Széchenyi István Egyetem

Gépészmérnöki, Informatikai és Villamosmérnöki Kar

Informatika Tanszék

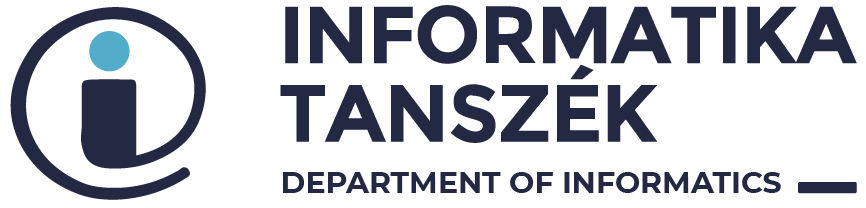
**SZAKDOLGOZAT**

**Piltz Gergely**

**Mérnök Informatikus BSc szak**

2024

|  |
| --- |
| Piltz Gergely, 2024 |



**SZAKDOLGOZ****AT**

**Videójáték készítés**

**Piltz Gergely**

**Mérnök Informatikus BSc szak**

**2024**



**Nyilatkozat**

Alulírott, Piltz Gergely (G1VYQG), Mérnök Informatikus BSc szakos hallgató kijelentem, hogy a Videójáték készítés című szakdolgozat feladat kidolgozása a saját munkám, abban csak a megjelölt forrásokat, és a megjelölt mértékben használtam fel, az idézés szabályainak megfelelően, a hivatkozások pontos megjelölésével.

Eredményeim saját munkán, számításokon, kutatáson, valós méréseken alapulnak, és a legjobb tudásom szerint hitelesek.

Győr, [beadás dátuma]

hallgató

**Kivonat**

Videójáték készítés

Ez a dolgozat egy videojáték alapvető funkcióinak fejlesztésére fókuszál. A szóban forgó videojáték egy voxel alapú sandbox nyílt világú játék. Az első fejezetek segítenek megérteni egy ilyen játék koncepcióját, és betekintést nyújtanak abba, hogy miért nem sok játék használja a projektben megvalósított technológiát. A játék magját, a környezet építőköveit kezelő algoritmust Marching Cubes-nak hívják. A következő fejezetekben a Marching cubes algoritmust alaposabban megvizsgáljuk, feltárjuk a hibákat, és ahol lehetséges, javítjuk. A műszaki megvalósítás tartalmazza a környezet nagyobb léptékű kezelésének különböző módjait is. Ez az a módszer, amikor a világot úgynevezett chunk-okra, vagyis egyforma méretű részekre osztjuk fel. Ezután több módszer kerül összehasonlításra a legjobb teljesítmény elérése érdekében a chunk-ok betöltése és törlése közben.

**Abstract**

Making a video game

This thesis focuses on the development of the base features of a video game. The video game in question is a voxel-based sandbox open world game. The first chapters help understand the concept of such a game and offer insight into why there aren’t many games utilizing the technology implemented in this project. The core of the game, the algorithm that manages the building blocks of the environment is called Marching Cubes. In the later chapters the Marching cubes algorithm gets examined more closely, it’s flaws identified and where possible, improved upon. The technical implementation also includes different ways of managing the environment on a larger scale. That is the method of dividing the world into so called chunks, individual uniformly sized areas. Then multiple methods are compared for achieving the best performance while loading and unloading these chunks.

**Tartalom**

[1 Bevezetés 1](#_Toc183046118)

[2 Elméleti Háttér 3](#_Toc183046119)

[2.1 Voxel és voxeljáték definíció 3](#_Toc183046120)

[2.2 Kettő Dimenziós Voxelek (Terraria) 3](#_Toc183046121)

[2.3 Három Dimenziós Voxelek (Minecraft) 4](#_Toc183046122)

[2.4 Mesh (háló) Előállítás, Megjelenítés 5](#_Toc183046123)

[2.4.1 Vertex 5](#_Toc183046124)

[2.4.2 Vertices 5](#_Toc183046125)

[2.4.3 Triangles 5](#_Toc183046126)

[2.5 Flat Shading vs Smooth Shading 6](#_Toc183046127)

[2.6 Marching Cubes Algoritmus 7](#_Toc183046128)

[2.7 Hol használatos a Marching Cubes algoritmus 7](#_Toc183046129)

[2.7.1 Orvosi Tudomány 7](#_Toc183046130)

[2.7.2 CAD és szimulációs szoftverek 8](#_Toc183046131)

[2.8 Az algoritmus működése 8](#_Toc183046132)

[2.8.1 Skalármező 8](#_Toc183046133)

[2.8.2 Felület meghatározása 9](#_Toc183046134)

[2.8.3 Interpoláció 10](#_Toc183046135)

[2.8.4 Háló elemeinek összeállítása 12](#_Toc183046136)

[2.9 A Sokszöghalmaz Előállítása 12](#_Toc183046137)

[2.9.1 Lookup Table 12](#_Toc183046138)

[2.9.2 Edge Table 14](#_Toc183046139)

[2.9.3 Corner Table 14](#_Toc183046140)

[3 Követelmények 16](#_Toc183046141)

[3.1 Alap követelmények 16](#_Toc183046142)

[3.2 Játékmenet követelmények 17](#_Toc183046143)

[3.3 Módszertan kiválasztása 18](#_Toc183046144)

[3.4 Alkalmazás Állapotgépe 20](#_Toc183046145)

[3.4.1 MAIN Menü 20](#_Toc183046146)

[3.4.2 Játék közben 20](#_Toc183046147)

[3.4.3 PAUSE Menü 21](#_Toc183046148)

[3.5 Osztálydiagram 22](#_Toc183046149)

[3.5.1 World 24](#_Toc183046150)

[3.5.2 CubicChunk 24](#_Toc183046151)

[3.5.3 ChunkPool 24](#_Toc183046152)

[3.6 Mozgásrendszer állapotgépe 25](#_Toc183046153)

[4 Implemetálás 27](#_Toc183046154)

[4.1 A Marching Cubes Algoritmus hátulütői 27](#_Toc183046155)

[4.1.1 Műveletigény 27](#_Toc183046156)

[4.1.2 Magas Vertex Szám 28](#_Toc183046157)

[4.2 Az algoritmus optimalizálása 29](#_Toc183046158)

[4.3 Kocka és kocka közötti optimalizálás 29](#_Toc183046159)

[4.4 Kockán belüli optimalizálás 32](#_Toc183046160)

[4.5 Teljes kód 33](#_Toc183046161)

[4.6 Compute Shader Használata 34](#_Toc183046162)

[4.6.1 Párhuzamos futtatás 34](#_Toc183046163)

[4.6.2 Direkt memória hozzáférés 34](#_Toc183046164)

[4.6.3 Azonalli végrehajtás 34](#_Toc183046165)

[4.6.4 Munkacsoportok 35](#_Toc183046166)

[4.6.5 Dispatch 35](#_Toc183046167)

[4.6.6 Kernel 35](#_Toc183046168)

[4.7 Chunk Loading Rystem 35](#_Toc183046169)

[4.7.1 Távolság alapú ellenőrzés és pozíció alapú létrehozás 36](#_Toc183046170)

[4.7.2 Pozíció alapú ellenőrzés és létrehozás 38](#_Toc183046171)

[4.7.3 Memória struktúra alapú rendszer 39](#_Toc183046172)

[4.8 Chunk Pooling System 41](#_Toc183046173)

[4.8.1 Tárolás 42](#_Toc183046174)

[4.8.2 Lekérés 42](#_Toc183046175)

[4.8.3 Visszahelyezés 43](#_Toc183046176)

[5 Tervezés 44](#_Toc183046177)

[5.1 Miért a Marching Cubes-ra esett a választás 45](#_Toc183046178)

[5.2 Az optimalizáció eredménye 45](#_Toc183046179)

[5.3 Chunk Loading System kiválasztása 47](#_Toc183046180)

[5.3.1 Végrehajtási idők tesztelése 47](#_Toc183046181)

[5.4 Tesztek 50](#_Toc183046182)

[5.4.1 Chunk csatlakozási hiba 50](#_Toc183046183)

[5.4.2 Chunkon belüli hiba 51](#_Toc183046184)

[5.4.3 Zaj magasság hiba 52](#_Toc183046185)

[5.4.4 Zaj intenzitás hiba 53](#_Toc183046186)

[6 Konklúzió 54](#_Toc183046187)

[7 Mellékletek 55](#_Toc183046188)

[8 Irodalomjegyzék 56](#_Toc183046189)

# Bevezetés

A projekt célja nem egy teljes játék létrehozása, hanem egy váz készítése, amelyre rá lehet építeni egy open world sandbox stílusú játékot. A videójátékok között relatív kevés 3D voxel játék található, hogyha nem számoljuk a híres címek egyértelmű másolatait.

A híres voxeljátékok között is a legtöbb a kocka alapú voxelek megoldását alkalmazza, vagyis a pálya dinamikusan manipulálható, de csak a megadott kockaháló keretében. A Marching Cubes algoritmus használatával lehetőség van dinamikusabb környezetmanipulációra. Ezt azért nem alkalmazza több játék, mert az algoritmus viszonylag komplex és legtöbbször a játékmenet nem teszi szükségessé a használatát, de a Marching Cubes algoritmus sikeres implementációjával lehetséges lesz új játékmechanikák implementálására, ezzel egyedi játékélmény készítésére.

Mind a három aspektus, az Open World, a Procedurális Generálás és a Voxel alapú környezet manipuláció is a fejlesztés nagyrészét teszi ki és amíg az egyes részek nem működőképesek, akár önmagukban, akár együtt, addig magának a játékmenetnek a kifejlesztését nem is lehet elkezdeni.

A követelmények között jelen lesz egy futtatható alkalmazásnak a létrehozása. Ebben az alkalmazásban be lehet majd tölteni egy pályát, amelyen szabadon lehet mozogni. A pálya procedurálisan lesz generálva és a környezet alapszinten manipulálható lesz. Ezek a követelmények már elegek ahhoz, hogy egy ilyen vázra rá lehessen építeni egy open world sandbox játékot.

A játék megvalósítása Unity-ban történik. Ez több előnnyel is jár, mint például, hogy a játékmotort nem kell kifejleszteni.

A dolgozat második fejezetében az előzőleg használt kifejezésekre nyújt magyarázatot és egy alapszintű leírást biztosít a különböző módszerek technikai hátteréről, hogy a későbbi fejezetekben hivatkozni lehessen rájuk.

A harmadik fejezet a követelményeket, funkciókat specifikálja és a program strukturális felépítéséről tartalmaz diagrammokat.

A negyedik fejezet az implementálásról szól, amelynek keretein belül a Marching Cubes algoritmus gyakorlati alkalmazására kerül sor. Ebben a fejezetben lesznek kiemelve az algoritmus hátulütői és a hatékonyság növelésére tett lépések lesznek elmagyarázva. Ebben a fejezetben szó lesz még a procedurális generálásról és a pálya menedzseléséről is.

Az ötödik fejezet különböző teszteket és méréseket tartalmaz, amelyekkel ellenőrizni lehet a program megfelelő működését és segítenek eldönteni, hogy mely módszereket érdemes implementálni.

# Elméleti Háttér

## Voxel és voxeljáték definíció

A voxeljáték egy olyan videojáték, amelyben a környezet és a benne lévő tárgyak voxelekből állnak. A voxelek alapvetően térfogati pixelek, amelyek egy háromdimenziós rács értéket képviselnek. A hagyományos 2D pixelekkel ellentétben, amelyeknek csak szélessége és magassága van, a voxeleknek mélységük is van, ami lehetővé teszi teljesen háromdimenziós környezet létrehozását. [1] A voxel és a voxeljáték definíciója elég laza és gyakran kéz a kézben jár a sandbox játékokkal.

