FELADATKIÍRÁS

A feladatkiírást a **tanszék saját előírása szerint** vagy a tanszéki adminisztrációban lehet átvenni, és a tanszéki pecséttel ellátott, a tanszékvezető által aláírt lapot kell belefűzni a leadott munkába, vagy a tanszékvezető által elektronikusan jóváhagyott feladatkiírást kell a Diplomaterv Portálról letölteni és a leadott munkába belefűzni (ezen oldal HELYETT, ez az oldal csak útmutatás). Az elektronikusan feltöltött dolgozatban már nem kell megismételni a feladatkiírást.

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem
Villamosmérnöki és Informatikai Kar
Irányítástechnika és Informatika Tanszék

Rittgasszer Ákos

OPENGL GRAFIKUS KÖNYVTÁRRA ÉPÜLŐ JÁTÉKMOTOR FEJLESZTÉSE

KONZULENS

Dr. Tóth Balázs György

BUDAPEST, 2021

Tartalomjegyzék

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott **Rittgasszer Ákos**, szigorló hallgató kijelentem, hogy ezt a szakdolgozatot meg nem engedett segítség nélkül, saját magam készítettem, csak a megadott forrásokat (szakirodalom, eszközök stb.) használtam fel. Minden olyan részt, melyet szó szerint, vagy azonos értelemben, de átfogalmazva más forrásból átvettem, egyértelműen, a forrás megadásával megjelöltem.

Hozzájárulok, hogy a jelen munkám alapadatait (szerző(k), cím, angol és magyar nyelvű tartalmi kivonat, készítés éve, konzulens(ek) neve) a BME VIK nyilvánosan hozzáférhető elektronikus formában, a munka teljes szövegét pedig az egyetem belső hálózatán keresztül (vagy hitelesített felhasználók számára) közzétegye. Kijelentem, hogy a benyújtott munka és annak elektronikus verziója megegyezik. Dékáni engedéllyel titkosított diplomatervek esetén a dolgozat szövege csak 3 év eltelte után válik hozzáférhetővé.

Kelt: Budapest, 2021. 11. 25.

...…….
Rittgasszer Ákos

Összefoglaló

A cél egy egyszerű játékmotor fejlesztése, ami labirintus játékok kezelésére és megjelenítés készült. Ezek mellett természetesen megvalósítja egy alapszintű motor funkcionalitását.

Funkcióinak alapját a modernkori motorok képességei adták. Felhasználási területe eléggé specifikus, így az ehhez szükséges funkciók megvalósítására lett fektetve nagy hangsúly. Ezek alapján a motor elsősorban 2D játokok készítéséhez szükséges eszközkészlettel rendelkezik.

A motor fejlesztésekor nagy hangsúly lett fektetve arra, hogy minél könnyebben tovább fejleszthető legyen a kód. Ennek eléréséhez nagy segítéséget adtak a tervezési minták, objektum orientált programozási elvek és clean code elvek.

A megvalósítás OpenGL felhasználásával történt C++ nyelven, úgy, hogy a grafikus rész minél egyszerűbben lecserélhető legyen más interface-re. A megejlenítés egyszerűsítéséhez külső könyvtárak is felhasználásra kerültek, amik a hatékonyságot segítik nagyban elő.

A motor képességeinek prezentálásához elkészült egy egyszerű játék, ami kizárólag ezt a motort felhasználva készült.

Abstract

The goal is to develop a simple game engine designed to manage labyrinth games and display them. In addition, of course, it implements the functionality of a basic engine.

Its functions were based on the capabilities of modern-day engines. Its field of application is quite specific, so the implementation of the necessary functions has been placed with great emphasis. Based on this, the engine primarily has a toolkit for making 2D games.

When developing the engine, great emphasis was placed on making it as easy as possible to develop the code. To achieve this, design patterns, object-oriented programming principles and clean code principles have been greatly helped.

It was implemented using OpenGL in C++ language, making it as easy as possible to replace the graphical part with another interface. External libraries have also been used to simplify the implementation, which greatly promote efficiency.

To demonstrate the capabilities of the engine, a simple game was created using only this engine.

1 Bevezetés

Napjaink játékainak alapjai nagyon hasonlítanak egymáshoz. Hasonló a grafikai, fizikai, vagy éppen hang motor, ami lehetővé teszi a programok magas szintű felhasználói élményét. A közös funkciók miatt használnak játékmotorokat, amik egy egységes interface-t biztosítanak a játékfejlesztéshez.

Ezek a motorok általánosságban három fő komponensből állnak. Ezek a komponensek, a grafikai megjelenítés, a fizikai szimuláció és az élethű hangképzés. Ezeken az általános részeken kívül készítenek sokkal specifikusabb programokat is amik például folyadékok szimulációjáért, vagy éppen az emberi haj vagy ruházat élethű megjelenítését végzik.

Az említett komponenseknek szorosan együtt kell tudniuk működni. Például két test találkozásakor a játékfizikának megfelelően változik a mozgásuk, amit a képernyőn történő megjelenítésnek le kell tudnia követni. Az ütközések járhatnak hanghatásokkal is, amik tulajdonságai függhetnek a tér fajtájától és méretétől, de a mozgó tárgyak kamerához viszonyított sebességétől is.

A modern játékmotorokkal úgy lehet új játékot létrehozni, hogy a grafikai megjelenítéshez, a fizikai motorhoz és a hang motorhoz hozzá se kell feltétlenül nyúlni, mert azok működése belül implementálva van. Ezen kívül lehetőség van ezeknek a moduloknak a parametrizálásához, aminek köszönhetően teljesen eltérő környezetben levő játékokhoz is lehet ugyanazt a motort használni. Például, ha szeretnénk egy egyszerű a Holdhoz hasonlatos környezetet létrehozni, akkor azt úgy tehetjük meg, hogy csökkentjük a testekre ható gravitációt és a légkör sűrűségét. Ezekhez a módosításokhoz automatikusan alkalmazkodik a hang és a mozgás grafikus megjelenítése. Lényegében az utóbbi két eszközzel érzékeltetjük az fizikában eszközölt változtatásokat.

Fontos, hogy ezek a motorok sokszor lehetőséget adnak előre elkészített modelleknek, textúráknak és mozgásoknak a felhasználására. Ezek segítségével akár úgy is létre lehet hozni egyszerűbb játékokat, hogy azok elkészítése semmilyen kódolást nem igényel.

Fontos még, hogy a motorok több platformot is támogassanak, ezzel megelőzve azt, hogy többször, különböző platformokra kelljen elvégezni a fejlesztést.

Egy játékmotor egyszerű működése úgy néz ki, hogy az adatszerkezet a felhsználó bemenetek, a világra jellemző fizika és a játéklogika alapján módosul, amit utána megjelenít a grafikus motor és a hang motor. Mindezt úgy kell megvalósítani, hogy elegendően gyors legyen ahhoz, hogy az ember számára élvezhető legyen. Ez a megjelenítés szempontjából azt jelenti, hogy legalább 30 képnek kell láthatóvá válnia másodpercenként, de inkább 60-nek. Ez a szám az úgy nevezett fps[1], ami minél nagyobb, annál kellemesebbnek látja az emberi szem.

Elmondható, hogy a motor nagyon fontos jellemzője a teljesítmény. Ennek a teljesítménynek a szűk keresztmetszete a grafikai megjelenítés. Ahhoz, hogy megfelelő sebesség tudjuk feldolgozni az adatokat számos eszközhöz lehet folyamodni. Az, hogy grafikus kártyákat használunk alapvető eszköz, ami nélkül nem is lehet játékmotort készíteni. A teljesítmény növeléséhez hatékony megoldás lehet a többszálúsítás. Ez azt jelenti, hogy az egymástól függetlenül végezhető műveleteket a processor különböző szálaival végeztetjük el. Bizonyos esetekben az is hatékony megoldás lehet, hogy nem grafikai megjelenítéseket is a grafikus kártyával végeztetünk el, mivel annak teljesítménye nagyságrendekkel nagyobb, mint a processor-é.

Az, hogy grafikus kártyákat szeretnénk programozni felveti azt a problémát, hogy számos különböző gyártó létezik, amik más architektúrájú kártyákat gyártanak, így szükség van egy egységes interface-re, amin keresztül tudjuk őket programozni. Ehhez számos eszköz létezik, de a legelterjedtebb talán az OpenGL és a DirectX. Ezek közül az OpenGL nagy előnye, hogy platformfüggetlen, míg a DirectX csak Windows rendszereken működik.

A játékmotorok még egy fontos jellemzője, hogy 2D vagy 3D játékok készítésére készültek elsősorban. A nagyobb motorok mindkettőt támogatják, de eltérő eszközkészletet biztosítanak az elkészítendő játék típusától függően.

A könnyebb munkához előnyös, ha a motor rendelkezik valamilyen grafikus felhasználói felülettel, amin keresztül egyszerűbben, akár programozási tudás nélkül is egészen bonyolult játékokat lehet elkészíteni.

[1] fps: frames per second – a másodpercenként megjelenített képek száma

A szakdolgozat keretében elkészítendő játékmotor elsődleges célja, hogy egy olyan eszköz legyen, amivel labirintusokat egyszerűen lehessen megjeleníteni és kezelni, amellett, hogy ellássa egy alapvető motor funkcióit is. Mindezt úgy megvalósítva, hogy minél könnyebben lehessen bővíteni és a több platformra való kiterjesztést is könnyen lehessen kivitelezni. Maga a játék Windows operációs rendszerre készül. Elsősorban 2D játékok elkészítésének a segítsége a célja, de egyszerűen tovább lehessen fejleszteni 3D megjelenítéshez szükséges funkciókkal.

Egy nagyobb projekt, aminek fontos tulajdonsága a könnyű továbbfejlesztés körültekintő tervezést igényel. Ezt tovább nehezíti a több külső fejlesztésű könyvtár, amiknek esetleges módosulása bármikor megtörténhet. Ezeket úgy célszerű beintegrálni a projektbe, hogy minél kevesebb függőség alakuljon ki, ezzel az esetleges módosításokat elősegítve.

Az előbb említett szempontok függvényében mindenképp elengedhetetlen az alapos tervezés, aminek következménye egy fenntartható kód. Ehhez nagy segítséget adnak az objektum orientált programozás tervezési elvei[1]. Ezek az elvek azért lettek kitalálva, hogy jól karbantartható kód keletkezzen, aminek a minősége kiváló és a fejlesztés során nem romlik. Illetve az esetleges módosítások egyszerű refraktorokon keresztül megvalósíthatóak legyenek. Ezen kívül a Clean Code elvek[2] figyelembevétele is segíti a fejlesztést. Ezek alkalmazásával nő a kód olvashatósága, ami könnyebbé teszi a továbbfejlesztést és a mások általi felhasználást.

