czas generowania pojedyńczej klatki, gdyż sam rendering pochłaniał jego marginalą część. Pozostawia to duże pole do optymalizacji, zarówno pod kątem algorytmicznym, jak i optymalizacji kodu. Uzasadniona może być również próba implemetacji tych algorytmów na GPU, co choć jest zadaniem trudnym, może znacznie poprawić wydajność.

1. Literatura

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | „Unity - Multiplatform,” Unity Technologies, [Online]. Available: https://unity3d.com/unity/multiplatform. [Data uzyskania dostępu: 27 11 2016]. |
| [2] | „Torment - Tides of numenera | Game Engine,” [Online]. Available: http://www.ign.com/articles/2013/03/04/the-strange-new-world-of-torment-tides-of-numenera. [Data uzyskania dostępu: 27 11 2016]. |
| [3] | „Pillars of Eternity | Unity madewith,” Unity Technologies, [Online]. Available: https://madewith.unity.com/games/pillars-of-eternity. [Data uzyskania dostępu: 11 27 2016]. |
| [4] | „Arkham Knight on Unreal Engine,” [Online]. Available: http://www.polygon.com/2014/3/27/5551328/batman-arkham-knight-preview-batmobile. [Data uzyskania dostępu: 27 11 2016]. |
| [5] | „Polygon | Hatred and Epic Games,” [Online]. Available: http://www.polygon.com/2014/10/16/6989459/hatred-epic-games-unreal-engine. [Data uzyskania dostępu: 27 11 2016]. |
| [6] | „Big Buck Bunny - About,” [Online]. Available: https://peach.blender.org/about/. [Data uzyskania dostępu: 27 11 2016]. |
| [7] | „Sean Kennedy - Blender in Hollywood,” [Online]. Available: http://blenderdiplom.com/en/interviews/548-interview-sean-kennedy-on-blender-in-hollywood.html. [Data uzyskania dostępu: 27 11 2016]. |
| [8] | „How They Built the Beastly Machines for Mad Max: Fury Road,” [Online]. Available: https://www.wheretowatch.com/2015/05/heres-how-they-built-the-beastly-machines-for-mad-max-fury-road/. [Data uzyskania dostępu: 27 11 2016]. |
| [9] | „3DSMax - The Curious Case of Benjamin Button,” [Online]. Available: http://news.autodesk.com/press-release/oscar-winner-best-visual-effects-curious-case-benjamin-button-shaped-autodesk-technolo. [Data uzyskania dostępu: 27 11 2016]. |
| [10] | „Films using 3DSMax,” [Online]. Available: https://area.autodesk.com/blogs/ken/3ds\_max\_in\_film\_vfx\_shots. [Data uzyskania dostępu: 27 11 2016]. |
| [11] | F. D. Luna, Introduction to 3D Game Programming with DirectX 11, Gliwice: HELION, 2014. |