A voxel-játékokban a játékosok gyakran úgy lépnek kapcsolatba ezekkel a környezetekkel, hogy módosítják vagy megsemmisítik a voxeleket, vagy létrehoznak új voxeleket, lehetővé téve a terep dinamikus deformációját. Mivel ez nem egy előre definiált folyamat, hanem a játékostól függ, hogy mit tesz, ezért egy ilyen játéknak egy olyan rendszert kell prezentálnia, amely előre definiált interakciókon lehetővé tesz „végtelen sok” konfigurációt. A voxeljátékok kettő jól ismert példája a Minecraft és Terraria.

## Kettő Dimenziós Voxelek (Terraria)

A Terraria egy 2011-ben kiadott 2D videójáték. A Re-Logic fejleszti, akik először Windows-ra adták ki, majd más PC- és konzolplatformokra is. A játék alapból sandbox jellegű, a felfedezésre és kreatív építésre inspirál első sorban egy procedurálisan generált pályán. A Terraria sok pozitív visszajelzést kapott a közösség felől, ennek köszönhetően 2022-ig több mint 44 millió példány kelt el belőle. A Terraria az eddigi egyik legkelendőbb videójáték. [2] [3]

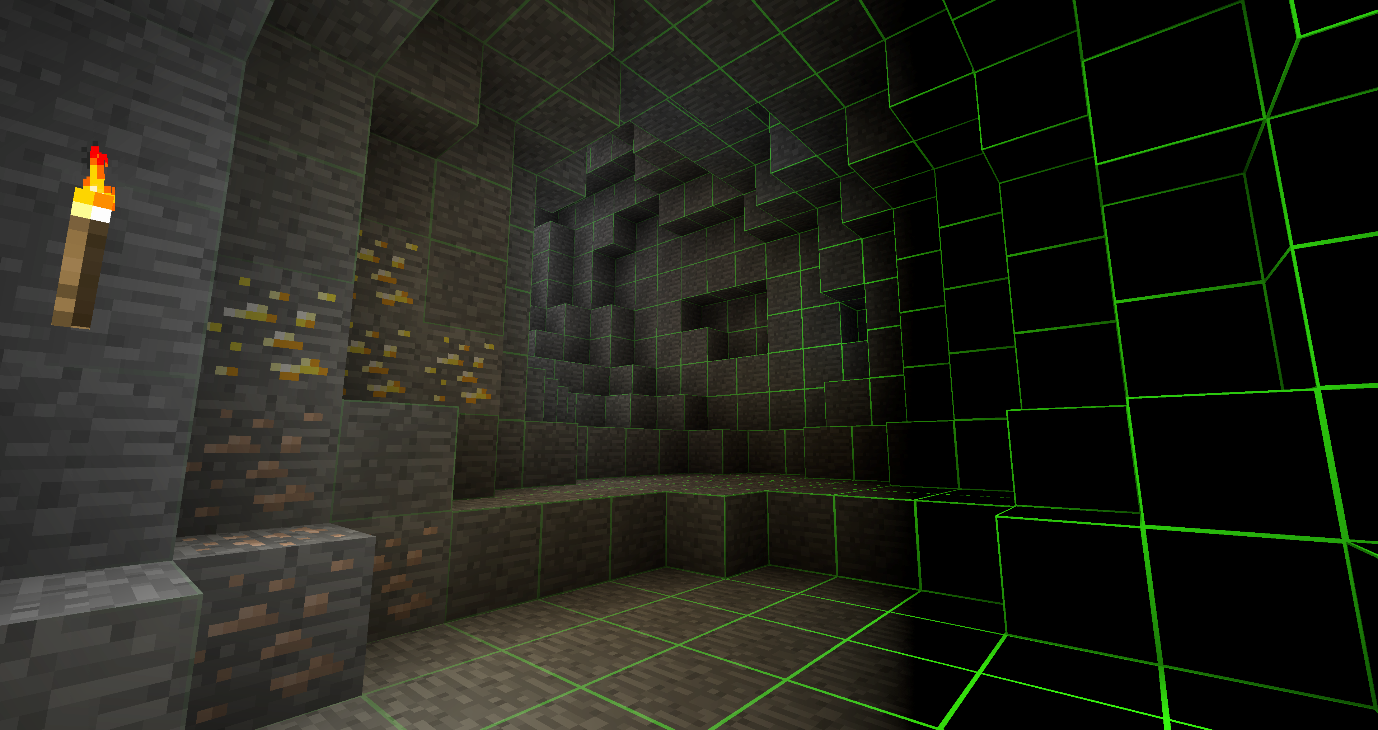
Bár a voxel egy térfogati pixelként van értelmezve, a Terraria is a voxeljátékok közé sorolható. A Terraria egy kétdimenziós rácsot vesz alapul, amelyen belül különböző blokkok helyezhetőek le. Az előre definiált interakciók blokk-blokk és blokk-entitás (pl. játékos) szinten vannak jelen, ez teszi lehetővé a világ dinamikus változtatását és különbözteti meg a játékot más, statikus pályákkal rendelkező hasonló játékoktól.

## Három Dimenziós Voxelek (Minecraft)

A Minecraft egy 2011-ben kiadott sandbox játék, a legnagyobb példányszámban eladott játék a világon. A Mojang Studios által fejlesztett játékból több mint 300 millió darabot adtak el eddig. Korai tesztelési verziókat követően először 2009 májusában hozta nyilvánosságra a játékot az eredeti fejlesztője, Markus "Notch" Persson. 2011. november 18-án adták ki hivatalosan amikor Notch lemondott és Jens "Jeb" Bergensten vette át a fejlesztést. Hamar népszerűvé vált és a világ legkelendőbb videójátéka lett, közel 140 millió havi aktív játékossal. A Minecraft-ból adtak ki verziókat mobil és konzol kompatibilitással is.

A Minecraft egy 3D kockás, pixeles, procedurálisan generált világban játszódik, gyakorlatilag végtelen tereppel. A Minecraft több szempontból is egy technikai csodának számít. A világ annak ellenre, hogy véletlenszerűen generált nagyon precízen illeszti össze a sok különböző tartalmat, miközben játékbeli méretekkel számolva több mint 3.6 milliárd négyzetkilométer. Referenciának, a föld, mint bolygó felszíne félmilliárd négyzetkilométerre becsülhető. [4] [5]

A Minecraft-ben a voxelek blokkoként vannak jelen. Egy blokk a tér egy kockányi területét definiálja egy háromdimenziós kockaháló mentén. Ezek a blokkok interaktálnak egymással és az entitásokkal, például a játékossal.



1. ábra Minecraft  
Forrás: Saját ábra

A Voxel technológia lehetővé teszi a nagyméretű környezetek rugalmas és hatékony megjelenítését, ami hozzájárult a voxel alapú játékok népszerűségéhez. Ezen túlmenően a voxeljátékokhoz gyakran társított kockás esztétika ikonikussá és felismerhetővé vált a játékközösségben.

## Mesh (háló) Előállítás, Megjelenítés

A számítógépes grafikában használt mesh (háló) kifejezés, egy olyan adatstruktúrára utal, amely 3 dimenziós objektumok felszínét definiálja poliéder formájában. A poliéder egy olyan térbeli alakzat, amelyet pontok, élek és oldallapok definiálnak, vagy másszóval egy poliédert minden oldalról síkok határolnak. Poliéder például a kocka, de a gömb nem, hiszen a gömbnek nincs sík felszíne. A számítógépes grafikában íves felületeket is hálók segítségével jelenítenek meg, akkor azonban a felület le van egyszerűsítve síklapokra. [6]

### Vertex

Vertex-nek nevezünk egy olyan pontot, ahol kettő vagy több él találkozik. Ezekből definiálhatóak az élek, amelyek körbezárnak egy adott poligont. [7]

Egy háló használhat bármilyen N-csúcsú poligont a felszín definiálására, de a legelterjedtebb megoldás a háromszöget veszi alapul. Egy háromszög alapú hálóra Triangle Mesh-ként hivatkoznak. [6]

Egy háló definiálása többfajta adatszerkezettel is lehetséges. Az ilyen adatszerkezetek rendelik hozzá a vertex-elket a poligonokhoz, Unity esetében háromszögekhez. [8]

### Vertices

A vertices (vertex többesszáma) tömb egydimenziós adatszerkezet, amelyen belül 3 dimenziós vektorok (Vector3) találhatók. Ezek a háló pontjainak térbeli elhelyezkedését határozzák meg. Tulajdonképpen egy hosszú felsorolás az összes vertex-ről (Az ismétlődés meg van engedve). [8]

Unity-n belül a maximális vertex szám egy hálón belül 16-bites buffer esetén 65535 vagy több mint 4 milliárd 32-bites buffer esetén. A 16-bites buffer az alapértelmezett, hiszen feleannyi memóriát használ, mint a 32-bites buffer. [8]

### Triangles

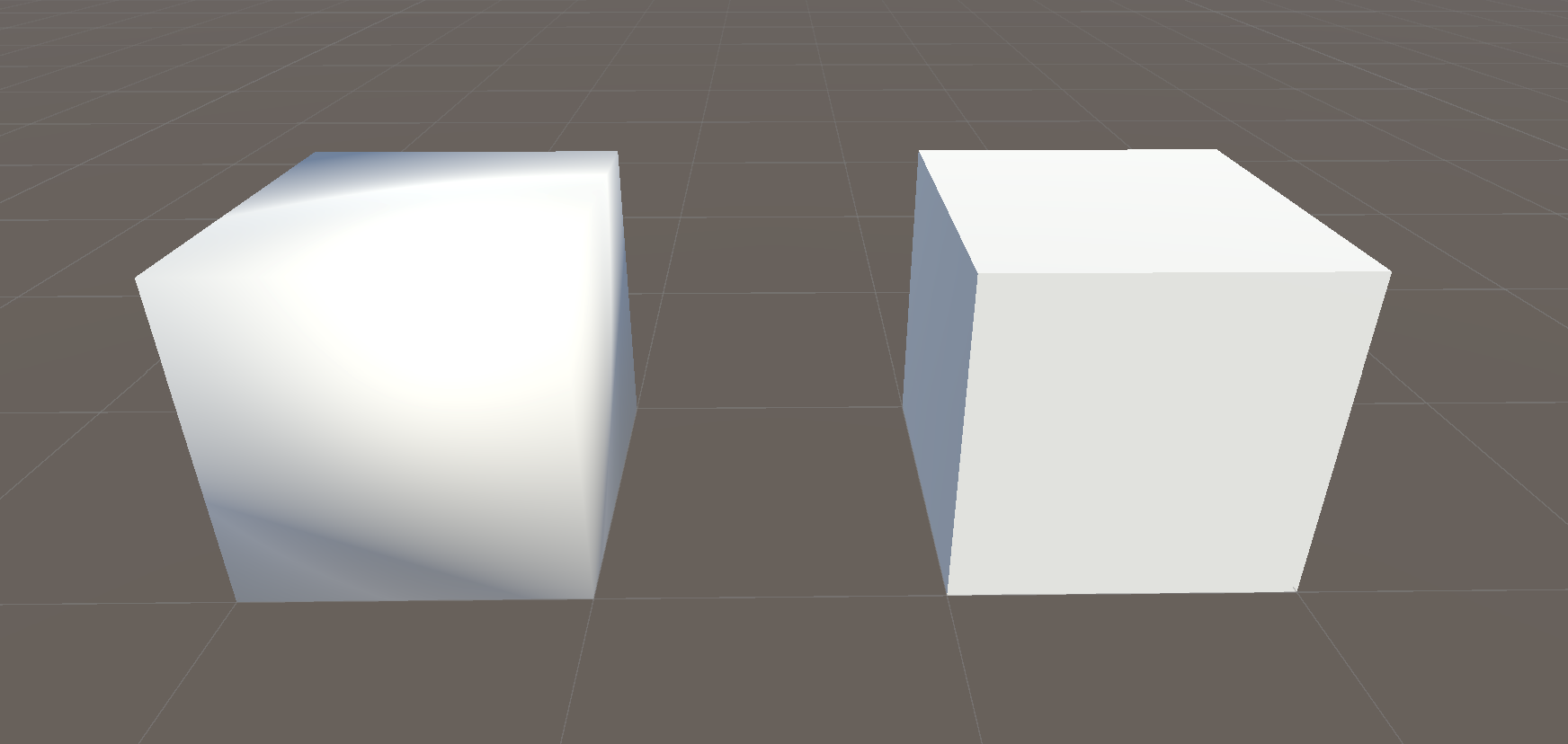
A triangles tömb szintén egydimenziós adatszerkezet, amely indexeket (Integer) tartalmaz, amelyek a vertices tömbre mutatnak. A tömb 3-as indexcsoportonkként van értelmezve. Minden hármas csoport egy háromszöghöz rendeli hozzá a háromszög csúcsainak a vertices tömbben definiált pozícióját indexelés segítségével. Ezekből következik, hogy a triangles tömb elemeinek száma mindig 3 többszöröse. [8]