A komplex rendszerek megvalósítása során általánosságban ugyanazok, vagy nagyon hasonló helyzetek és problémák jönnek elő. Ez kiemelten igaz a grafikus felhasználói felülettel rendelkező programok esetén. Ezek egyszerűbb és egységes megoldására találták ki az objektum orientált tervezési mintákat[3]. Ezek a minták olyan megoldást kínálnak, amik felhasználásával az előbbiekben említett elvek betartásával lehet megoldani a felmerült helyzetet. Használatuk további előnye, hogy széles körben el vannak terjedve, ezért más fejlesztők is könnyen megértik őket és szakszerűen tudják használni.

A motor fejlesztése során fontos a tesztelés. Mivel a program funkciójából adódóan nehéz egyszerűen, jó teszteket készíteni készítek egy demo játékot, ami reprezentálja a motor képességeit. A játék fejlesztése párhuzamosan folyik a motoréval, ezzel megpróbálva kiküszöbölni a tesztek hiányából adódó hibákat. A demo játék mind a motor általános, mind a labirintus specifikus funkciókat hivatott demonstrálni, úgy, hogy

közben egy felhasználási példát is nyújt. Ez segít másik fejlesztőknek a hatékony felhasználásban és kiegészíti a dokumentációt.

A megjelenített példakódok a C++ szemantikáját követik, de sokszor csupán a könnyebb érthetőség miatt vannak használva. Ez azt jelenti, hogy a kódok egy része le van egyszerűsítve (pl.: hiányzó függvény vagy változó deklarációk) és sokszor nem is fordulás készek.

2 Játékmotor funkcionalitása

Napjainkban számos különböző képességű és célú játékmotor létezik. Számos játékfejlesztő cég elkészíti a saját motorját, amit a saját játéka igényeire szab. Léteznek olyan, ami bizonyos feltételekkel bárki számára elérhetőek és fel lehet használni saját játék készítéséhez.

A két legelterjedtebb játékmotor, ami a feltételek betartásával bárki számára szabadon felhasználható a Unity[4] és az Unreal Engine[5]. Ennek a két motornak vizsgálatával lesz meghatározva a saját motor funkcionalitása. Mindkét említett motor fejlesztési nyelve a C++.

2.1 Unreal Engine

Az Unral Engine nagy hangsúlyt fektet a grafikai megjelenítésre. Lehetőség van vele minél élethűbb tereket megalkotni, amiket számos modellel lehet föltölteni. Rendelkezik modell editorral is, aminek köszönhetően egészen komplex modellek elkészítése is lehetséges a motoron belül.

Alapértelmezetten tudunk különböző típusú játékokat különböző platformra készíteni, amik egy alapkészletet nyújtanak, amiből ki lehet indulni. Ilyen játéktípus például az fps[2] játék vagy autós játék. Támogatott platformok a személyi számítógép, a mobiltelefon, különböző konzolok és VR[3] eszközök.

A motor rendelkezik egy vizuális script nevű lehetőséggel, amit Blueprint-nek neveznek. Ennek lényege, hogy egy grafikus felületen tudunk dobozok és élek segítségével scripteket készíteni, amik teljes mértékig helyettesíthetik a hagyományos program írását.

A motor kizárólag 3D játékok készítéséhez készült. 2D játékok készítése körülményes és nincsenek hozzá megfelelő eszközök.

[2] first person shooter – belső nézetű lövöldözős játék

[3] virtual reality – virtuális valóság

Rendelkezik egy komplex grafikus felülettel, aminek célja, hogy minél kényelemsebben, minél kevesebb kódolással el lehessen készíteni tetszőleges programot.

2.1.1 Funkciók

A motor számos beépített funkcióval és eszközzel rendelkezik, amik megkönnyítik a fejlesztés folyamatát:

- Előre elkészített mintaprogramok felhasználása kiindulásként
- Modellek importálása, készítése és szerkesztése
- Textúrák importálása, kezelése és szerkesztése
- Shaderek készítése és felhasználása
- Komplex grafikus felhasználói felület, ami szinkronban van a mögötte levő kóddal
- Hangok kezelése
- Felhasználói bementek kezelése
- Fények és kamerák paraméterezése
- Tetszőleges fizikai környezet kialakítása és paraméterezhetősége
- Terep importálása, szerkesztése és készítése
- Komplex modellszerkesztő komponens
- Előre elkészített modellek, textúrák és animációk
- Blueprint script rendszer
- 3D játékok fejlesztésére használható

A felsorolt funkciók többsége nem egy egyszerű játékmotor funkcionalitásáért felel, hanem a kényelemért. Előre elkészített asset-ekkel és a paraméterek felhasználó felületre történő kivezetésével egyszerűen lehet játékokat készíteni.

Előnye továbbá, hogy a forráskódját bárki megtekintheti és készíthet hozzá addon-okat. Lehetőség van továbbá a motor továbbfejlesztésének, aminek köszönhetően játékspecifikus funkciókat is lehet elkészíteni.

2.2 Unity

A Unity játékmotor elsődleges célja, hogy egyszerűen lehessen elkészíteni egyszerű játékokat különböző platformokra. A legnagyobb hangsúly az egyszerű felhaszználhatóságon van.

Az Unreal engin-hez képest nem rendelkezik olyan komplex modell szerkesztő rendszerrel, de itt is létezik rengeteg ingyenes és fizetős asset, amik szabadon felhasználhatók a fejlesztendő játékokhoz.

Nem rendelkezik komplex grafikus script rendszerrel, de a C# nyelvű scripteken keresztül egyszerűen lehet fejleszteni. Rengeteg beállítás és paraméter ki van vezetve a grafikus felhasználói felületre, de nem tudjunk komolyabb játékokat készíteni csupán ezek felhasználásával. Ezt ellenzi a rengetek egyszerűen használható könyvtár, amik egyszerűvé teszik a programozást

Platformok közül támogatott a számítógép, a mobil telefon, különböző consolok és a virtuális valóság eszközök is.

Előnye a számtalan mások által készített modell, példa program vagy akár addon, amik nagy száma annak köszönhető, hogy a Unity nyílt forráskódú.

A rendelkezik 2D és 3D résszel is, amiknek köszönhetően minden fajta játékhoz megtalálhatjuk a megfelelő eszközkészletet.

2.2.1 Funkciók

A motor beépített funkcióinak elsődleges célja a minél egyszerűbb felhasználás:

- Kiindulási projektek a különböző típusú játékokhoz
- Modellek betöltése és kezelése
- Textúrák betöltése és kezelése
- Shaderek használata
- Egyszerű grafikus felhasználói felület
- C# scriptelési lehetőség
- Hangok kezelése
- Felhasználói bementek kezelése

- Fények és kamerák paraméterezése
- Tetszőleges fizikai környezet kialakítása és paraméterezhetősége
- Előre elkészített modellek, textúrák és animációk
- 2D játékok fejlesztésére használható
- 2.5D játékok fejlesztésére használható
- 3D játékok fejlesztésére használható

2.3 Saját játékmotor

Az elkészítendő motor funkció az előbbiekben ismertet két komplex motor alapján lett megalkotva, a szükséges egyszerűsítések eszközölésével.

A cél egy olyan játékmotor elkészítése, ami egy olyan eszközkészletet biztosít, amivel egyszerűen lehet labirintus specifikus játékokat létrehozni. Ezalapján a funkciók két részre lettek osztva. Az egyik az általános, a második pedig a labirintus specifikus funkciók.

A funkciók meghatározása során legnagyobb hangsúly az egyszerű felhasználhatóságon volt, mivel a motor nem, vagy csak minimálisan rendelkezik grafikus felhasználói felülettel. Ez azt jelenti, hogy a motor lényegében egy C++ könyvtár, ami egy játék elkészítéséhez szükséges típusokat, függvényeket és algoritmusokat tartalmaz.

A funkciók egy 2D játék készítését segítik elsősorban. Ez alapján elsősorban a Unity 2D motor képességei lettek felhasználva a funkciók kialakításához.

2.3.1 Általános funkciók

Az általános funkciók, azok, amik tetszőleges játék készítéséhez használhatóak. Ezek a motor alap képességei:

- 2D objektumok megjelenítése
- Felhasználói bemenetek kezelése
- Fizikai jelenségek modellezése
    - Ütközés detektálása, kezelése
    - Súrlódás és légellenállás

    - Fények

A motor kényelmi funkciói:

- Beépített grafikus objektumok
- Layerek
- Előre elkészített objektumok

2.3.2 Labirintus specifikus funkciók

- Labirintust leíró file kezelésé
- Labirintus generálása
- Labirintus készítése grafikus felületen kézzel
- Labirintus játékhoz köthető alapvető játéklogika

3 Objektum orientált elvek, tervezési minták és fejlesztési folyamatok

Egy összetett program tervezése és implementálását a hatékonyság és minőség érdekében egy tervezési folyamatnak kell megelőzni. A tervezéskor rengeteg tényezőt kell figyelembe venni. Ilyen például az átláthatóság, a továbbfejleszthetőség, vagy az újra felhasználhatóság.

Mivel az említett tényezők minden software-re értelmezhetőek célszerű egységesen kezelni őket. Ehhez léteznek objektum orientált elvek, amiket célszerű figyelembe venni akár tervezés, akár fejlesztés vagy akár refactor során.

A legelterjedtebb elvek a SOLID[6] elvek, melynél a betűk egy-egy törvényt képviselnek. Ezen elvek megfogalmazzák az alap elvárásokat, de számos egyéb elv[7] kiegészítésével válnak teljessé.

A másik elterjedt eszközök a tervezési minták [8]. Ezek olyan egységes megoldást nyújtanak objektum orientált tervezési problémákra, amiket szinte mindenki ismer és alkalmaz. Ennek köszönhetően egységes és átlátható megoldásokat lehet alkalmazni, ami könnyebbé teszi mindenki számára a további fejlesztést. Az egyes minták felhasználhatósága sokrétő, de úgy lettek megalkotva, hogy minél inkább eleget tegyenek az objektum orientált programozás elveinek.

Az említett elvek és minták elsősorban abban segítenek, hogy a rendszer jól legyen megtervezve és jól legyenek felépítve és összeillesztve a különböző részek. Ezen kívül léteznek olyan elvek, amik arra lettek kitalálva, hogy magát a kódot tegyék olvashatóbbá és könnyebben értelmezhetővé. Ilyenek a Clean Code elvek.

Az előbbiekben említett eszközök használatával lehet legegyszerűbben olyan programot tervezni és készíteni, aminek minősége hosszú távon is fenntartható. Ehhez azonban nem elég az elején figyelembe venni ez elveket és mintákat, hanem azokat folyamatosan alkalmazni kell és nem szabad sajnálni azt a munkát, amit miattuk fektetünk bele a fejlesztésbe. Ez a többletenergia már nem is olyan hosszú távon megtérül, például már a hibajavításokat is könnyebbé teszi.

3.1 Objektum orientált tervezési elvek

Ezen elvek alkalmazása során fontos az észszerűség, mivel olykor előfordulhat, hogy egymásnak ellentétes dolgokat állítanak és az adott körülmény ismeretében kell meghozni a döntést.