## Flat Shading vs Smooth Shading

A Shading a Mesh megvilágítására vonatkozó kifejezés. Grafikai megjelenítéskor a megvilágítás a vertex-ek normáljaiból vannak kiszámítva. Egy vertex normálja az élektől függ, amelyeknek tagja. Ha egy vertex csak egy háromszöghöz tartozik az azt jelenti, hogy csak kettő élnek a végpontja, amelyekből egyértelműen kiszámítható a normálvektor. Ha egy vertex több háromszögnek, vagyis kettőnél több élnek a végpontja, akkor a normált az adott háromszögekhez tartozó élekből kiszámított normáloknak az átlagolásával lehet megkapni. [9] [10]

Flat Shading-nek nevezzük amikor az éleken és sarkokon találkozó háromszögek külön vertex-ekkel rendelkeznek, ezért a megvilágításuk is határozottan különböző, vagyis az él/sarok tisztán kivehető.

Smooth Shading-nek nevezzük amikor az éleken és sarkokon találkozó háromszögek ugyan az a vertex-et használják, tehát a felületek megvilágítása folytonosan változik oldalról oldalra, ezért az élek és sarkok nehezebben kivehetők.



2. ábra Smooth Shading (bal) vs Flat Shading (jobb)   
Forrás: Saját ábra

## Marching Cubes Algoritmus

A Marching Cubes algoritmus a számítógépes grafikában használt módszer, amellyel háromdimenziós skalármezőből poligon hálót lehet létrehozni. Különösen hasznos „isosurface” renderelésére. Az algoritmust William E. Lorensen és Harvey E. Cline fejlesztette ki az 1980-as években az amerikai General Electric számára folytatott kutatásuk közben. A kutatás célja az MRI és CT scan-ek effektív számítógépes megjelenítése volt. [11] [12]

A háromdimenziós skalármező alatt egy térbeli négyzetrácsot kell elképzelni, amelynek minden pontja képvisel egy adott értéket. Ezeknek a térbeli pontoknak az értelmezésével lehet felületeket létrehozni, például sűrűségre hivatkozva. Például úgy, hogy a pontok, amelyek egy alakzat belsejében helyezkednek el magas konstans értékkel rendelkeznek, míg amik az alakzaton kívül vannak, alacsony értéket vesznek fel.

Az isosurface egy olyan felület, amely állandó értékű pontokat (pl. nyomás, hőmérséklet, sűrűség) képvisel egy térfogaton belül; más szóval, ez egy olyan folytonos függvény szinthalmaza, amelynek tartománya a 3 dimenziós tér. A pontok általában 3 dimenziós négyzetrács mentén helyezkednek el és a felvett értékeik határozzák meg a megjelenített alakzat felszínét.

## Hol használatos a Marching Cubes algoritmus

A Marching Cubes algoritmust széles körben használják olyan alkalmazásokban, mint az orvosi képalkotás, a tudományos vizualizáció és a számítógéppel segített tervezés (CAD), összetett háromdimenziós struktúrák skaláris adatokból történő megjelenítésére.

### Orvosi Tudomány

A Marching Cubes algoritmus egyik elterjedt felhasználási területe az orvosi tudomány. Az MRI (Magnetic resonance imaging) és CT (computed tomography, vagy CAT, computed axial tomography) scan-ek a technológiájából adódóan e algoritmus használatához megfelelő adatokat generálnak. [13] [14]

Az ilyen scan-ek általában 2 dimenziós képekként vannak megjelenítve szeletenként, ahol egy kép egy adott pozícióban lévő metszetet szimbolizál szürkeárnyalatos módon. A különböző árnyalatok az adott metszet adott pontjainak az intenzitását mutatja. A CT és MRI szkennerek különböző szövetekről különböző intenzitású jeleket olvasnak le. Ezeknek a scan-eknek a precizitása nagyon magas, ezért könnyen különbséget tudnak tenni akár erek és izomszövet közt is. [13] [14]

Ezeknek az értékeknek a megjelenítése lehetséges a Marching Cubes algoritmussal, úgy, hogy ha ismertek a különböző szövetekhez tartozó jellemző konstansokat, akkor a scan értékeiből és térbeli pozíciójukból kiszámítja a különböző alakzatok felületét, például a csontoknak az alakját.

### CAD és szimulációs szoftverek

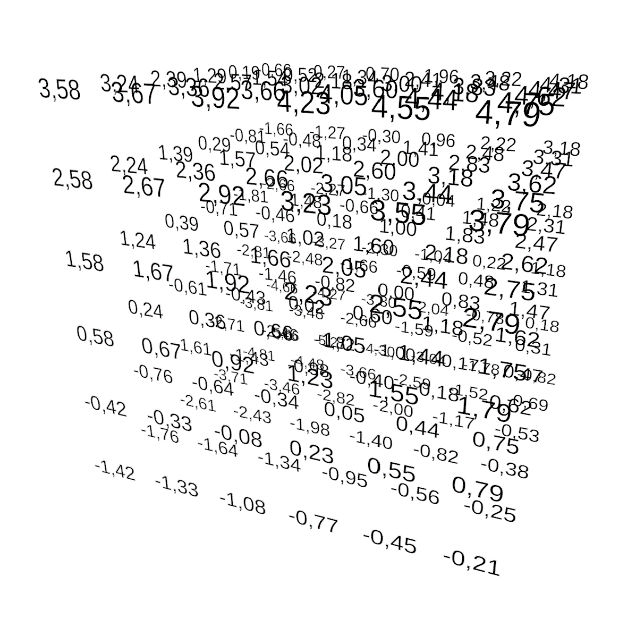
A Marching Cubes algoritmust CAD (számítógéppel segített tervezés) szoftverek is alkalmazzák, ahol a felhasználó saját maga készíti el az alakzatot, amelyet a számítógép megjelenít. A Marching Cubes algoritmus szimulációk kiértékelésére is használatos, például folyadékdinamikai szimulációk vizualizálására. Egy Marching Cubes által megalkotott isosurface reprezentálhat repülőgép propeller által keltett lökéshullámokat.

Érdemes megjegyezni, hogy bár a Marching Cubes úttörő volt a bevezetésekor, az algoritmust később változtatták és fejlesztették olyan problémák megoldására érdekében, mint a topológiai helyesség és a háló minősége.

## Az algoritmus működése

### Skalármező

Az első lépés egy háromdimenziós skalármező meghatározása, ahol a térben egy kockaháló mentén minden pont egy skalárértéknek felel meg. Ezek a skaláris értékek különféle tulajdonságokat jelenthetnek, például sűrűséget, hőmérsékletet vagy mesterségesen generált értékek is lehetnek.



3. ábra Skalármező   
Forrás: Saját ábra

Egy kockahálóban minden pont nyolc kockának a sarka egyszerre. Ebből fakad, hogy minden skalárérték egyszerre nyolc kockához tartozik. (Kivéve, ha a háló valamely oldalán vagy élén helyezkedik el)

### Felület meghatározása

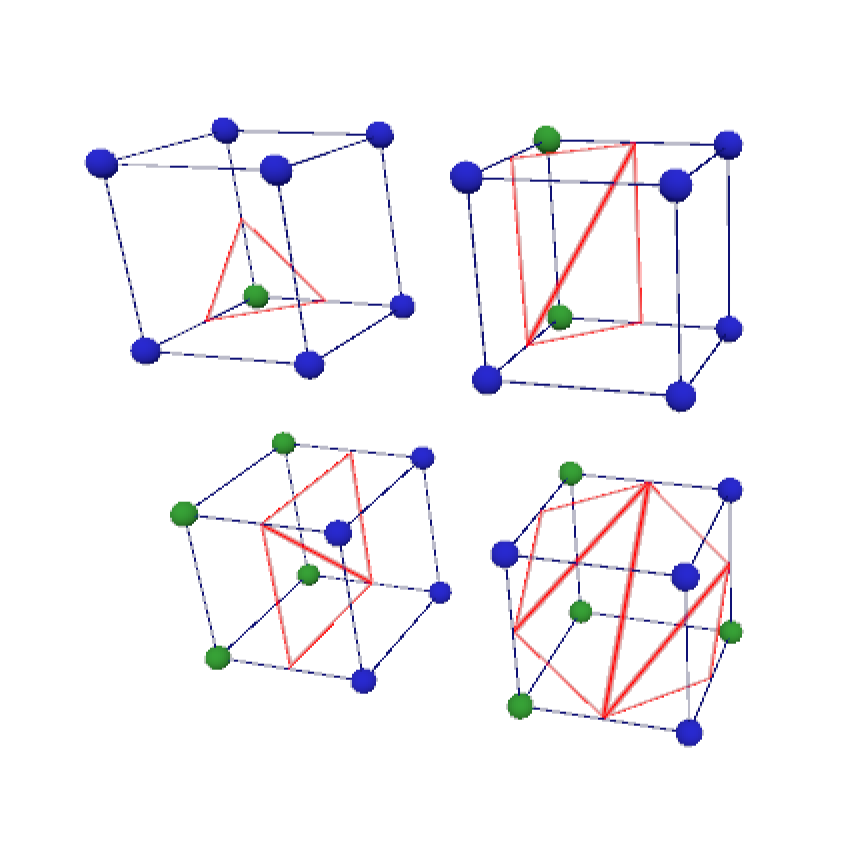
Az algoritmus minden kockánál kiértékeli a skaláris értékeket a nyolc csúcsnál és meghatározza, hogy a felület metszi-e a kockát.



4. ábra Kiértékelt skalármező   
Forrás: Saját ábra

Ez úgy történik, hogy a skaláris értékeket egy előre meghatározott konstanssal hasonlítja össze, amely a vizsgált felületet reprezentáló állandó érték. A konstansnál kisebb értékkel rendelkező pontok például a felület alatt, míg a konstansnál nagyobb értékek a felület felett helyezkednek el.