A projekt során leghasznosabbnak ítélt tervezési elvek:

- Single-responsibility principle: Az osztályoknak egy felelőssége legyen és az legyen egyértelmű.
- Open-closed principle: Az objektumok legyenek nyíltak a kiterjesztésre, de zártak a módosításra.
- Liskov substitution principle: Minden osztály legyen helyettesíthető a leszármazottaival, úgy, hogy a helyettesítés nem változtatja a működést.
- Encapsulation: A komponensek nem mutassák a belső adataikat a külvilágnak, módosítása ellenőrzött függvényeken keresztül legyen lehetséges.
- Inheritance: Ne használjuk túl a leszármazást, csak akkor alkalmazzuk, ha indokolt.

3.2 Clean Code elvek

A Clean Code olyan elvárásokat állít a kód felé, amik teljesítésével a kód könnyen olvasható lesz és megkönnyíti a fejlesztők munkáját.

A leghasznosabb elvek:

- Meaningfull Names: Mindent úgy nevezzünk el, hogy a neve utaljon a felelősségére és feladatára. A jó kód magát magyarázza, nincs szükség kommentekre. Alkalmazzuk a projektre jellemző elnevezési konvenciót[4].
- Functions: A függvények minél rövidebbek legyenek és lehetőleg egy dolgot csináljanak. Ha valahol kód duplikáció található, akkor azt emeljük ki külön függvénybe. Ne legyen sok paramétere a függvényeknek és megfelelően használjuk a visszatérési értéket.

[4] Szabálykészlet a forráskód alkotóinak elnevezéséhez

- Unit Tests: Unit testekkel jól nyomon követhető, hogy jól működik-e a program az eszközölt változtatások után. Unit testből legyen a legtöbb. Hasznos lehet a Test-driven Development[10].
- Classes: Az osztályok rendelkezzenek a lehető legkisebb felelősséggel, emiatt lehetőleg legyenek minél rövidebbek. Kerüljük a túl mély öröklési láncot. Alacsony legyen az osztályok közötti függőség.
- Refactoring: Fontos a gyakori refaktorálás, amik folyamatosan szinten tartják vagy javítják a kód minőségét.
- Code Smells [11]: A Code Smell olyan részlet a kódban, ami azt sejteti, hogy valamilyen elv megsérült. Ezek figyelembevétele nagyon fontos a refaktorálás során.

3.3 Objektum orientált tervezési minták [3]

A tervezési minták adják a program vázát. Ezeket felhasználva és ezekre építve lehet fenntartható és szép programot fejleszteni. Elsősorban azokra a pattern-ökre szeretnék részletesebben kitérni, amik leghasznosabbnak bizonyultak a játékmotor fejlesztése során. A legtöbb mintát egészen sokáig lehet bonyolítani és optimalizálni, de az alábbiakban csupán az alapok lesznek leírva. Ezen kívül meg lesz említve a felhasználási területe is.

Nagyon fontos, hogy mint ahogy a programozás és programtervezés más területein, itt is nagyon fontos az észszerűség. Óriási könnyebbséget tudnak jelenteni a tervezési minták, de a nem megfelelő használatuk még ennél is nagyobb károkat okoz. Ezért fontos többször átgondolni, hogy használatuk indokolt-e.

3.3.1 Game Loop [12]

Ez a minta képezi a játék törzsét, vagyis alapdinamikáját. A lényege, hogy egy végtelen ciklus futása maga a játék folyama. Ebből abban az esetben lépünk csupán ki, amikor bezárjuk a játékot.

A ciklus törzsében a játéktól függően sok minden történhet. Leegyszerűsítve a dolgokat, itt történik meg az adatszerkezet frissítése a felhasználói input-ok alapján és a kép renderelése a változott adatszerkezet alapján.

Maga a minta elég egyszerű. Kicsit bonyolultabbá teszi a dolgot, ha figyelembe vesszük azt, hogy különböző számítógépek eltérő hardverrel rendelkeznek. Illetve még ha ugyanazon az eszközön futtatjuk a játékot kétszer akkor is lehet eltérés a játék által felhasználható erőforrások méretében. Ez azt eredményezi, hogy egy gyorsabb gépen, vagy ha kevesebb egyéb program fut a háttérben a ciklus törzse gyorsabban ismétlődik, vagyis a játék „gyorsabb" lesz. Ezt a felhasználó úgy veheti például észre, hogy az objektumok gyorsabban mozognak.

Ennek a problémának a kiküszöbölésére be kell vezetni az időt, mint paramétert, amitől függ az adatszerkezet és a megjelenés változása. Ez az idő, az előző ciklus futás óta eltelt idő lesz. Az, hogy hányszor fut le a ciklus másodpercenként a már említett fps érték, ami minél nagyobb annál jobb.

A minta leegyszerűsítve:

```
while (gameIsRunning ())
{
     float elapsedTime = currentTime – previousTime;
     handleInput ();
     update (elapsedTime);
     render ();
}
```

Látható, hogy az adatszerkezet frissítését az eltelt időtől tettük függővé. A mintát szükséges esetben lehet továbbfejleszteni, hogy optimálisabban működhessen.

3.3.2 Update Method [13]

Az minta szorosan együttműködve működik leghatékonyabban a Game Loop mintával. Lényegében ez a minta az előbb említett update függvényről szó, pontosabban arról, hogy mi történik a belsejében.

Azt szeretnénk, ha a játéktérben levő összes objektum frissüljön. Ehhez először az adatszerkezetben kell eszközölni a szükséges változtatásokat. Ennek elvégzésére hivatott az update függvény. A nehézség az, hogy az egyes objektumok különbözőképpen reagálnak az idő múlására.

Ezt úgy oldaj meg a minta, hogy minden objektumnak implementálnia kell egy update metódust. Ezt az update metódust lehet minden egyes alkalommal hívni amikor frissíteni szeretnénk az adatszerkezetet. Az előzőleg felvázolt okokból célszerű, ha az update függvény megkapja paraméterül az eltelt időt az előző frissítés óta.

A kivitelezéshez valahogy garantálni, kell, hogy minden objektumnak van update függvénye. Ezt egy virtuális függvénnyel lehet egyszerűen megoldani.

```
class GameObject
{
     virtual void update (float elapsedTime) = 0;
}
```

Ezt az interface-t megvalósító függvények lesznek a játék dinamikus objektumai.

```
class Car : GameObject
{
public:
     virtual void update (float elapsedTime) override
     {
          move ();
     }
}
```

Ezek után már csak arra van szükség, hogy eltáruljuk a frissítendő objektumokat és azokat mindig frissítsük. A tároláshoz heterogén kollekcióra van szükség, mivel nem ismerjük az objektumok pontos típusát, csak, hogy frissíthetőek. Ez egyszerüsítve így néz ki:

```
List<GameObject*> gameObjects;
gameObject.Add (new Car ());

while (true)
{
     for (GameObject* gameObject : gameObjects
          gameObject->update (elapsedTime);
}
```

Ez a minta gondoskodik arról, hogy az adatszerkezet mindig frissüljön.

3.3.3 Command [14]

Ez a minta lényegében a callback-ek objektum orientált helyettesítői. Sajnos a motorban nem lehet teljesen mellőzni a callback-ek használatát, mivel számos könyvtár és az openGL is használ callback függvényeket.

Lényegében az a minta célja, hogy a felhasználó által adott inputokat át alakítsuk a program által végrehajtandó utasításokká, függvényekké. Ezenkívül szeretnénk azt elérni, hogy minél könnyebben le lehessen cserélni az egyes inputokra történő eseményeket, úgy hogy ezt akár a felhasználó is megtehesse.

Ehhez elsőként szükségünk van egy absztrakt osztályra, ami rendelkezik egy virtuális execute metódussal.

```
class Command
{
 public:
      virtual execute (Actor actor) = 0;
}
```

Arra, hogy paraméterül megkapjon egy actor-t azért van szükség, hogy tudja min kell végrehajtani a függvényeket. Ezek után létrehozhatunk különböző parancsokat, amiket majd inputokhoz tudunk kötni.

```
class JumpCommand : Command
{
public:
      virtual void execute (Actor actor) override
      {
            actor.jump ();
      }
}
```

Ezután meg kell mondanunk valahogy, hogy milyen input hatására melyik parancsnak kell végrehajtódnia. Ehhez egy függvényre van szükség.

```
Command* handleInput ()
{
      if (spacePressed ())
            return new JumpCommand ();
      return nullptr;
}
```

Ez a függvény felel a parancsok és inputok összekapcsolásáért, vagyis ezt kell módosítani (vagy a hozzá tartozó osztályt) ha máshogy szeretnénk kezelni a bemenetet.

Ezek után a maga a végrehajtás már egyszerűen megvalósítható.

```
handleInput ()->execute(actor);
```

A minta továbbfejleszthető a Command osztály okosításával, úgy, hogy a végrehajtott műveleteket vissza is lehessen vonni. Ehhez a végrehajtások ellentétjeit kell implementálni. Ennek a funkciónak elsősorban a tervező programoknál van nagy jelentősége és nem a játékoknál.

Hasznos továbbfejlesztés továbbá, hogy a végrehajtandó parancsokat eltároljuk, hogy az esetleges lassulások esetén se vesszenek el. Vagyis, ha a program éppen nem tudja végrehajtani a parancsot, akkor berakja egy tárolóba. Ebből a tárolóból

folyamatosan hajtódnak végre a parancsok, úgy, hogy mindig az vesszük, amelyik legrégebben került bele (FIFO[5]).

3.3.4 Event Queue [15]

Lényege, hogy a felhasználó bemenetről érkező inputok megfelelően legyenek kezelve. Elsősorban az a lényege, hogy ne vesszen el bemenet és az ok megfelelően legyenek feldolgozva.

Annak, hogy egy bemenet ne vesszen el viszonylag egyszerű a megoldása. Lényegében ugyanúgy kell megoldani, mint a fentebb említett Command minta esetén. A bemenetek akkor veszhetnek el, ha éppen nem tudjuk őket feldolgozni és ezért nem vesszük őket figyelembe. Ehhez szükség van egy FIFO típusú tárolóra, amibe rakjuk be folyamatosan a beérkező adatokat és hajtjuk végre a legrégebben bent levőket.

Itt az lehet érdekes, hogy vannak-e olyan jelek, amik egymás után ismétlődnek, de igazából összevonhatóak eggyé. Például, ha előre szeretnénk menni akkor folyamatosan nyomjuk az előre nyilat. Normál esetben ez aszt jelenti, hogy a számtógépnek rengetek “előre” inputot kell lekezelnie. Ezt optimalizálhatjuk úgy, hogy az egymást követő ilyen jeleket összevonjuk eggyé és csak az számít mennyi ideig tartott, nem pedig, hogy hányszor lett elküldve a jel. Itt arra kell figyelni, hogy mikor tehető ez meg és mikor kellen külön kezelni a bemenetek.