Ez egy bináris döntés a kocka mind a nyolc csúcsán. Ezen összehasonlítások alapján egy kocka 28 = 256 lehetséges konfiguráció egyikébe eshet.

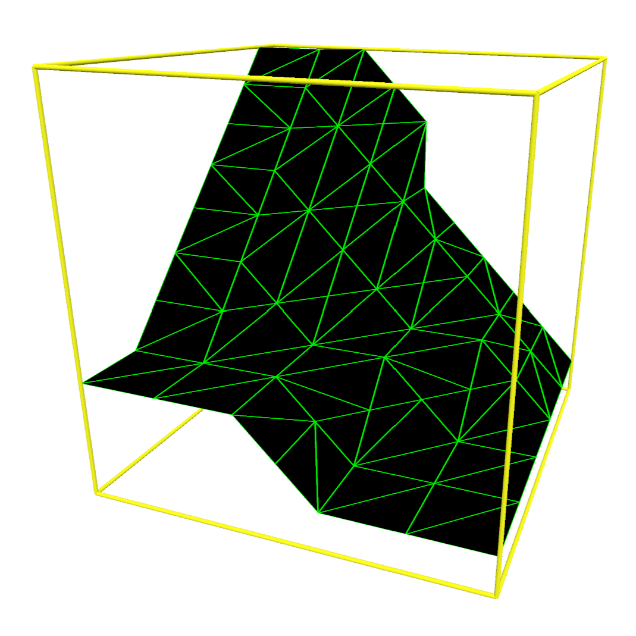


5. ábra Példa négy konfigurációra   
Forrás: Saját ábra

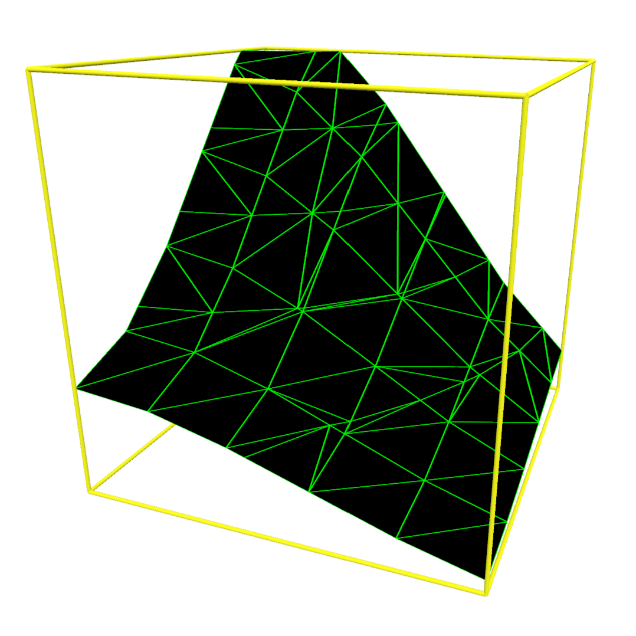
A kocka konfigurációja határozza meg, hogy a felület azon részét képező háromszögek pontjai mely éleken helyezkednek el.

### Interpoláció

Ha a kocka konfigurációja ismert, az algoritmus meghatározza a felület metszéspontjait a kocka éleivel.



6. ábra Simítatlan felület   
Forrás: Saját ábra



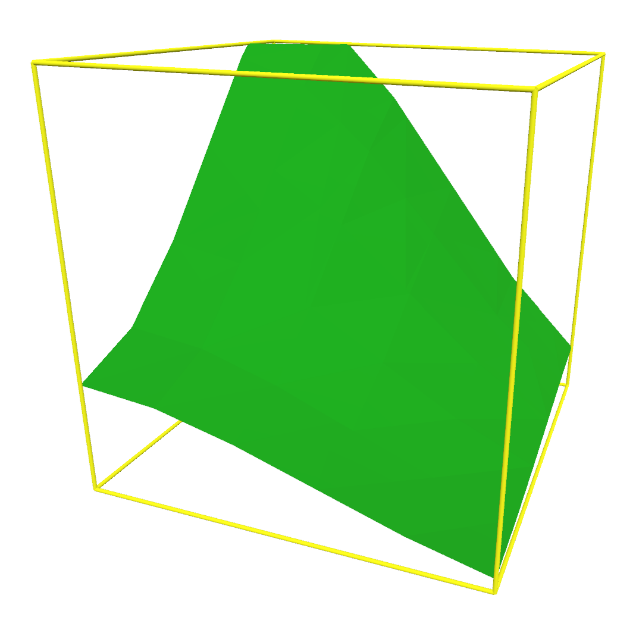
7. ábra Simított felület   
Forrás: Saját ábra

A legegyszerűbb megoldás veszi a felezőpontot a két csúcs között és ott halad át a felület. Ez összeállítás után durva és pontatlanabb felszínt eredményez, amely vízszintes, függőleges vagy 45°-os lapokból áll.

A matematikailag korrekt megoldás a metszéspontokat a kocka csúcsainak skalárértékeiből interpolálja oly módon, hogy az értékek közötti különbség fogja meghatározni a felület metszéspontját és a kocka élén való elhelyezkedését. Ez összeállítás után simább és pontosabb felszínt eredményez.

Ezen metszéspontok felhasználásával az algoritmus minden egyes kockányi térfogaton visszafejti a felületet háromszögek halmazára.

### Háló elemeinek összeállítása



8. ábra Megjelenített mesh   
Forrás: Saját ábra

Végül az egyes kockákhoz létrehozott halmazokat összeilleszti, hogy egy folytonos hálót képezzenek, amely a felületet képviseli. Ez a háló ezután hagyományos grafikai technikákkal megjeleníthető.

## A Sokszöghalmaz Előállítása

Hogy a folyamat könnyebben értelmezhető legyen, az algoritmus három előre definiált segédhalmazt használ. Ezek a halmazok konstans értékeket tartalmaznak, amelyek irányítják az algoritmust, hogy elérjen egy adott konfigurációig, amelyet már használni lehet.

### Lookup Table

A Marching Cubes algoritmusban a kockák limitálva vannak 256 különböző konfigurációra oly értelemben, hogy mely éleken helyezkednek el a háromszögek csúcsai, amelyek az adott konckán belüli felületet reprezentálják. Ezek a konfigurációk előre ismertek, ezért fölösleges lenne őket újra kiszámolni minden egyes alkalommal. Erre az algoritmus egy „Lookup Table”-t használ, amely 256 sorral rendelkezik.

1. public static readonly int[,] TriangleTable = new int[,] {

2. {-1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1},

3. {0, 8, 3, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1},

4. {0, 1, 9, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1, -1},

5. ...

6.

7. P. Bourke, „Polygonising a scalar field,” Paul Bourke, 1994. [Online].  
8. Available: https://paulbourke.net/geometry/polygonise/.

9. [Accessed: 20 September 2024].

Minden sorban, felsorolás szerűen jelen vannak az éleknek az indexei, amelyeken egy háromszög csúcs jelen van. Egy kockán belül maximum 5 háromszög lehet jelen, ezért a Lookup Table egy 256 x 15-ös (vagy 16-os) kétdimenziós tömbként értelmezhető. A sorok indexei jelentik az adott konfigurációt, a sorokon belül pedig hármas csoportokban jelen vannak a háromszögek csúcsaihoz tartozó indexek. A kocka éleinek a pozíciója, vagyis a kezdő és végpontja ismert, tehát ha tudjuk melyik élen van az adott pont, amit a TriangleTable indexekkel megad az adott konfiguráción belül, akkor az él két csúcsa között csak interpolálni kell a pontnak a pozícióját.

Megjegyzés:

A TriangleTable -1 értékei azt jelölik, hogy nincs több index az adott sorban, tehát a sornak a bejárását meg lehet szakítani. A sorok a példában 16 elemet tartalmaznak, azonban az utolsó mindig -1. Ez mindössze preferencia kérdése. Ha FOR ciklust használunk a sorok bejárására, az mindig megáll a 15. elemnél, ha viszont WHILE ciklust használnánk annak a -1 jelezné, hogy ki kell lépni a ciklusból.

Az 1. és 256. sor csak -1-et tartalmaz, mivel azokban a konfigurációkban a felület nem halad át a kockán, mert vagy felette vagy alatta halad el. A legtöbb implementáció, ha a konfigurációra az elsőt vagy az utolsót kapja, akkor azonnal a következő kockára ugrik. Ez nem kötelező, viszont megspórol pár műveletet.

1. if (configIndex == 0 || configIndex == 255) continue;

### Edge Table

Ez a táblázat mindössze a kocka éleit definiálja úgy, hogy az algoritmust átirányítja a kettő megfelelő sarokhoz, amelyek az él kezdő és végpontjai. Az átirányítás a Corner Table-ben történik indexelés segítségével.

1. public static readonly int[,] EdgeTable = new int[12, 2] {

2. {0, 1},

3. {1, 2},

4. {3, 2},

5. ...

6.  
7. /\* Source: S. Lague, „Marching-Cubes,” Sebastian Lague, 5 May 2019. [Online].  
8. Available: https://github.com/SebLague/Marching-  
9. Cubes/blob/master/Assets/Scripts/Compute/Includes/MarchTables.compute.  
10. [Accessed: 13 November 2024]. \*/

### Corner Table

Ebben a táblázatban a kocka csúcsai vannak jelen 3 dimenziós vektorok formájában. Ezeket a vektorokat hozzáadva a kockának a (0, 0, 0) csúcsához mind a nyolc csúcsot el lehet érni.

1. public static readonly Vector3Int[] CornerTable = new Vector3Int[8] {

2. new Vector3Int(0, 0, 0),

3. new Vector3Int(1, 0, 0),

4. new Vector3Int(1, 1, 0),

5. new Vector3Int(0, 1, 0),

6. new Vector3Int(0, 0, 1),

7. new Vector3Int(1, 0, 1),

8. new Vector3Int(1, 1, 1),

9. new Vector3Int(0, 1, 1)

10. };

11. /\* Source: S. Lague, „Marching-Cubes,” Sebastian Lague, 5 May 2019. [Online].  
12. Available: https://github.com/SebLague/Marching-  
13. Cubes/blob/master/Assets/Scripts/Compute/Includes/MarchTables.compute.  
14. [Accessed: 13 November 2024]. \*/

Az Edge Table és a Corner Table használata nélkül is meg lehetne írni az algoritmust, ám mivel ezek az értékek konstansok és fontos, hogy mindig ugyan olyan sorrendbe következzenek a konfiguráció kiértékelése során, ezért egyértelmű, hogy ha kiemeljük őket konstans tömbökbe, az lecsökkenti a hibalehetőségek számát és kompaktabbá, jobban olvashatóvá teszi a kódot. Ennek a folyamatnak elhanyagolható műveletigénye van ahhoz képest, hogy mennyivel olvashatóbbá teszi a kódot.

Egy példa:

Az alább látható FOR ciklusban a kocka sarkai vannak kiértékelve. Ha a tömbön végigmegyünk a 0-ás indextől kezdve, akkor mindig ugyan abban a sorrendben fognak következni a csúcsok, amelyeket egy indexel elérünk, nem kell minden csúcsnak a háromdimenziós eltolását kiírni a (0, 0, 0) csúcstól.

1. int GetCubeCongif(float[] cube)

2. {

3. int configIndex = 0;

4. for (int i = 0; i < 8; i++)

5. if (cube[i] > surfaceHeight)

6. configIndex |= 1 << i; //bitshift

7. return configIndex;

8. }

Ezek a tömbök nagyon fontosak, hiszen az algoritmus mindig ugyan abban a sorrendben kell, hogy kiértékelje az adott konfigurációt, főleg, hogy a kód szimplifikálása érdekében a konfiguráció meghatározásakor bitshift-et használ. A bitshift csak akkor fogja a megfelelő konfigurációt visszaadni, hogyha a konfigurációk is sorban vannak és a csúcsok kiértékelése is minden egyes alkalommal ugyan abban a sorrendben történik.