A mások fontos szempont, hogy az egyes bemenetek feldolgozását követő végrehajtandó parancsok végrehajtása be is legyen fejezve. Itt az alapján lehet kétféle parancsot meghatározni, hogy probléma-e, ha átlapolódnak. Például, ha hangot szeretnénk többször egymás után lejátszani, és nincs idejük befejeződni, akkor az a felhasználónak értelmetlen zaj lesz. Ellenben ha mozgatunk valamit, ott nem kell erre akkor figyelmet fordítani.

Ezt úgy tudjuk megoldani, hogy jelezzük mikor hajtódott végre egy parancs és csak azután vesszük a következőt.

Ez a minta annyira nem bírt nagy jelentőséggel ennek a motornak az elkészítésekor, de a továbbfejlesztések miatt fontosnak tartottam kitérni rá.

---

[5] FIFO: First In First Out tároló, az kerül ki belőle, ami legelőször (legrégebben) került bele

3.3.5 Observer [16]

Ez a minta az egyik leggyakoribb a grafikus felhasználói felülettel rendelkező programok körében. Azokon belül is a Model-View-Control architektúrát[19] használók körében a legelterjedtebb.

Abban könnyíti meg a dolgunkat, hogy ha valamilyen program beli eseményt követően szeretnénk arra valahogy reagálni, akkor nem kell zavaró függőségekkel és nehezen érthető feltételekkel teleszórni a kódot.

Úgy működik, hogy azokhoz az osztályokhoz, amiket értesíteni szeretnénk létrehozunk úgy nevezett observer-eket, amik egy közös őssel rendelkeznek.

```
class Observer
{
public:
     virtual void onNotify (const Entity& entity, Event event) = 0;
}
```

Az egyes observerek értesítése után, a paraméterek segítségével el tudják végezni az adatszerkezeti módosításokat. Az olyan osztályokban, amik értesíteni szeretnének másikakat el kell tárolni az értesítendő observereket, heterogén kollekcióban.

```
List<Observer*> observers;
```

Ezeknek utána meg kell hívni a megfelelő metódusát, hogy megtörténjék az értesítés.

```
for (Observer* observer : observers)
     observer->onNotify (const Entity& entity, Event event);
```

Az egyes observereket össze kell kötni az adatszerkezettel, hogy tudja azt módosítani. Ezt tehetjük leszármazással (az Observer osztályból) vagy tartalmazással. Célszerű tartalmazást használni, mivel a leszármazáskor sérül a Single Responsibility elve.

Az observer minta a Model-View-Controller architektúrán kívül achievement-ek kezelésére is rendkívül alkalmas.

3.3.6 Singleton [17]

A minták bevezetésekor volt szó arról, hogy ésszel kel használni őket. Ez erre a mintára hatványozottan igaz. Ennek oka, hogy ez a minta nagyon egyszerű és nagyon sokszor a rossz tervezést követően egyszerűen lehet vele hibákat javítani.

A lényeg, hogy vannak olyan objektumok, amikből csupán egy létezése indokolt. Ilyenkor felmerül, hogy ezt az egy példányt minél több helyről szeretnénk elérni. Ez könnyen ahhoz vezethet, hogy van egy globális isten osztályunk, ami számtalan objektum orientált elvet sért meg.

Implementálás szempontjából ez statikus függvényeket jelent, amiken keresztül lehet a singleton osztályt módosítani.

```
class Singleton
{
public:
     static Singleton* instance ()
     {
          if (instance == nullptr)
               instance = new Singleton ();
          return singleton;
     }
private:
     static Singleton* instance;
}

Singleton::instance ();
```

Gyakori használat például, ha egy ablakunk van, amire minden ki szeretne rajzolni. Ekkor helytelen több ablak példányt létrehozni, mert konfliktusban lennének egymással.

Másik példa például egy log rendszer. Amit a program minden részéről szeretnénk használni. Ekkor lehetséges, hogy a többszöri példányosítás nem okozna konfliktust, de teljes mértékig felesleg, mivel egy közös erőforrás is el tudja látna logolás feladatát, tartalmazni a szükséges adatokat. Ez azért is előnyös, mert ha valahol módosítunk egy beállítást, az azt eredményezi, hogy mindenhol a módosításnak megfelelően fog működni, ez pedig megőrzi az egységességét (fontos szem előtt tartani, hogy ez valóban célunk-e).

Fontos leszögezni, hogy ha felmerül a Singleton osztály gondolat, gondoljuk át kétszer is, hogy tényleg ez-e a helyes megoldás. Ha rosszul használjuk, az óriási gondokat tud okozni.

3.3.7 State [18]

Ez a minta lényegében az állapotgépekről szól. A játékoknál gyakran előfordul, hogy az adott állapottól függ, hogy mit tudunk csinálni és mit nem. Például, ha ugrani

szeretnénk akkor figyelembe kell venni, hogy nem vagyunk-e a levegőben. Mert ha igen akkor nem tudunk megint ugrani (kivéve, ha olyan a játék).

Az állapotgépek legszemléletesebben gráfként vagy táblázatként ábrázolhatóak. A lényegük, hogy vannak állapotok és események. Az határoz meg egy állapotgépet, hogy milyen állapotból milyen esemény hatásár milyen állapotba tudunk eljutni. Például a "földön" állapotról az ugrás parancs hatására eljuthatunk a "levegőben" állapotba, ahol viszont az ugrás parancsot kiadva nem történik semmi.

Az implementálás rengeteg feltételt tartalmaz ezért nagyon fontosak a beszédes nevek és a megfelelő típushasználat.

3.4 Fejlesztési folyamatok

A fejlesztési folyamatok szétdarabolása elősegíti a hatékony munkát és a kód minőségének fenntartását.

A feladatok a végrehajtás sorrendjében:

3.4.1 Program vázának kialakítása

A program váza magában foglalja a program belépési pontját és a motor által keletkező könyvtár bekötését a demo alkalmazásba. Azoknak az osztályoknak az implementálását takarja, amelyek reprezentálják magát a grafikus alkalmazást, annak specifikált példányát és az egész program magját, ahol található a belépési pont. Mindez, úgy történik, hogy a motor minél jobban elkülönüljön a játéktól.

3.4.2 Külső források, könyvtárak integrálása

A fejlesztés egyik legnehezebb folyamata. A nehézsége abban rejlik, hogy úgy kell a könyvtárakat integrálni a projektbe, hogy azok könnyen lecserélhetőek lehessenek. Például az OpenGL meghajtásáért felelős függvényeket, úgy be kell becsomagolni, hogy minél kevesebb munkával meg lehessen oldani egy új platform bevezetését.

Ezen kívül a különböző könyvtárakat egymással is és a motorral is össze kell kötni, úgy, hogy a használatuk minél egyszerűbb és kényelmesebb legyen.

3.4.3 Ablak elkészítése

Az ablak fejlesztése az a pont, ahol látható eredménye van az eddigi munkának. Itt is nehézség, hogy úgy kell létrehozni, az ablakot, hogy az könnyen lecserélhető lehessen más platform vagy technológia ablakára.

Itt még csak a felhasználótól független tartalmak megjelenítése lehetséges, tekintve, hogy a felhasználói bemenetek még nincsenek bekötve. Ezen kívül egy egyszerű és akár testre is szabható felhasználói felület elkészítése is cél.

3.4.4 Felhasználói bemenetek bekötése

A felhasználó bemenetek bekötése is nehézséget jelent abból a szempontból, hogy eltérő platformokon eltérően kell megvalósítani. Ennek megoldására ez is el lett rejtve a motor egy interface-e mögé, ami mögé bármikor új eseménykezelést lehet bekötni.

Ezután már lehetséges, hogy a felhasználó befolyásolja a kijelző tartalmát, de még csak direkt grafikus függvények hívásával. Ennek oka, hogy a játék logikája és adatszerkezete csak később készül el.

3.4.5 Labirintus kezelést támogató modul fejlesztése

Lehetővé teszi véletlen útvesztők generálását és megoldását. Illetve ezek adatszerkezetben történő eltárolását, mentését és beolvasását.

A motor még nem képes megjeleníteni az útvesztőket.

3.4.6 Labirintus modul bekötése a motorba

A motorba bekerül a labirintus kezelő modul. Ezek után már képes a labirintus adatszerkezetével dolgozni és grafikusan megjeleníteni.

3.4.7 Alapvető fizika bekötése

Külső könyvtár segítségével az alapvető fizikai törvények megvalósítása. 2D motor révén elsősorban súrlódás és ütközésdetektálás rész az alap fizikának.

A fizikát össze kell kötni a grafikus elemek adatszerkezetével a játéklogikán keresztül. Mivel a játéklogika csak később kerül lefejlesztésre, itt még csak a megfelelő interface-ek létrehozására van lehetőség.

3.4.8 Alapvető játéklogika implementálása

A játéklogika elkészítésével létrejön az adatszerkezet. Elkészülnek a játék beli parancsok és összeköttetés alakul ki a felhasználói bemenettel. A grafikus felület a mindenkori adatszerkezetet tükrözi. Kapcsolat épül fel a fizika és az adatszerkezet között, amivel a fizikai törvények láthatóvá válnak a képernyőn.

A cél, hogy a logika csak a minimális funkcionalitást valósítsa meg és a fejlesztők által testreszabható és továbbfejleszthető legyen.

3.4.9 Demo játék készítése

A demo játék minden más implementációs feladat elkészülte után lehetett kész. Mindemellett fontos szerepet játszott a projekt fejlődésében, abból a szempontból, hogy vele párhuzamosan volt fejlesztve. Ezzel segítette annak ellenőrzését, hogy jól működnek-e a különálló részek egyben.

Célja az, hogy megmutassa a motor képességeit, lehetőleg minél jobban lefedve annak funkcióit. Egy példaként is szolgál jövőbeli projektek számára.

A játék elkészítésével kiderül mik a motor esetleg hiányosságai és, hogy mennyire használható alkalmazás hozható létre az elkészített motorral

3.5 Tesztelés

A tesztelés nagyon fontos eleme minden fejlesztésnek. Ez garantálja azt, hogy ami jó az mindig jó. Sajnos a grafikus alkalmazások tesztelése egy bonyolultabb eszköztárat és bonyolultabb teszteket igényel.

Tesztelés szempontjából nagyon fontosok a unit tesztek. Ezek a tesztek minél kisebb egységek megfelelő működésért felelnek. Miután elkészültek azzal lehet számolni, ha sikertelen a futásuk, akkor valami el lett rontva. Ez alapján nyomon lehet követni, hogy az eddig még jól működő részek továbbra is jól működnek.

Grafikus felületek tesztelésénél felmerül, hogy szükség lenne referencia képek és aktuális képek összehasonlítására. Erre sajnos nem találtam megfelelő eszközt, ezért nem készültek ilyen típusú tesztek.