# Követelmények

## Alap követelmények

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Megnevezés | Leírás | Prioritás |
| Futtatható állomány | Alkalmazás indítása egy futtatható állományból | Magas |
| Főmenü | Az alkalmazás indítás után a főmenüt jeleníti meg | Magas |
| Játék indítása főmenüből | A főmenüből lehet indítani a játékot | Magas |
| Játék megállítása kilépés nélkül | Játék közben ESC megnyomására a játék ideiglenesen megáll amíg újra nem indítják | Közepes |
| Játék közbeni főmenübe kilépés | A játékból lehetőség van a főmenübe visszalépni | Magas |
| Alkalmazásból való kilépés főmenün keresztül | A főmenüben lehetőség van kilépni az alkalmazásból | Magas |
| Alkalmazásból való kilépés PAUSE menüből | A játék ESC gombbal való megállítását követően lehetőség van kilépni az alkalmazásból | Alacsony |
| PAUSE menü | Játék közben ESC gombbal való megállításkor menü megjelenítése | Közepes |

1. *táblázat Alap követelmények*

## Játékmenet követelmények

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Mozgás | | |
| Megnevezés | Leírás | Prioritás |
| Kamera irányítása egérrel | Egér mozgatásával a kamera mozog a függőleges és vízszintes tengely mentén is | Magas |
| Előre mozgás – W | W megnyomására a karakter előre mozog (horizontális síkon kameraszöghöz képest relatív) | Magas |
| Hátra mozgás – S | S megnyomására a karakter hátra mozog (horizontális síkon kameraszöghöz képest relatív) | Magas |
| Jobbra mozgás – D | D megnyomására a karakter jobbra mozog (horizontális síkon kameraszöghöz képest relatív) | Magas |
| Balra mozgás – A | A megnyomására a karakter balra mozog (horizontális síkon kameraszöghöz képest relatív) | Magas |
| Ugrás – Space | A Space megnyomására a karakter 1 blokknyit ugrik felfele | Közepes |
| Guggolás – Bal CTRL | A bal-CTRL megnyomására a karakter magassága lecsökken és sebessége lassabb lesz | Alacsony |
| Futás – Bal Shift | A bal-shift megnyomására a karakter gyorsabb lesz | Alacsony |

1. *táblázat Játékmenet követelmények*

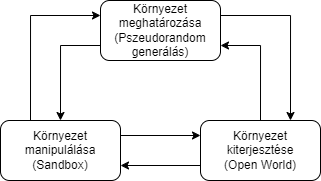
|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Környezeti interakció | | |
| Megnevezés | Leírás | Prioritás |
| Ütközés környezeti elemekkel | A karakter a környezetet alkotó objektumokkal (talaj, növényzet…) ütközik, vagyis nem tud rajtuk keresztül menni/esni | Magas |
| Játékfizika alkalmazása | Lefele ható gravitáció, talajjal való súrlódás | Magas |
| Blokk kiütése – Bal egérgomb | Bal egérgombbal a blokk, amelyre a játékos néz megsemmisül, ha a blokk elérhető távolságon belül van | Közepes |
| Blokk lerakása – Jobb egérgomb | Jobb egérgomb megnyomásával egy blokk jelenik meg a környezet felszínén, ha a felszín elérhető távolságban van. | Közepes |

1. *táblázat Környezeti interakció*

## Módszertan kiválasztása

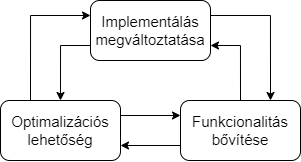
A videójáték fejlesztés, még technikai szinten is beláthatatlan. Nagyon gyakran lehet beleütközni technikai imitációkra, amelyek visszalépést igényelnek egy alacsonyabb szintre, hogy az adott funkciót meg lehessen valósítani. Épp ellenkező esetben az is lehetséges, hogy egy olyan technikát fedezünk fel, vagy egy olyan technológia implementálására került sor egy előző lépésben, amely eddig nem megvalósítható elemek hozzáadását teszi lehetővé.

Ez egy olyan komplex alkalmazási területre kifejezetten igaz, mint az Open World, Sandbox, vagy a procedurálisan generált környezet. Ezen elemek mindegyike befolyásolja egymást és önmagukban is gyakran az implementáció megváltoztatását igénylik a fejlesztés során.



9. ábra Három fő fejlesztési irány   
Forrás: Saját ábra

Maga a Marching Cubes algoritmus, amely a Voxel alapú környezet manipulációért felel is legalább 3 fázis között fog iterálni a fejlesztés során.



10. ábra Fejlesztési ciklus   
Forrás: Saját ábra

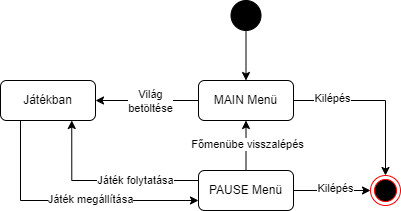
Az implementálás magától a futtató hardware-től is függ, hiszen lehetőség van CPU-n és GPU-n is végezni a számításokat és mindegyik módszer különböző lehetőségeket nyújt különböző problémák megoldására míg maguknak a módszereknek is vannak előnyei és hátrányai.

**Ezeket figyelembe véve a legmegfélőbb projektmenedzsment modell az Agilis.**

Agilis projektmenedzsment mellett lehetőség van a projektet kisebb részekre bontani és mindig az adott részre fókuszálni, majd, amikor egy-egy rész elkészült megvizsgálni, hogy a fejlesztés milyen hatással volt a már létező elemekre és implementációjukra.

Ezek alapján az agilis projektmenedzsment lehetőséget ad visszalépésre és mindig az adott állapot szerint optimalizálni/fejleszteni/bővíteni a már elkészült elemeket.

## Alkalmazás Állapotgépe



11. ábra Alkalmazás állapotgépe   
Forrás: Saját ábra

Az alkalmazáson belüli navigáció megtervezésekor az általános videójátékoknál alkalmazott modell volt figyelembe véve.

### MAIN Menü

Az alkalmazás indításakor ebbe a menübe helyezi a felhasználót. Nagy általánosságban ebből a menüből érhető el minden a videojátékokban. Beállítások, mentett állapototok, egyjátékos vagy többjátékos (online/local) mód. Az adott alkalmazásban beállítási lehetőségek még nincsenek és mindössze egyjátékos local módra van lehetőség. Ez is innen indítható.

### Játék közben

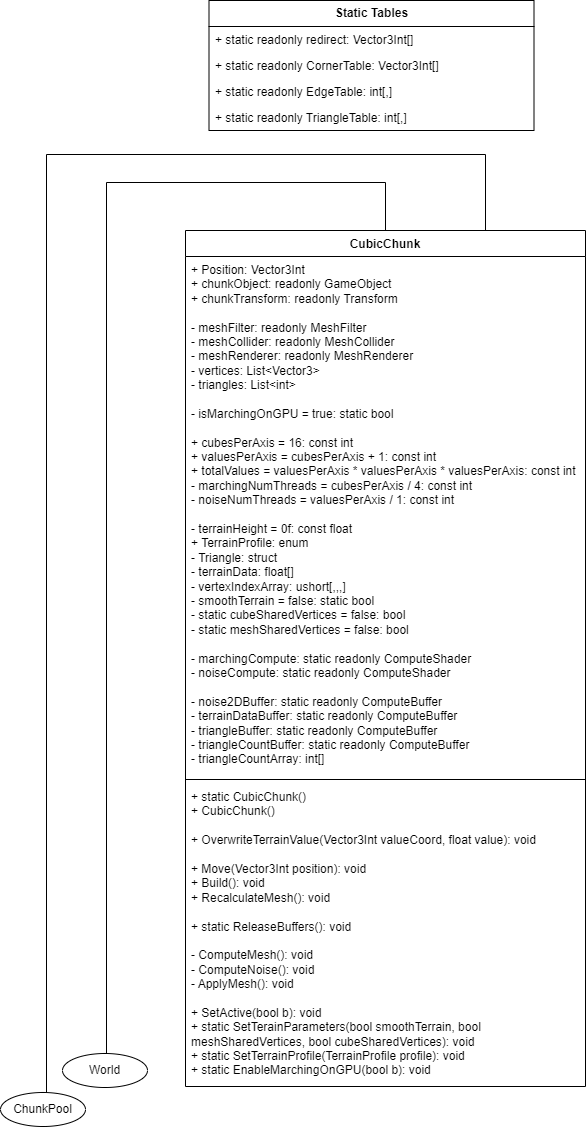
Játék közben a játékos kapcsolatba lép a játék világával. Ezen belül mozog és kedve szerint teszi a dolgát. Az egérmutató ebben az állapotban láthatatlan és a monitor közepére van rögzítve, hogy ne csússzon ki az alkalmazás ablakából.

### PAUSE Menü

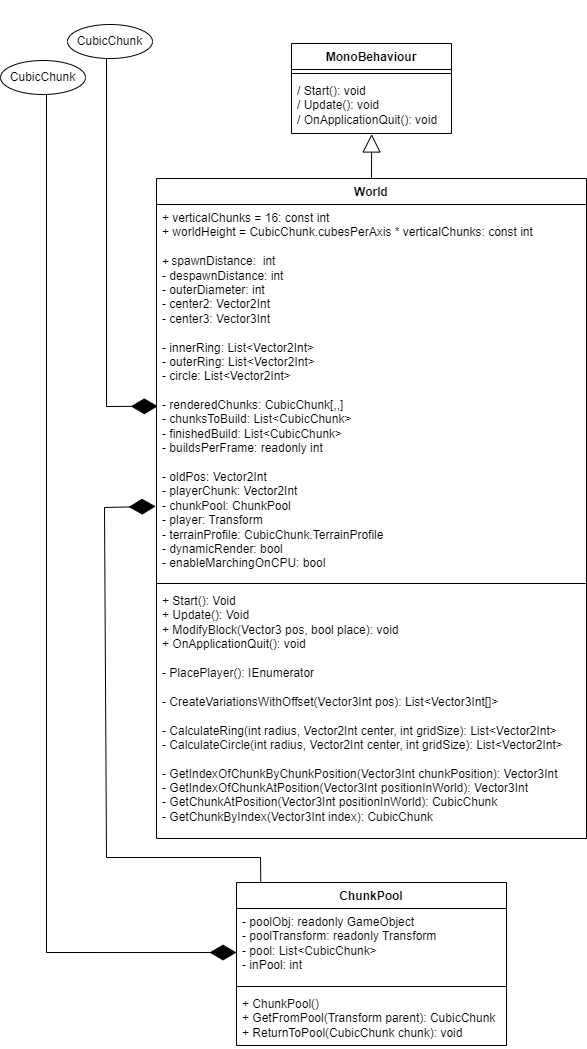
Az egyjátékos módban futó játékokat általában meg lehet állítani. Ekkor a háttérben a játék világában az események megállnak és egy kisebb menü van prezentálva a játékos elé. Ebből a menüből általában lehetőség van visszalépni a főmenübe, elmenteni az adott állást vagy a játék futása közben is módosítható beállításokat elérni. Az ilyen menük sok esetben gyors kilépés opciót is tartalmaznak, amely elmenti az adott állást és kilép az alkalmazásból.

Ebben az esetben a PAUSE menü mindössze két lehetőséggel szolgál: visszalépés a főmenübe vagy kilépés az alkalmazásból.

## Osztálydiagram



. ábra Osztálydiagram A   
Forrás: Saját ábra



. ábra Osztálydiagram B   
Forrás: Saját ábra

Az alkalmazás három fő komponense a három osztály, amely a játék világán belül felelős a környezet felépítéséért és megjelenítéséért.

### World

A World osztály az egyetlen, amely MonoBehaviour-ből származtatik. A MonoBehaviour a Unity beépített osztálya. Ebből az osztályból származó osztályokat lehet GameObject-ekhez, vagyis a játékon belüli objektumokhoz csatolni. Ha egy MonoBehaviour-ből származtatott osztály egy GameObject-hez van csatolva, akkor a játék részévé válik. Ez azért szükséges, hogy a Unity játékmotorral szinkronban tudjon működni. Ezt egy jó pár beépített metódus teszi lehetővé, amiket a MonoBehaviour-ből származtatott osztály felüldefiniál.

* Start(): A Start metódus az adott objektum indításakor fut le, az első képkocka előtt, amelyben az adott objektum aktív. Ezesetben az objektum, amihez a World script csatlakozik mindig aktív, vagyis a Start metódusa a pálya betöltése előtt egy képkockával kerül meghívásra. Ilyenkor történnek meg a kellő inicializálások és ellenőrzések.
* Update(): Az Update metódus a játék futása során minden képkockában meghívódik, ha az adott objektum aktív. Ebben a metódusban foglalnak helyet olyan kódrészletek, mint például a Chunk Loading System elemei, amely minden képkockában ellenőrzi, hogy a játékos körzetében be van-e töltve a világ.
* OnApplicationQuit(): A metódus neve eléggé magától értetődő. Közvetlenül azelőtt fut le, mielőtt az alkalmazás kilépne. Ez azért hasznos, mert vannak különböző buffer-ek, amiket fel kell szabadítani kilépés előtt.

### CubicChunk

Ez az osztály tartalmazza magának a Marching Cubes algoritmusnak az implementálását. Önmagában ez az osztály csak egy adott térrészt kezel a világon belül, ezért ez példányosítva van a ChunkPool osztály segítségével.

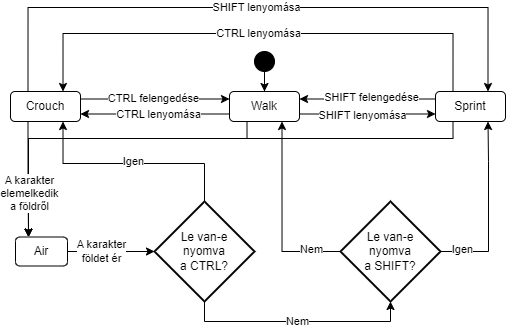
Ezekből a példányokból az adott pillanatban aktívakat tárolja a World osztály egy listában, míg az inaktív, újrafelhasználásra váró példányok visszahelyeződnek a ChunkPool belső listájába.

### ChunkPool

A ChunkPool osztály felelős a CubicChunk osztályból való példányok újrafelhasználásáért. Ez a kellő hatásfok megtartásáért fontos, hiszen sok objektum folytonos létrehozása erőforrásigényes művelet és szükségtelen is, hogyha a már nem szükségeltetett objektumokat az azonos típusból újra fel lehet használni. Ezt egy belső lista és kettő metódus segítségével végzi.

## Mozgásrendszer állapotgépe

A mozgásrendszer a játék kulcsfontosságú része. Ez teszi lehetővé, hogy billentyűzetről és egérről bevitt parancsokkal a játékos fel tudja fedezni a játék világát. A mozgásrendszer a first person vagy third person játékokban alkalmazott szokásos struktúrát követi a 4 alap állapottal.



14. ábra Mozgásrendszer állapotgépe   
Forrás: Saját ábra

A játékos karaktere vagy a földön van vagy a levegőben. A földön 3 különböző állapot van definiálva.

* Walk (séta): A karakter sebességére vonatkozik. Általános sebességű mozgás.
* Sprint (futás): A karakter gyorsabb sebességgel közlekedik.
* Crouch (guggolás): A karakter lassabb sebességgel közlekedik és a karakter hitbox-ának magassága is lecsökken.

# Implemetálás

## A Marching Cubes Algoritmus hátulütői

### Műveletigény

1. *képlet Marching Cubes algoritmus műveletigény 1*

és

1. *képlet Marching Cubes algoritmus műveletigény 2*

Ahol:

Feltételezve, hogy a skaláris értékekkel rendelkező kockaháló dimenziói megegyeznek (vagyis a tér kocka alakú) és a dimenziókat n-el jelölve szemléletesebb a műveletigény:

1. *képlet Marching Cubes algoritmus műveletigény 3*

és

1. *képlet Marching Cubes algoritmus műveletigény 4*

Ahol:

A Marching Cubes algoritmus, mivel 3 dimenziós térben dolgozik n3 műveletigénnyel rendelkezik. A konfigurációk megállapításához mind a nyolc csúcsot ki kell értékelni minden n-edik kockánál. Ez nem változik, vagyis a „térfogat nyolcszorosával” megegyező műveletet mindig végre kell hajtani. Ez 10 x 10 x 10-es nagyságú tér esetén 1000 x 8, de 100 x 100 x 100-as nagyságú tér esetén már 1.000.000 x 8, ami 8.000.000 (nyolcmillió).

A konfigurációk kiértékeléséhez minden n-edik kockánál végre kel hajtani legalább 1 nem teljes értékű műveletet vagy legfeljebb 15 teljes értékű műveletet. Az első (0.) vagy utolsó (255.) konfiguráció csak egy, a többi konfigurációhoz képest nem teljes értékű műveletet igényel, ami megállapítja, hogy a felület nem halad át a kockán. A többi konfiguráció esetében 3, 6, 9, 12 vagy 15-ször ki kell számolni a háromszögek csúcsainak pozícióit.

### Magas Vertex Szám

Az algoritmus alapból minden kocka és kocka között és kockán belül is megkülönbözteti kettő háromszögnek ugyanazon pontját. Ez nem minden alkalmazási területen probléma, sőt néhol még preferált is. Ahol az úgynevezett flat shading szükséges, ott a vertex-ek nem lehetnek közösek. (Ez általánosságban igaz, manuálisan meg lehet kerülni a problémát)

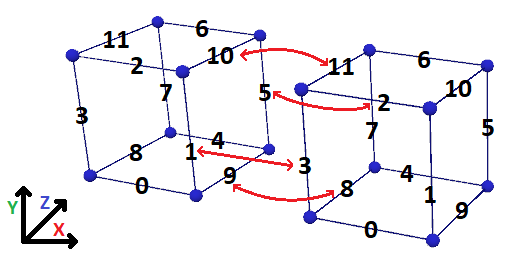
Videójátékok esetében viszont, ahol a terep dinamikus változtatása a cél a magas vertex szám és az ahhoz tartozó magas műveletigény megnehezíti a frissítési ráta tartását. Minden változtatáskor újra kell számolni az egész mesh-t, ami időbe telik. Emellett magas vertex számú mesh megjelenítése magasabb memóriahasználattal jár.

## Az algoritmus optimalizálása

Az algoritmus optimalizálatlan működése abból fakad, hogy a kockákat és a kockák konfigurációin belüli háromszögeket is külön kezeli, annak ellenére, hogy egy összefüggő hálót alkot belőlük.

## Kocka és kocka közötti optimalizálás

Ennek megoldása egy olyan adatszerkezet bevezetése, amely számontartja mely értékeket számolta már ki az algoritmus egy előző iterációban és hogy az értékek hol találhatóak meg. Ezek az értékek a kiszámolt vertex-ek (3 dimenziós vektorok). Minden vertex-el van tárolva a vertices listában, ezeknek az indexeit pedig be kell illeszteni a triangles listába. Ahhoz, hogy az algoritmus össze tudja kötni a kiszámolandó vertex-et az előzőleg kiszámított párjával vagy párjaival, egy 4 dimenziós tömböt használ. Az első három dimenzió az adott kocka térbeli pozícióját határozza meg, a negyedik dimenzió a kocka 12 élét tartalmazza.



15. ábra Kockák közötti kapcsolat   
Forrás: Saját ábra

1. int[,,,] vertexIndexArray = new int[X, Y, Z, 12];

A tömbben az algoritmus eltárolja azt az indexet, ahol az adott vertex található a vertices listában. Később, ha újra szükség van egy vertex-re, akkor azt nem kell kiszámolni, hanem a tömbben visszanézve indexe segítségével referálni lehet. A tömb -1 -el van inicializálva, ha valahol -1 szerepel, az azt jelenti, hogy nincs rendelkezésre álló index, vagyis nincs kiszámított vertex amire referálni lehetne. Például:

1. int index = vertexIndexArray[x - 1, y, z, 1];

2. if (index != -1)

3. {

4. vertexIndexArray[x, y, z, 3] = index;

5. triangles.Add(index);

6. }  
7. else ...

A fenti példában az adott kocka 3-as számú élén lévő vertex-et akarjuk megkeresni. Ehhez vissza kell lépni egyet az X tengelyen, majd ellenőrizni, hogy létezik-e már korábban kiszámolt vertex a jelenlegi 3. számú éllel megegyező, az előző kockán 1. számú élhez. Ha igen, vagyis, ha az index nem egyenlő -1 -el, akkor azt az indexet tovább lehet hozni az adott kocka 3. élére és be lehet illeszteni a triangles listába, különben ki kéne számolni.

Azonban ahhoz, hogy ezt a folyamatot automatizálni lehessen szükség van egy pár feltételre. A fenti példa feltételezi, hogy létezik az X tengelyen előző kocka és tudja, hogy a 3. élnek a párja az 1. él. Algoritmikus módon ezeket a feltételeket mindig ki kell értékelni és irányítani kell az algoritmust, hogy a megfelelő éleket válassza egy listából, ahol az összes él közötti kapcsolat fel van tüntetve.

Az élek közötti kapcsolatot egy 3 dimenziós vektorokból álló tömb tartja számon:

1. public static readonly Vector3Int[] redirect = new Vector3Int[]

2. {

3. // X Y Z

4. new Vector3Int(-1, 2, 4), // 0

5. new Vector3Int(-1, -1, 5), // 1

6. new Vector3Int(-1, -1, 6), // 2

7. new Vector3Int( 1, -1, 7), // 3

8. new Vector3Int(-1, 6, -1), // 4

9. new Vector3Int(-1, -1, -1), // 5

10. new Vector3Int(-1, -1, -1), // 6

11. new Vector3Int( 5, -1, -1), // 7

12. new Vector3Int( 9, 11, -1), // 8

13. new Vector3Int(-1, 10, -1), // 9

14. new Vector3Int(-1, -1, -1), // 10

15. new Vector3Int(10, -1, -1) // 11

16. }

A tömb indexei jelentik az adott élnek a sorszámát, aminek a párját keressük az előző kockában. A vektorok X, Y és Z elemei jelentik, hogy az adott tengelyen van-e párja az élnek és ha igen, mi annak a sorszáma az előző kockában. Például, a 0. élnek kettő párja is van, az Y és Z tengelyen. Az X komponens értéke -1, vagyis a 0. élhez nem tartozik pár az X tengelyen. Ha tudjuk, hogy az Y tengelyen van előző kocka, vissza lehet nézni annak a kockának a 2. élét és megvizsgálni, hogy van-e ott érvényes index eltárolva. Ha nincs, vagy ha nincs az Y tengelyen előző kocka, akkor még tovább lehet lépni a Z tengelyre, ha ott létezik előző kocka. A Z tengelyen a 0. él párja a 4. él az előző kockából. Ha ott van eltárolva érvényes index akkor azt fel lehet használni.