Jelen motornál leginkább az adatszerkezeti változásokon lehetett unit teszteket végezni. Itt lebutított előre felkészített objektumokon lehet műveleteket végezni, amiknél azt lehet vizsgálni, hogy az adatszerkezet az elvártnak megfelelően változott-e.

Egy eszköz, ami elősegíti a hibamentes fejlesztést, a tesztelés vezértelt fejlesztést (Test-driven-development). Ennek alapkoncepciója az, hogy előbb készülnek el a tesztek és utána a program. Ez azt jelenti, hogy a tesztek eleinte buknak és akkor lehet készé nyilvánítani egy részt, ha a hozzá tartozó teszt hibátlanul lefutott. Ezt ebben az esetben a demo program jelentette.

A program sok komponensből áll, ezért nagyon fontosak az olyan tesztek, amik az egész egységes működését vizsgálják. Ehhez test framework híján manuális tesztek lettek használva. Ezek egy része a játék tesztelésére irányult, másik rész pedig a motorra, mint könyvtár.

4 Felhasznált külső könyvtárak és programok

A fejlesztés gyorsabbá tételének érdekében használtam harmadik fél által készített könyvtárakat. Ezen kívül használtam olyan programokat, amik segítették a fejlesztés folyamtát és hibák keresését.

4.1 Felhasznált programok

Itt elsősorban az olyan programokat szeretném bemutatni, amik használata nagyban befolyásolta a fejlesztést. A fejlesztői környezetekre és más editorokra nem térek ki.

4.1.1 Git [21]

A Git egy nyílt forráskódú elosztott verziókezelő rendszer. Felhasználóbarát használatához léteznek különböző kliensek. Ezek közül a GitHub [22] az egyik legelterjedtebb. Én is ezt használtam a projektemhez.

A git lényege, hogy a projektek változásának nyomon követését egyszerűbbé teszi. Eltárolja magát a source kódot és annak változásait, ezzel könnyebbé téve a módosítások nyomon követését. Lehetőség van különböző ágak létrehozására, ezzel a több fejlesztő által egyszerre történő fejlesztést teszi egyszerűbbé.

A GitHub kliens emellett rendelkezik számos más funkcióval, mint például issue-k kezelésével, vagy a merge konfliktusok feloldását segítő eszközzel.

Legnagyobb előnye, hogy számos használt könyvtár forráskódja giten található. Így egyszerűbben lehet beintegrálni őket a motorba, submodul-ként. Ez azért nagyon hasznos, mert a submodulok frissítésével mindig a könyvtár legfrissebb verzióját lehet használni.

A git hátránya, hogy forráskód tárolására van kitalálva, ezért a projekt file-ok (pl.: Visual Studio solution file) nem kezeli jól. Ilyenkor előfordulhat olyan, hogy a gitről való leszedést követően összekavarodik az előzőleg létrehozott projekt. Ez úgy jelenik meg leginkább, hogy a linkelés és az include-olás működésképtelenné válhat. Ez elsősorban az összetettebb felépítésű projekteknél fordul elő. Orvoslására célszerű, valamilyen projekt generáló program használata.

4.1.2 Premake [20]

A premake egy parancssori alkalmazás, ami arra képes, hogy a megadott leírás alapján legeneráljon egy projektet, létező source kódból. Komplexebb projekteknél azért van rá szükség, mert a verziókezelő rendszerek a forráskód tárolására lettek kitalálva és elveszhetnek a projekt beállításai. Számos ilyen program létezik.

Választásom azért esett a Premake-re, mert nem bonyolult és elterjedt. Ezen kívül előnye, hogy multiplatform és sok fejlesztőkörnyezetet támogat. Ez azt jelenti, hogy egyszerűen tudok váltani környezetet, mert csak a generálás paramétereit kell variálnom hozzá.

Használatához script-ekre van szükség, amik leírják a projekt felépítését. Ezeket a scripteket lua[6] nyelven kell elkészíteni.

Meg lehet adni, hogy milyen projektekből áll a program. Ezeket a projekteket tovább lehet részletezni. Például, hogy mivé fordítsa a fordító (pl.: exe[7], dll[8], lib[9]), vagy, hogy használjon-e precompiled header-t[10] és melyik file az.

Meg lehet adni továbbá a különböző filekhoz szükséges includ file-okat és a linkeléshez szükséges adatokat. Ezeket egyszer kell megadni és utána nem kell a beállításokkal foglalkozni, csak egy egyszerű paranccsal legenerálni a projektet.

Az egyszerűbb használathoz létre lehet hozni python[11] scripteket és batch[12] file-okat. Így egyszerűen újra lehet generálni a projektet és még a git submodulok frissítését is megoldja.

---

[6] Széles körben elterjed, egyszerű script nyelv

[7] Futtatható file

[8] Dinamikus könyvtár

[9] Statikus könyvtár

[10] Olyan header file, aminek fordítása csak egyszer történik meg

[11] Elterjed, magas szintű programozási nyelv

[12] Indításával végrehatja a benne levő parancssori parancsokat

4.2 Felhasznált könyvtárak

A felhasznált könyvtárak könnyebbítették a fejlesztés folyamatát és optimálisabbá tették az elkészült programot. Ezen kívül egységesebbé is tették azt.

4.2.1 OpenGL[23] (glad[24], GLFW[25])

Fontos az elején leszögezni, hogy az OpenGL az nem könyvtár. Az OpenGL egy szabvány, ami egy olyan függvényhalmazt (API) szolgáltat, amivel meg lehet hajtani a grafikus kártyákat. Viszont, ahhoz, hogy használni tudjuk, szükség van könyvtárakra, amik segítségével meg lehet hívni az OpenGL API parancsait.

Az egyik ilyen könyvtár a GLFW. Ez egy nyílt forráskódú könyvtár, ami eszközkészletet biztosít, az OpenGL alapszintű meghajtásához. Lehetőség van benne ablakokat létrehozni és kezelni, illetve felhasználói imputok detektálására. Ezen kívül tud context-eket kezelni. Előnye egyszerűsége és kis mérete.

A glad a GLFW kiegészítéseként használható. Arra képes, hogy a grafikus meghajtó függvényeit betölti, hogy használhatóak legyenek a C++ kódból. Ezzel lehet kihasználni a modern OpenGL függvényeit.

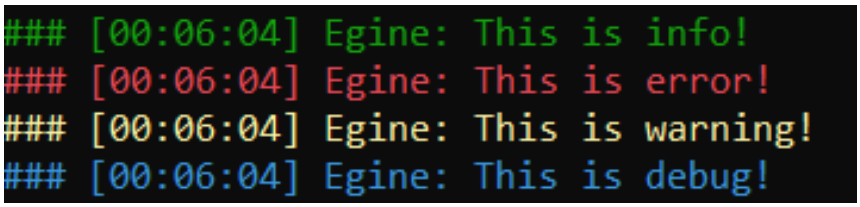
Az előbbi két könyvtár elengedhetetlen a grafikus megjelenítéshez és a felhasználói bemenetek detektálásához.

4.2.2 spdlog [26]

Ahhoz, hogy tudjuk jelezni a fejlesztő felé, hogy milyen problémák léptek fel, milyen folyamatok fejeződtek be sikeresen hasznos egy log rendszer. Ennek lényege, hogy szeretnénk fontosabb dolgokról tájékoztatni a programozókat, de a játékosokat nem szeretnénk fölöslegesen zavarni. Ez elsősorban hibajavításnál lehet fontos.

Az információ közlés legegyszerűbb módja, ha simán kiírjuk azt a standard kimenetre. Ez azonban nehezen értelmezhető. Itt jön képbe az spdlog, ami paraméterezhető formátummal jeleníti meg az információkat.

Az spdlog könyvtár képes tetszőleges szöveget a kívánt formátumban kírni. Megkülönböztet többféle információ fajtát. Ilyen például a sima info, a warning, az error vagy a debug. Ezek formátuma egységes, de színben megkülönbözhetők. Be lehet állítani mondjuk úgy, hogy a hibákat pirossal a sima információkat pedig zölddel jelezze. Ez segít az esetleges hiba esetén megtalálni a hibához tartozó log bejegyzést.



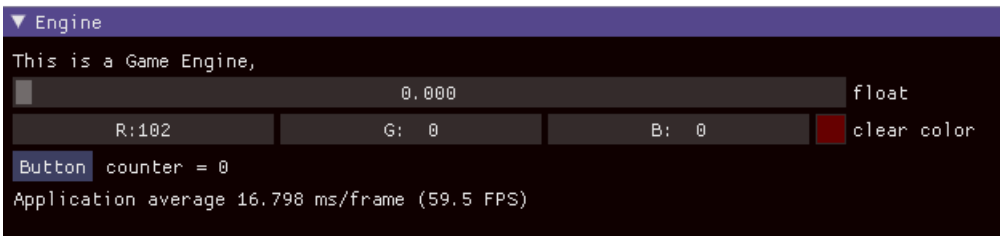
1. Így jelennek meg a különböző log bejegyzések a motor kimenetén

4.2.3 ImGui [27]

Az ImGui egy nyílt forráskódú könyvtár, ami a renderelés optimalizálását hívatott elvégezni. Elsősorban játékok, valós idejű 3D alkalmazások fejlesztéséhez készítették.

Önállóan nem tud működni, szükség van hozzá valamilyen OpenGL könyvtárra (GLFW, glad). Ezek segítségével egyszerűen lehet összeraknak egészen bonyolult grafikus felületeket, úgy, hogy mellette nagy hangsúly van a renderelés optimalizálásán.

Tartalmaz előre elkészített objektumokat, például jól kezelhető dialogokat, különböző input mezőket, gombokat és sok más grafikus dialog elemet. Ezek segítségével egyszerűen tudunk összerakni saját ablakokat.



2. Egyszerű egyedi ImGui dialog

4.2.4 glm [28]

A glm az OpenGL-hez készített matematikai könyvtár. Legnagyobb előnye, hogy készen adja a szükséges matematikai típusokat, amik kompatibilisek az OpenGL könytárakkal.

Számomra leghasznosabb típusai a vektorok és a mátrixok. Az említett típusokkal végzett műveletek elvégzését is támogatja a könyvtár.

4.2.5 stb_image [29]

Az stb_image egy olyan könyvtár, ami textárukhoz szükséges képek betöltését és a textúrák megalkotását segíti.

Elvégzi azt a folyamatot, amikor a képet át kell konvertálni olyan formában, hogy a számítógép tudja használni. Ebben az átalakított formátumban lehet odaadni a grafikus meghajtónak. Előnye, hogy kis méretű és egyszerű használni.

4.2.6 Bullet Physics SDK [30]

Nagytudású fizikai könyvtár. Rengeteg komplex funkcióval rendelkezik, de számomra az alapvető fizikai törvények érvényesítése fontos.

A leghasznosabb funkciója az ütközésdetektálás, ami elengedhetetlen a játék megfelelő működéséhez. Ezen kívül hasznos lehet még a súrlódás és az ütközéseket követő mozgásváltozások, pattogások.