A tömb adataiból látszik, hogy a 5., 6. és 10. élen nincs lehetőség előző értékeket visszanézni, mert nincsenek előző értékek. Ez abból fakad, hogy az algoritmus nullától felfele, mind a három tengelyen pozitív irányba járja be a teret. Ezek az élek mindig elől vannak, pár nélkül, mert a következő kocka még nincs kiszámolva. Ezen a három élen mindig ki kell számolni a vertex-eket.

Ez elől lévő élekből következik, hogy vannak hátul lévő élek is, amelyeket hátra kell hagyni, hiszen a rajtuk kiszámolt vertex-ek már nem kapcsolódnak újonnan kiszámolt vertex-ekhez. Ezek az élek a 0., 3. és 8. élek. Ezekre az élekre nem hivatkozik a tömb sehol, hiszen ezek minden lépésben hátra vannak hagyva.

Feltételek a megfelelő működéshez:

1. Létezzen az adott tengelyen előző kocka, amire hivatkozhatunk.
   * A ciklus nem az első iterációban van
2. Létezzen olyan él az előző kockában, amely az adott éllel megegyezik.
   * A redirect tömb adja meg
3. Létezzen a hivatkozott élen index, amely már kiszámolt értékre mutat.
   * Az algoritmus felépítéséből adódóan mindig igaz \*

1. if (edgeIndex == -1) break;

2. ...

4. if (x > 0 /\* <- 1. \*/ && Tables.redirect[edgeIndex].x != -1 /\* <- 2. \*/)

5. {

6. int index = vertexIndexArray[x - 1, y, z, Tables.redirect[edgeIndex].x];

7. vertexIndexArray[x, y, z, edgeIndex] = index;

8. triangles.Add(index);

9. }

10. else if ...

A fenti kódrészlet az X tengelyre vonatkozó rész. Nem tartalmazza az Y és Z tengelyeket, hiszen a kód majdnem ugyan az, csak más tengelyeken vizsgál feltételt és más tengelyen lép vissza.

\*Megjegyzés:

A 3. feltétel mindig igaz, ha túljut az algoritmus az if (edgeIndex == -1) break; kifejezésen. A lehetséges szomszédos konfigurációk és a háló folytonossága miatt az előző kockában a kapcsolódó élen (ha van ilyen) biztos van egy már kiszámított érték. Ha nem lenne, akkor a szomszédos kockák konfigurációit lehetetlen lenne összeilleszteni annak ellenére, hogy négy sarkuk, vagyis négy skaláris értékük megegyezik és ugyan arra a négy bináris értékre jutott kiértékeléskor az algoritmus a sarkokat illetően.

## Kockán belüli optimalizálás

Kockán belül is van olyan eset, akár többször is, amikor egy élen kettő, három, de lehet, hogy öt háromszögcsúcs helyezkedik el, természetesen ugyan abban a pozícióban. Ezeket újra és újra kiszámolni szintén felesleges. Ennek a problémának a megoldása az előzőekhez képest nagyon egyszerű. Mindössze annyit kell tenni, hogy az adott pozícióban leellenőrizzük, hogy nincs-e már eltárolt index, amit felhasználhatunk.

1. if (vertexIndexArray[x, y, z, edgeIndex] != -1)

2. {

3. triangles.Add(vertexIndexArray[x, y, z, edgeIndex]);

4. } else ...

## Teljes kód

1. // Tripla egymásba ágyazott for ciklus a tér bejárásához

2. for (int x = 0; x < cubesX; x++) // X tengely

3. for (int y = 0; y < cubesY; y++) // Y tengely

4. for (int z = 0; z < cubesZ; z++) // Z tengely

5. {

6. Vector3Int position = new(x, y, z);

7. // Kocka nyolc sarkán lévő skaláris értékek kiolvasása

8. float[] cube = new float[8];

9. for (int i = 0; i < 8; i++)

10. cube[i] = SampleTerrain(position + Tables.CornerTable[i]);

11. // Skaláris értékek alapján a konfiguráció meghatározása

12. int configIndex = GetCubeCongif(cube);

13. // Első és utolsó konfiguráció üres

14. if (configIndex == 0 || configIndex == 255) continue;

15. // Ciklus a konfigurációban található élekhez (max 15 darab vertex)

16. for (int vertexCounter = 0; vertexCounter < 15; vertexCounter++)

17. {

18. // Él kiolvasása a konfiguráció alapján

19. int edgeIndex = Tables.TriangleTable[configIndex, vertexCounter];

20. // Ha nincs több él amin vertex van befejeződik a ciklus

21. if (edgeIndex == -1) break;

22. // Ha az adott élre már számoltunk ki vertex-et

23. int redirect, index;

24. if ((index = vertexIndexArray[x, y, z, edgeIndex]) != -1)

25. {

26. // Index beillesztése

27. triangles.Add(index);

28. }

29. // Ha az X tengelyen van előző kocka ÉS van az adott élnek párja

30. else if (x > 0 && (redirect = Tables.redirect[edgeIndex].x) != -1)

31. {

32. // Index kiolvasása (X tengely)

33. index = vertexIndexArray[x - 1, y, z, redirect];

34. // Index bemásolása az adott pozícióba

35. vertexIndexArray[x, y, z, edgeIndex] = index;

36. // Index beillesztése az adott háromszög egyik csúcsának

37. triangles.Add(index);

38. }

39. // Ha az Y tengelyen van előző kocka ÉS van az adott élnek párja

40. else if (y > 0 && (redirect = Tables.redirect[edgeIndex].y) != -1)

41. {

42. index = vertexIndexArray[x, y - 1, z, redirect];

43. vertexIndexArray[x, y, z, edgeIndex] = index;

44. triangles.Add(index);

45. }

46. // Ha az Z tengelyen van előző kocka ÉS van az adott élnek párja

47. else if (z > 0 && (redirect = Tables.redirect[edgeIndex].z) != -1)

48. {

49. index = vertexIndexArray[x, y, z - 1, redirect];

50. vertexIndexArray[x, y, z, edgeIndex] = index;

51. triangles.Add(index);

52. }

53. else // Ha nem volt előzőleg kiszámolt érték

54. {

55. // A metódus kiszámolja majd beilleszti a vertex-et és  
 // visszaadja az indexét

56. vertexIndexArray[x, y, z, edgeIndex] =  
 CalculateVertex(position, edgeIndex, cube);

57. }

58. }

59. }

## Compute Shader Használata

A Compute Shader egy specializált Shader, amelyet arra terveztek, hogy általános célú számításokat végezzen a videókártyán. A videókártya általában grafikai műveletek számítását végzi, amelyekből közvetlenül megjelenített kép lesz. Általános célú számítás alatt bármilyen olyan műveletet lehet érteni, amelynek a kimenete nem megjeleníthető kép, vagy amelynek kimenete nem a képernyőre van irányítva, hanem még visszatér egy ciklusban a CPU oldalra. [15] [16]

A Compute Shader-eknek több kulcsfontosságú funkciója van, amelyet CPU oldalon nem lehet megvalósítani, vagy nem olyan effektív.

### Párhuzamos futtatás

Egy compute shader sok, egymással párhuzamosan futó szálon tud végrehajtást végezni egyszerre kihasználva a GPU-ban jelen lévő sok magot, amelyekből lényegesen több áll rendelkezésre, mint egy CPU-ban.

Ez lehetővé teszi, hogy minden egyes kocka egy számára dedikált magon fusson le.

### Direkt memória hozzáférés

Egy compute shader hozzáféréssel rendelkezik a dedikált videómemóriához (VRAM). Ez elengedhetetlen a feldolgozási sebesség növeléséhez. A videómemóriába adatokat lehet bemásolni a CPU oldalról ComputeBuffer-ek segítségével.

### Azonalli végrehajtás

A hagyományos shader-ekkel ellentétben, amelyek a megjelenítés bizonyos fázisaiban futnak le, a compute shader manuálisan van indítva script oldalról. Ez lehetővé teszi a fejlesztők számára, hogy az alkalmazás bármelyik fázisában műveletek végezzenek a videókártya segítségével.

### Munkacsoportok

A compute shader munkacsoportokon alapszik. Minden munkacsoport szálak kollekciója, amelyek az adatok egy adott részén dolgoznak. A compute shader munkacsoportjainak száma és a munkacsoportokban lévő szálak száma is a fejlesztőre van bízva.

A compute shader munkacsportjainak száma és a munkacsoportok szálainak száma is 3 dimenzión van elosztva.

### Dispatch

A Dispath hívással lehet végrehajtani egy compute shadert, ahol a 3 bemenő adat a munkacsoportok számát határozza meg a 3 dimenzió mentén.

1. Dispatch(int kernelIndex, int groupsX, int groupsY, int groupsZ);

### Kernel

Minden futtatható compute shader tartalmaz legalább egy úgynevezett Kernel-t. A kernel a compute shader belépési pontja. Több kernel is lehet egy compute shader-ben. A kernek fölötti numtreads mező határozza meg, hogy egy munkacsoporton belül hány szál van jelen a 3 dimenzión.

1. [numthreads(4, 4, 4)]

2. void GetTriangles (int3 id : SV\_DispatchThreadID) {

## Chunk Loading Rystem

A játék világa úgynevezett Chunk-okra van felosztva. A chunk a videójátékok körében, azon belül is az open world és/vagy sandbox játékok esetében gyakran emlegetett kifejezés. Jelentése egy független terület a játék világán belül, legyen az 2 vagy 3 dimenziós. A hasonló játékok világa sok ilyen, kiterjedésükben egyforma chunk-ból áll. Ez részben elengedhetetlen, részben pedig sok előnnyel is jár.

A világ chunk-okra való felosztása mindenképpen szükséges, a legtöbb ilyen játék világa nem férne bele a memóriába egyszerre és erre nem is lenne szükség. A látótávolság nagyon sok esetben mesterségesen limitált. Ezt a limitet állítani is lehet, amely a különböző számítási kapacitással rendelkező számítógépeknek is esélyt ad a játék megfelelő frissítési rátával való futtatására.

Természetesen a realizmust, ha nem is végtelen, de nagyon nagy látótávolsággal lehetne megközelíteni. Ez azonban szükségtelen, hiszen akkora távolságban semmi érdemleges információt nem szolgáltatnának a megjelenített elemek, hiszen nem lennének kivehetőek.

A chunk-ok dimamikus betöltése és kezelése azonban nem egy egyszerű logikai folyamat. Bár leggyakrabban csak egy faktort kell figyelembe venni, a játékos pozíciójához viszonyított látótávolságot, megállapítani, hogy mely chunk-ok vannak látótávolságon belül és kívül egyedi problémákat eredményez, amelyekre többfajta megoldás létezik.

Minden lejjebb említett megoldás tartalmaz minimális és maximális látótávolságot. A minimális látótávolságon belül mindenhol léteznek chunk-ok, a maximális látótávolságon kívül pedig sehol sem. Erre azért van szükség, hogy lehetőséget adjunk a játékosnak arra, hogy egy kis területen mozogjon anélkül, hogy a játékot új chunk-ok betöltésére kényszerítse. Ezt úgy éri el, hogy a minimális látótávolságon kívül eső chunk-okat nem rögtön törli, vagyis, ha a játékos visszafele halad kis távolságon, akkor még be vannak töltve a chunk-ok, amiket látnia kell.