5 Program felépítése és implementálása

A program felépítése során azon volt a fő hangsúly, hogy minél kisebb összefüggő részekre legyen bontva és egy egységes, jól felhasználható eszköztárat biztosítson a motor a játék számára. Ehhez alapvetően két projekt létrehozása szükséges. Az egyik a játékmotor, ennek belső logikájához csak minimálisan szeretnénk, ha hozzáférhetne a játékfejlesztő. A másik maga a játék, aminek egész része a játékfejlesztő által készül.

A két projekt létrehozása felveti azt a kérdést, hogy hogyan szeretnénk, ha összefüggés legyen a kettő között. Mivel a motor méretben és így fordulási időben is nagy, nem szeretnénk, ha ezzel lassítaná a játék fordulását. Emiatt kézenfekvő, hogy a motor projektből valamiféle könyvtár generálódjon, amit aztán használhat a játék.

Két féle könyvtár típus jöhet szóba. Az egyik a statikus könyvtárak[13], a másik a dinamikus könyvtárak[14]. A könyvtáraknak az alapvető funkciója, hogy a gyakran használt kódrészeket ne kelljen minden egyes használatkor újra lefordítani. A statikus könyvtárak ezt relatíve egyszerűen teszik meg. Eltárolják a futtatható állományokat és azok a fordító és a linker segítségével felhasználódnak amikor szükséges. A dinamikus könyvtárak ezt annyiban bonyolítják tovább, hogy míg a statikus könnyárból annyi példányra van szükség ahány program fut, itt egy könyvtár van és azt használják a futó programok.

Ebben nem rendelkeznek számottevő előnnyel a dinamikus könyvtárak a statikus könyvtárakkal. Ellenben statikus könyvtárak készítése, beállítása és használata egyszerűbb.

A motor úgy lett kitalálva, hogy minden megoldható legyen az előre definiált típusok felhasználásával és a belőlük történő leszármazásra. Ez alapján a belépési pont[15] a motorban található.

Ahhoz, hogy létre tudjunk hozni egy játékot, le kell származni a GraphicsProgram osztályból. És implementálni kell a CreateGraphicsProgram external függvény törzsét.

---

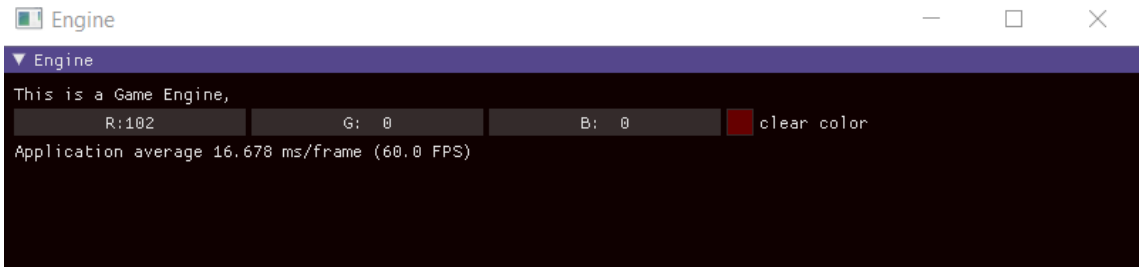
[13] static libraries: lib kiterjesztésű file-ok

[14] dynamic libraries: dll kiterjesztésű file-ok

[15] main függvény

```
Engine::GraphicsProgram* CreateGraphicsProgram()
{
     return new LabyrinthGame();
}
```

A leszármazott osztály (LabyrinthGame) példányosítását követően létrejön egy játék, amit aztán testre tudunk szabni. A testreszabáshoz a motor osztályait kell használni. Alapértelmezetten létrejön egy ablak, amiben van egy ImGui-s menü. Ezt az ablakot lehet utána használni a további objektumok megjelenítésére. Alapértelmezetten be lehet állítani a háttér színét és megjelenik a képfrissítés mértéke (fps).



3. Előre elkészített ablak

5.1 Layer

Egy játék elkészítésekor a legfontosabb eszköz a Layer (réteg). A Layerek segítségével tudunk megjeleníteni dolgokat és kezelni azokat. A játék beépített rétege, az ImGuiLayer. Ez felelős az alapértelmezett ablak megjelenítéséért. Ezt is lehet személyre szabni, de a célja, hogy ne tartalmazzon semmi játék béli objektumot, csupán a motort képviselje.

A játék központi rész az a ciklus, ami addig fut, míg be nem zárjuk az ablakot. Ebben történnek az adatszerkezeti és grafikus frissítések, valamint a felhasználói bemenetek kezelése. Ez a Game Loop tervezési minta megvalósítása.

A játék összes layer-e ebben a függvényben kerül frissítésre. Ezen kívül minden más a layer-eken történik, illetve azok objektumain.

5.2 Window

Az ablakokon lehet megjeleníteni az adatszerkezeti változásokat. Az ablakért a Window osztály felelős. Ez az osztály nem képes önálló működésre, szüksége van egy platformtól függő, natív ablakra (esetünkben OpenGL).

Ez a natív ablak végzi a tényleges munkát. A Window osztály, csupán egy felületet nyújt az egyszerű használatához és eljerti valamint könnyen lecserélhetővé teszi a platformfüggő részeket.

5.3 Renderer

A rendererbe tartozó osztályok és függvények célja, hogy egyszerűsítsék a megjelenítést, valamint elrejtsék a platformfüggő parancsokat és típusokat. Ez azt eredményezi, hogy a platformváltás egyszerűbb, csak ezeket a wrapper[16] osztályokat kell módosítani.

Ehhez azonban szükség van mindenképp a választott platformon (OpenGL) implementálni a szükséges folyamatokat.

Így lehetséges sima objektumokat megjeleníteni, azokhoz shadereket[17] készíteni és textúrázni.

5.3.1 Shader

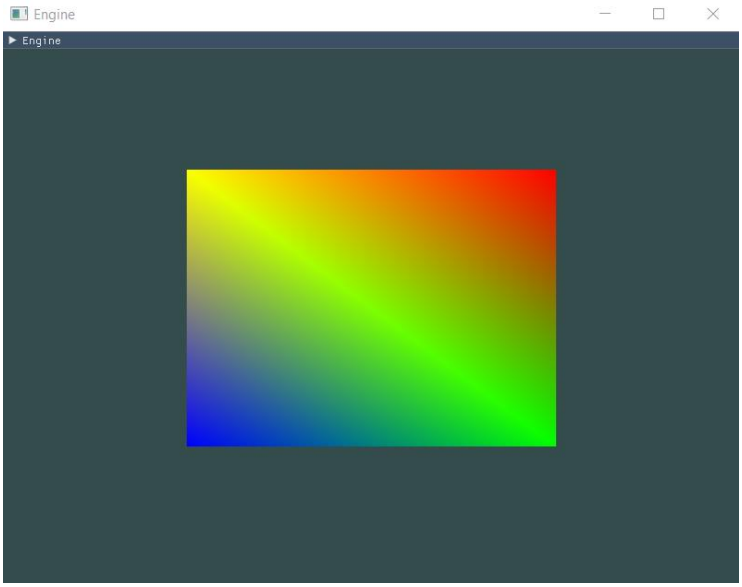
A shaderek felhasználása a motorból, így egészen egyszerűvé vált. A Shader osztály által könnyen végrehajtható minden művelet, anélkül, hogy a natív függvényeket kellene használnunk.

```
shader = Shader::Create("vs.vs", "fs.fs");
shader->use();
```

A Shader osztály elrejt egy OpenGLShader osztályt, ami valójában hajtja végre az megfelelő műveleteket. A Shader osztályra azért van, szükség, hogy ne lássa a fejlesztő a platform specifikus megoldásokat és ezt a platformfüggő részt könnyen le lehessen cserélni, anélkül, hogy módosítani kéne nagyobb mennyiségű kódot.

[16] Becsomagolják a platform függő részeket egy egységes környezetbe

[17] Olyan program, amit a GPU hajt végre



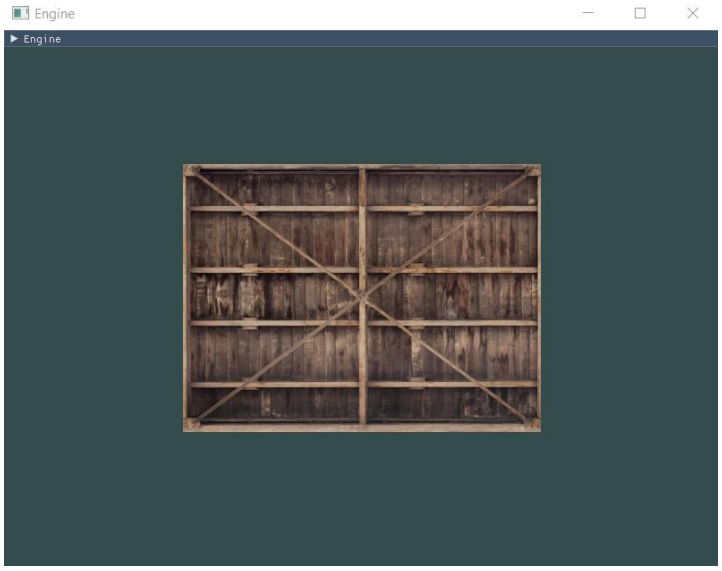
4. Shaderrel színezett téglalap

5.3.2 Textúra

Az alakzatok textúrázása is egyszerűbbé vált, a megfelelő osztálynak köszönhetően.

```
texture = Texture2D::Create(std::string("texture.png"));
```

Itt is létezik a Shader-hez hasonlóan és azonos okokból egy OpenGLTexture2D osztály, ami a valós munkát végzi. Ahhoz, hogy textúrázni tudjunk, szükség van a megfelelő shaderekre.



5. Textúrázott téglalap

5.3.3 Camera

A camera osztály platform független. Ennek lényege, hogy úgy tudja transzformálni az objektumoka, mintha egy paraméterezett kamerából látnánk azokat. Az enögötti mátrixmúveletek szerencsére platformfüggetlenek, így csak a megfelelő shaderej kellenek ahhoz, hogy a kamera osztály működhessen.

A kamerának számos paramétere van, ami szükséges a megfelelő mátrix előállításához. Ilyenek a kamera pozíciója, iránya, dőlése és világban a fentet jellemző irány. Ezen kívül szükség van egy olyan jellemzőre, ami a képva való zoomoltásgot írja le.

Ezek alapján két mátrix megalkotása szükséges. Az egyik a projection mátrix, ez a zoomoltság és a képernyő mérete alapján kerül kiszámolásra. A másik a view mátrix, ami pedig a kamerea pozíciójából és irányából. A már említett glm könyvtár rendelkezik olyan függvényekkel amik az említett paraméterek alapján meghatározzák a kívánt mátrixokat.

Azután a szükséges szorzásokat már a vertex shader végzi el.

```
gl_Position = projection * view * transform * vec4(aPos, 1.0);
```

A képletben szerepel még a transzformációs mátrix, ami a nagyítást, eltolást és forgatást írja le.

5.4 Command

A Command osztály a végrehajtható parancsokat reprezentálja. Ez azt jelenti, hogy egy olyan interface, aminek implementálásával lehet új parancsot létrehozni. A parancsokhoz, a Command tervezési minta lett felhasználva.

Ahhoz, hogy tudjuk mikor milyen parancsot kell végrehajtani szükség van egy bemenet kezelőre, ami a bemenethez köti a megfelelő parancsot. Ehhez az InputHandler osztály lett létrehozva, amiben vannak alapértelmezetten parancsok és bemenetek, de a fejlesztő, adhat meg sajátot is.

A felhasználói bemenetek kezelése és az azokhoz tartozó parancsok végrehajtása minden ciklus iterációban egyszer megtörténik. Nincsen semmiféle bufferelés és pipeline, így előfordulhatnak hibák.

5.5 Observer

Az Observer tervezési minta segítségével arra van lehetőség, hogy több akár egymástól független esemény közös hatására végrehajtsunk valamit. Például, ha új mezőre lépek és az a mező a cél, akkor vége a játéknak.

Observerek segítségével tudja értesíteni a fizikai modul, az adatszerkezet osztályait, a történt eseményekről.

5.5.1 Achievement

Azok az osztályok, amik megvalósítják a közös Achievement interfacer rendelkezenek egy közös onNotify metódussal. Ez a metódus mindig valami meghatározott esemény hatására kerül meghívásra. Ezek a meghatározott események a játék logikájától függenek.

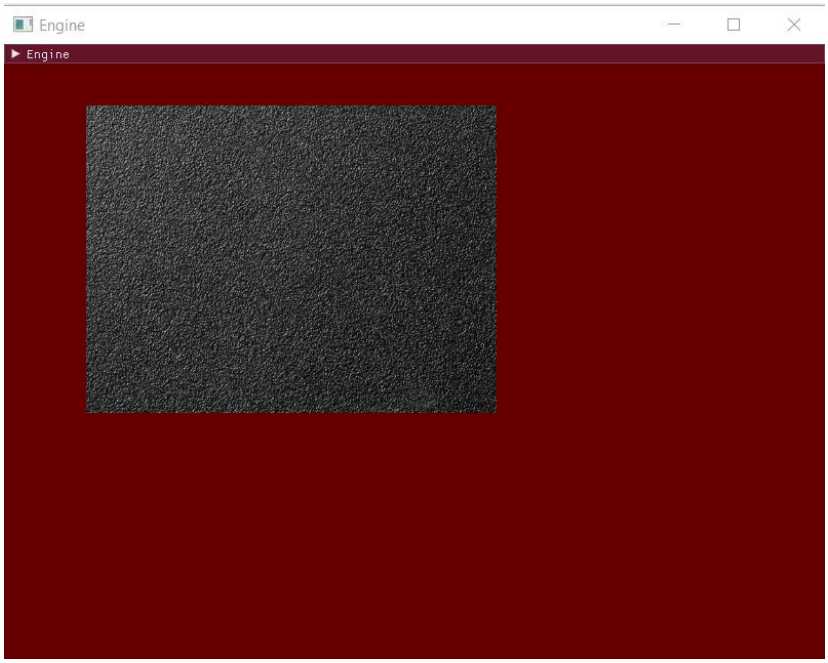
Amikor kiértesítünk egy observert (Achievement-et) akkor az végre hajtja a megfelelő utasításokat, például kiírja, hogy nyert a játékos, vagy csak eltárolja, hogy melyik mezőkön jártunk már.

Használata nagyban függ attól, hogy milyen játékhoz használjuk, ezért a motor csupán az interface-eket foglalja magába, azok megvalósításáról a játékfejlesztőnek kell gondoskodni.

5.6 GameObject

Ezen osztály leszármazottai a játék objektumai. Ki lehet őket rajzolni és lehet velük műveleteket végezni. Ha szeretnénk egy saját objektumot a játékban, akkor ebből kell leszármazni és ezt kell testreszabni.

Ilyen például a motorba épített textútrázható téglalap, amit tetszőleges helyre lehet elhelyezni, tetszőleges méretben és tetszőleges mintával.



6. TexturedRectangle rajzolása, úttest mintával

5.7 Labirintus

A labirintusért felelős modul önállóan is hasznos lehet, de a motorba integrálással egyszerűen lehet labirintust készíteni a játékban.

A Labyrinth osztály összefoglalja a labirintus különböző részeit és egy olyan típus keletkezik így ami a játékmotorhoz lett kitalálva. Ez magában foglalja a labirintus adatszerkezeti részét, különböző megjelenítését és perzisztens[18] tárolását.

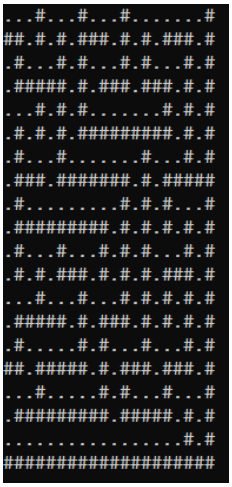
A Labyrinth osztály egy template-es osztály, aminek template paramétere az generátor típusa. Ennek van egy default értéke, ami az általam implementált algoritmust megvalósító osztály. Ennek a paraméternek a módosításával lehet új, a fejlesztő által készített algoritmusokkal generálni a labirintust.

Az osztálynak továbbá része egy rajzoló, ami platform függően képes kirajzolni a labirintust. Illetve ez képes a standard kimenetre és fileba kiírni az adatszerkezetet. A labirintust leíró fileok lb kiterjesztésűek, a könnyebb kezelhetőség érdekében.

[18] Eltárolható, esetünkben fileba írható és onnan beolvasható

A labirintust generáló algoritmusnak a megfelelő formátumban kell létrehoznia az adatszerkezetet. Az útvesztő adatszerekezeti szinten tartalmazza a méretét (egy négyzetrácsként kell elképzelni, aminek van magassága és szélessége). Ezen kívül tartalmaz cellákat, amik a labirintus egyes mezőit képviselik. Ezeknek a celláknak a generáláshoz szükséges adatokon kívül részük, hogy melyik irányban tartalmaznak falakat. Ezek segítségével lehet megjeleníteni grafikusan a labirintust.

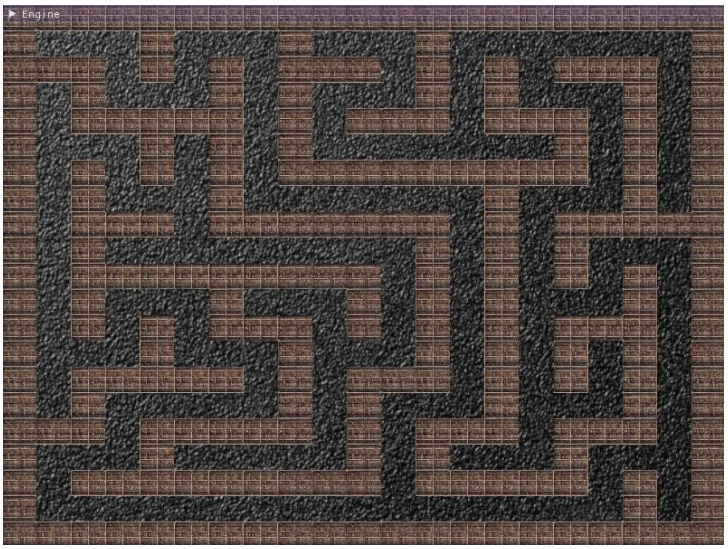
A labirintus generálása véletlenszerűen történik, de a jobb kezelhetőség érdekében lehet fix seed-del[19] generálni, ami eredménye képpen mindig ugyanazt az útvesztőt kapjuk.



7. Labirintus kiírása a konzolra

Az ablakra történő kiralyzolás egy platform függő művelet és a játékfejlesztőknek lehetőségük van saját megjelenítést kitalálni és lefejleszteni.

[19] seed: a véletlenszerű generálás paramétere, egyezés esetén a kiment is azonos



8. Labirintus megjelentése a grafikus felületen

5.8 Physics

A fizika modul az alapvető fizikáért felelős. Ez a játék mivoltából jelenleg csak 2D fizikát tartalmaz magában.

A legfontosabb eleme az ütközésérzékelés. Ez teszi lehetetlenné, hogy a játékos át tudjon menni a falakon. Vagy ezzel lehet megvalósítani, hogy tudjuk, mikor értük el célt.

6 Labirintus demo játék

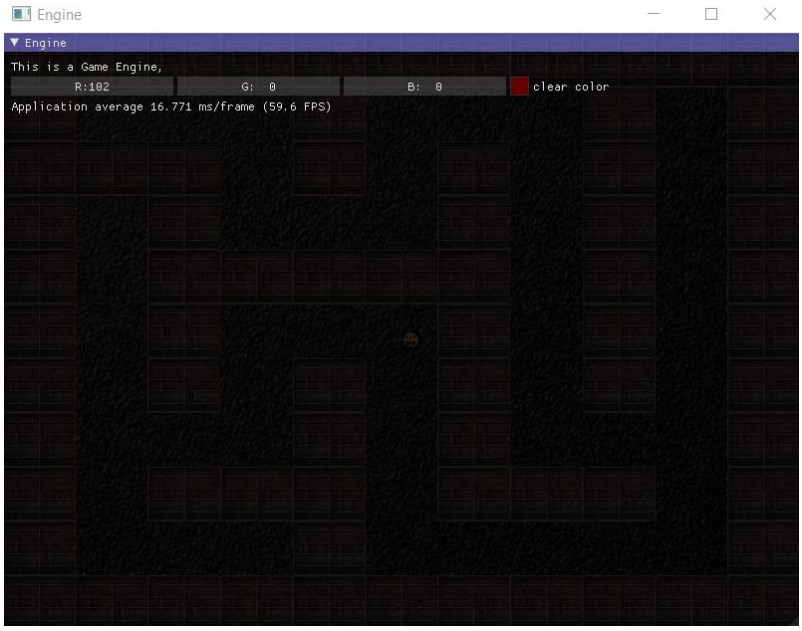
A játék egy egyszerű demonstrációja annak, hogy mit lehet csinálni a motorral. Létrehozása nagyon egyszerű. Csak létre kell hozni egy osztályt, aminek őse a motor GraphicsProgram osztálya.

```
class LabyrinthGame final : public Engine::GraphicsProgram { … };
```

Ezután meg kell valósítani a motor CreateGraphicsProgram függvényét, ami visszaadja milyen típusú a játék.

```
Engine::GraphicsProgram* CreateGraphicsProgram()
{
     return new LabyrinthGame();
}
```

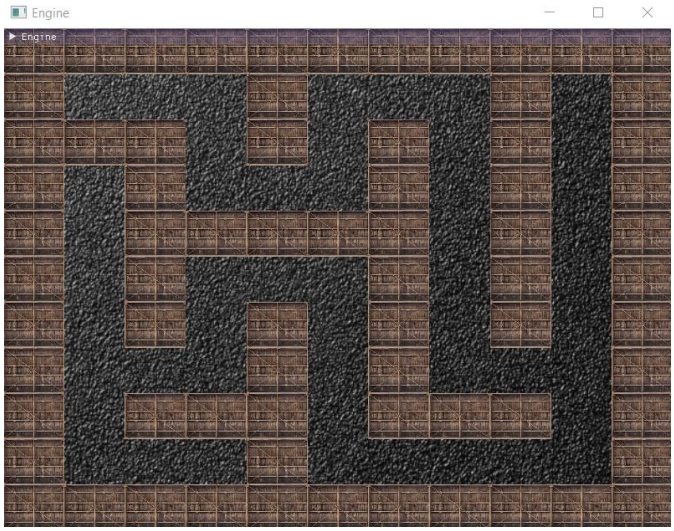
Ekkor kerül példányosításra maga a játékért felelős objektum. Ennek konstruktorában hozzá tudunk adni layereket és meg tudjuk adni melyik layerek között vizsgáljon ütközést. Ezen kívül van lehetőség az imguiLayer testreszabására.



9. Testreszabott imguiLayer

A demo jatéknak két layer-e van. Az egyik a labirintusé, a másik a játékosé. A két réteg között figyelni kell az ütközésdetektálásra, hogy ne tudjon a játékos átmenni a falon.

A labirintus rétegén egy tetszőleges méretű útvesztő található és ezt rajzolja ki. A falak reagálnak a játékossal való ütközésre.



10. 5x5-ös útvesztő a labirintus layeren

A játékos által irányított objektum egy másik rétegen van. Ez a réteg a gameLayer. A játékoshoz létre lett hozva egy objektum, ami a motor Player osztályának leszármazottja. Ez az elem a nyilakkal irányítható és ütközik a labirintus falaival.

A játék igyekszik lefedni a motor összes tudását, de ezt a lehető legegyszerűbben teszi. Emiatt nem rendelkezik komolyabb játéklogikával, csupán egy váz, ami más játékok alapjaként szolgálhat

11. Demo játék

7 Továbbfejlesztési lehetőségek

A motor egy alapvető játékhoz szükséges funkciókkal rendelkezik. De mivel a hangsúly, az objektum orientált felépítésen és a modulok lecserélhetőségén volt, bőven van még olyan funkció, ami hozzáadható. Számos funkciónak már elő van készítve minden, csupán egy kevés munkát igényel a beszerelésük. Azonban vannak olyanok is, amik esetlegesen nagyobb refaktorálást igényelhetnek. Az alábbiakban szeretnék néhány részben vagy egészben hiányzó funkciókat szeretnék megemlíteni.

7.1 Inputkezelés

Jelenleg a motor rendelkezik, egy jól működő inputkezelő rendszerrel, ami mögött a platform egyszerűen módosítható. A hiányossága az, hogy semmiféle előfeldolgozás nem történik a bemenet észlelése és végrehajtása között. Azzal lehetne jobbá tenni, ha a bemenet egy pipeline-on átmenve feldolgozásra kerülne. Ezzel hatékonyabb és biztonságosabb lenne a folyamt.

7.2 3D

A motor jelenleg 2D beépített objektemokat tartalmaz, de semmi nem akadályozza a játékfejlesztőt, hogy 3D játékot készítsen. Az egyetlen akadály, hogy a labirintus nem rendelkezik olyan rajzoló algoritmussal, ami térben ábrázolná azt és ennek elkészítéséhez a motor kódját kellene kiegészíteni.

7.3 Labirintus megoldásának megjelenítése

Jelenleg a labirintus nem jeleníti meg a grafikus felületen a megoldási útvonalát. Az útkereső algoritmus implementálva van és használható is a konzolos felületén az útvesztőnek. Ahhoz, hogy egy játékban is használható lehessen nincs szükség nagy módosításokra, de azokat a motorban kell végrehajtani.

7.4 Fizika

A fizika egy egyszerű 2D játékhoz lett készítve. Ez pedig az ütközés detektálásban kimerül. Ahhoz, hogy nagyobb tudású fizikai motorunk legyen vagy a most létezőt kell tovább fejleszteni, vagy egy külső fizikai motor is felhasználható. Mindkét opció nagyobb módosításokkal jár és lehet, hogy nagyobb munkára van hozzá szükség. Mindazon által

a már létező kódok nagyobb mértékű módosítására nem lenne szükség, csupán azok kiegészítésére.

7.5 Párhuzamosítás

A motor jelenleg egy szálon működik. Már egész egyszerű esetekben előjöhet teljesítmény probléma, ami párhuzamosítással megoldható lenne. Ennek kivitelezése helyenként nem lenne bonyolult, máshol viszont nagy nehézségeket tudna okozni.

7.6 Renderer

A mostani renderer képes minden szükséges funkciót ellátni. Használata esetenként macerás lehet, ezt pedig még több metódussal és típussal lehetne segíteni. Ezek elkészítése nem jelent nagy nehézséget. Ezen kívül még több előre elkészített grafikus objektum is segítené a fejlesztést.

A másik hiányossága, hogy nem tud külső forrásból modelleket beolvasni. Itt maga a beolvasás jelent nagyobb munkát, a kezelése utána már egyszerűen megoldható.

7.7 Animációk

Jelenleg a motor semmilyen formában nem támogat animációkat. Ezek bevezetése, a motor kiegészítésével járna.

7.8 Hangok

A hangok kezelése sem része a motornak. Bevezetésük egy külső könyvtár segítségével könnyen elintézhető. Ezután már csak az egyszerű használathoz szükséges objektumokat kell létrehozni.

7.9 Grafikus felület

A jelenlegi eszközökkel egészen egyszerűen létre lehetne hozni, egy olyan grafikus felhasználói felületet, ami a motor használatát egyszerűsítené.

7.10 Fények

A motor nem képes komplex fényeket kezelni. Ezen kívül nem tesz különbséget az objektumok anyagában. Ezek mind megvalósíthatóak a játék szintjén, de egyszerűen felvihetők a motorba.

7.11 Scriptek

Nincsen kitalált script rendszere a motornak. Ennek bevezetése egy nagyobb tervezési feladatot jelent, valamint a motor nagymértékű kiegészítése szükséges.

7.12 Egyéb

Az említetteken kívül még számos olyan funkció létezik, amikkel bővíthető a motor tudása. Ezek nagyja könnyedén vagy legalábbis a jelenlegi kódállomány módosítása nélkül kivitelezhető lenne. Ennek oka az alapos tervezés és az Open-Closed törvényre fektetett nagy hangsúly.

8 Összegzés

Az elkészített motor egy jó alap egy komplexebb eszköz készítéséhez, azonban tudása nagyban elmarad napjaink legnagyobb motorjaitól. Fejlesztése során többször bizonyosságot nyert, hogy megérte akkora energiát fektetni az alapos tervezésbe és objektum orientált tervezési elvek és minták használatába.

Megtapasztaltam, hogy egy program soha nem készül el és mindig van rajta mit továbbfejleszteni. Sokszor egészen apró részletekbe lehet rengeteg munkát beleölni. Ezen kívül sokszor a láthatatlan részek a legfontosabbak.

Irodalomjegyzék

[1] *OOP elvek*: https://en.wikipedia.org/wiki/Object-oriented_programming#SOLID_and_GRASP_guidelines (2021. okt.)

[2] *Clean Code elvek*: https://dzone.com/articles/clean-code-summary-and-key-points/ (2021. okt.)

[3] *Game Programming Patterns*: https://gameprogrammingpatterns.com/contents.html/ (2021. okt.)

[4] *Unity*: https://unity.com/ (2021. okt.)

[5] *Unreal Engine*: https://www.unrealengine.com/en-US/ (2021. okt.)

[6] *SOLID Principles*: https://en.wikipedia.org/wiki/SOLID/ (2021. okt.)

[7] *OOP Principles*: https://training.by/#!/News/275?lang=en (2021. okt.)

[8] *Design Patterns*: https://refactoring.guru/design-patterns/ (2021. okt.)

[9] Robert C. Martin: *Clean Code*, ISBN 0-13-235088-2, 2008, https://enos.itcollege.ee/~jpoial/oop/naited/Clean%20Code.pdf (2021. okt)

[10] *Test driven development – TD*D: https://en.wikipedia.org/wiki/Test-driven_development/ (2021. okt.)

[11] *Code Smell*: https://en.wikipedia.org/wiki/Code_smell/ (2021. okt.)

[12] *Game Loop Pattern*: https://gameprogrammingpatterns.com/game-loop.html/ (2021. nov.)

[13] *Update Method Pattern*: https://gameprogrammingpatterns.com/update-method.html/ (2021. nov.)

[14] *Command Pattern*: https://gameprogrammingpatterns.com/command.html/ (2021. nov.)

[15] *Event Queue Pattern*: https://gameprogrammingpatterns.com/event-queue.html/ (2021. nov)

[16] *Observer Pattern*: https://gameprogrammingpatterns.com/observer.html/ (2021. nov.)

[17] *Singleton Pattern*: https://gameprogrammingpatterns.com/singleton.html/ (2021. nov.)

[18] *State Pattern*: https://gameprogrammingpatterns.com/state.html/ (2021. nov.)

[19] *Modell View Controller architecture*: https://en.wikipedia.org/wiki/Model%E2%80%93view%E2%80%93controller/ (2021. nov.)

[20] *Premake*: https://premake.github.io/ (2021. nov.)

[21] *Git*: https://git-scm.com/ (2021. nov.)

[22] *GitHub*: https://hu.wikipedia.org/wiki/GitHub/ (2021. nov.)

[23] *OpenGL*: https://www.opengl.org// (2021. nov.)

[24] *glad*: https://www.khronos.org/opengl/wiki/OpenGL_Loading_Library#glad_.28Multi-Language_GL.2FGLES.2FEGL.2FGLX.2FWGL_Loader-Generator.29/ (2021. nov)

[25] *GLFW*: https://www.glfw.org/ (2021. nov.)

[26] *spdlog*: https://github.com/gabime/spdlog/ (2021. nov.)

[27] *ImGui*: https://github.com/ocornut/imgui/ (2021. nov.)

[28] *glm*: https://github.com/g-truc/glm/ (2021. nov)

[29] *stb_image*: https://github.com/nothings/stb/ (2021. nov)

[30] *bullet physics*: https://github.com/bulletphysics/bullet3/ (2021. nov)

[31] *openGL guide*: https://learnopengl.com/ (2021. nov)

[32] *GitHub repository*: https://github.com/rittakos/LabyrinthGameEngine/ (2021. nov)

Függelék