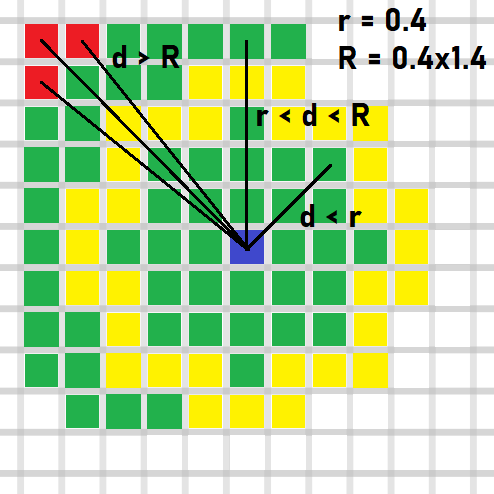
### Távolság alapú ellenőrzés és pozíció alapú létrehozás

Ebben az esetben a chunk-ok egy Dictionary-ben vannak eltárolva objektum-kulcs páronként. Az objektum maga a chunk, a kulcs pedig az chunk pozíciója.

Ez a módszer a játékos pozíciójához képest számítja ki, hogy melyek azok a koordináták, ahol egy chunk-nak jelen kell lennie, hogy a látótávolságon belül minden látható legyen. A matematikai műveletek elvégzésén egy előre meghatározott koordináta halmaz segít. Ez a koordináta halmaz a (0,0,0) koordinátához képest megjelöli azokat a koordinátákat, ahol egy chunk-nak már mindenképpen jelen kell lennie. Ezeket a koordinátákat csak hozzá kell adni annak a chunk-nak a koordinátájához, amiben a játékos tartózkodik.

A koordináta halmaz 2 dimenziós ábrázolásban egy gyűrű. A gyűrűn belüli chunk-okat nem kell létrehozni vagy ellenőrizni, hogy léteznek-e, hiszen ahogy a játékos „viszi magával a gyűrűt” a gyűrűn nem jut át olyan koordináta, amely nem lett volna ellenőrizve legalább egyszer.

Ez a módszer a távoli chunk-ok megszüntetéséhez vektor alapú távolság ellenőrzést alkalmaz. A játékos pozíciójához képest leméri, hogy milyen messze vannak a chunk-ok és ha a látótávolságon kívül esik egy chunk, azt megszünteti.



16. ábra Távolság alapú ellenőrzés és pozíció alapú létrehozás   
Forrás: Saját ábra

Jelmagyarázat: Kék – Játékos, Zöld – Létező chunk, Sárga – Létrehozáshoz ellenőrizendő pozíció, Piros – Törlendő chunk, Fehér – Üres pozíció, r – Látótávolság, R – Törlési távolság

Előnyök:

* Viszonylag egyszerű implementálni. Egy ciklus ellenőrzi az összes létező chunk-ot hiányzó koordinátát keresve, egy cilus pedig ellenőrzi a létező chunk-ok játékostól való távolságát.
* Egy dimenziós adatszerkezetet használ, amely egy dictionary. A dictionary keresésre jól optimalizált.

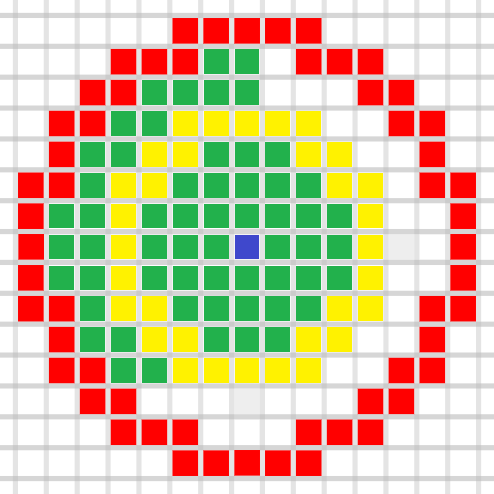
Hátrányok:

* Minden létező chunk – létrehozni kívánt chunk kombinációt meg kell vizsgálni, hogy elkerüljük a duplikált chunk-okat. Ez legoptimalizáltalanabb esetben dupla for ciklust jelent, kis optimalizálással valamilyen keresőalgoritmust, amelyhez viszont rendezetten kellene tartani az adatszerkezetet, ami az adatok dinamikussága miatt nehezen kivitelezhető.
* Keresés komplexitása: .
* Minden már létrehozott chunk esetében ki kell számítani a távolságot a játékoshoz képest majd össze kell hasonlítani a látótávolsággal. Ez vektorok távolságának kiszámítását jelenti, amely nagy mennyiségben lelassítja a játék futását.
* Távolság számítások: .

### Pozíció alapú ellenőrzés és létrehozás

Ez a módszer is objektum – kulcs páronként tárolja a chunk-okat, ahol az objektum a chunk, a kulcs pedig a pozíciója.

Ebben az esetben mind a létrehozás és a megszüntetés is egy előre meghatározott koordináta halmaz alapján történik. A külső halmaz koordinátáit hozzáadva a játékos chunk-jának koordinátájához kiszámolható, hogy mely chunk-okat kell megszüntetni, a belső halmaz segítségével pedig kiszámolható, hogy mely chunk-okat kell létrehozni. Ezek után a már létező chunk-ok között keresni kell az adott koordinátára és a keresés eredménye alapján vagy létrehozni, ha még nem létezik, vagy megszüntetni, ha már létezik.



17. ábra Pozíció alapú ellenőrzés és létrehozás   
Forrás: Saját ábra

Jelmagyarázat: Kék – Játékos, Zöld – Létező chunk, Sárga – Létrehozáshoz ellenőrizendő pozíció, Piros – Törléshez ellenőrizendő pozíció, Fehér – Üres pozíció

Ez a megoldás kettő keresést hajt végre, amely időkomplexitásának alsó határa esetenként jobb lehet.

### Memória struktúra alapú rendszer

A memória struktúra alapú rendszer nagyon hasonló a pozíció alapú ellenőrzés és létrehozás módszeréhez, viszont itt a chunk-ok nem egy rendezetlen adatszerkezetben vannak eltárolva és nem is objektum-kulcs páronként vannak jelen.

Az adatszerkezet ebben az esetben egy négyzetes tömb. A tömbben chunk objektumok mutatói szerepelnek. A négyzetes tömb dimenziói páratlanok és a tömb közepén mindig annak a chunk-nak a mutatója szerepel, amelyben a játékos tartózkodik. A négyzetes tömb mindig akkora területet foglal el a memóriában, hogy be tudja fogadni az összes elméletileg létezhető chunk-nak a mutatóját az adott látótávolság mellett. A többi chunk objektum mutatója a játékvilágban a játékos chunk-jának pozíciójához viszonyított, egész chunk-okban mért távolság alapján foglal helyet a tömb közepéhez képest.

Ennek a rendszernek a funkcionális követelménye, hogy minden egyes alkalommal, amikor a játékos átlép egyik chunk-ból a másikba, akkor a haladási irányával ellentétesen el kell mozgatni a tömbben az összes mutatót egyel.

Ez a tömb méretével megegyező olvasási és írási műveletet jelent. A tömb külső határán mindig NULL értékek szerepelnek ezért mindig van hely egyel elmozgatni a mutatókat. Ezt követően minden egyes mozgatás után le kell ellenőrizni az előre meghatározott memóriacímeket a külső és belső gyűrű mentén:

* Ha egy olyan memóriacímbe másolódott be egy mutató, amely törlendő chunk pozícióját tartja fent, akkor a mutató végén lévő chunk-o törölni kell. Ez egyszerű, *ha NEM NULL akkor* feltétel.
* Ha egy olyan memóriacímen nincs érvényes mutató, ahol egy chunk-nak léteznie kelljen, hogy a minimális látótávolságot megtartsuk, akkor az adott pozíció alapján létre kell hozni egy chunk-ot és muttatóját be kell másolni arra a pozícióra. ez egy egyszerű, *ha NULL akkor* feltétel.

Műveletigény:

* Mozgatás: olvasás és írás ()
* Ellenőrzés: létrehozáshoz és törléshez, ahol az olyan címek száma, ahol chunk-nak léteznie kell és az olyan címek száma, ahol a chunk-okat törölni kell.
* Mivel ezért eddig ennek a legkisebb a komplexitása és nem is használ bonyolult számításokat és kereséseket.

Az alábbi kódrészlet másolja ás a memóriacímeket a tömbben egyel arrébb a tengelyek mentén. Csak a kettő vízszintes tengely mentén vannak az elemek mozgatva, mivel a chunk-okat a világ tetejétől az aljáig egy adott oszlopban mindig betölti a játék.

1. // Check if the player moved chunks

2. playerChunk = Vector2FloorToNearestMultipleOf(ToVector2FromXZ(playerTransform.position), CubicChunk.cubesPerAxis);

3. if (playerChunk == oldPos) return;

4.

5. if (playerChunk.x > oldPos.x)

6. for (int x = 0; x < outerDiameter - 1; x++)

7. for (int z = 0; z < outerDiameter; z++)

8. for (int y = 0; y < verticalChunks; y++)

9. renderedChunks[x, y, z] = renderedChunks[x + 1, y, z];

10. else if (playerChunk.x < oldPos.x)

11. for (int x = outerDiameter - 2; x >= 0; x--)

12. for (int z = 0; z < outerDiameter; z++)

13. for (int y = 0; y < verticalChunks; y++)

14. renderedChunks[x + 1, y, z] = renderedChunks[x, y, z];

15.

16. if (playerChunk.y > oldPos.y)

17. for (int x = 0; x < outerDiameter; x++)

18. for (int z = 0; z < outerDiameter - 1; z++)

19. for (int y = 0; y < verticalChunks; y++)

20. renderedChunks[x, y, z] = renderedChunks[x, y, z + 1];

21. else if (playerChunk.y < oldPos.y)

22. for (int x = 0; x < outerDiameter; x++)

23. for (int z = outerDiameter - 2; z >= 0; z--)

24. for (int y = 0; y < verticalChunks; y++)

25. renderedChunks[x, y, z + 1] = renderedChunks[x, y, z];

26.

27. oldPos = playerChunk;

Az alábbi kód a koordináták létrehozásáért felel egy kör mentén, amelyeket a minimális és maximális látótávolság meghatározásához használ.

1. private List<Vector2Int> CalculateRing(int radius, Vector2Int center, int gridSize)

2. {

3. List<Vector2Int> ring = new();

4. for (int x = 0; x < gridSize; x++)

5. for (int y = 0; y < gridSize; y++)

6. {

7. Vector2Int pos = new(x, y);

8. float dist = Vector2Int.Distance(center, pos);

9. if (dist < radius + 1 && dist >= radius - 1)

10. ring.Add(pos);

11. }

12.

13. return ring;

14. }

15.

Ezek után a kód csak le ellenőrzi a megadott koordinátákat.

1. foreach (Vector2Int offset in innerRing)

2. {

3. if (renderedChunks[offset.x, 0, offset.y] == null)

4. {

5. Vector2Int horizontalPos = playerChunk + (offset - center2) \* CubicChunk.cubesPerAxis;

6. for (int y = 0; y < verticalChunks; y++)

7. {

8. CubicChunk c = GetFromPool();

9. renderedChunks[offset.x, y, offset.y] = c;

10. Vector3Int pos = new(horizontalPos.x, y \* CubicChunk.cubesPerAxis, horizontalPos.y);

11. c.Move(pos);

12. chunksToBuild.Add(c);

13. }

14. }

15. }

16.

17.

18. foreach (Vector2Int offset in outerRing)

19. {

20. if (renderedChunks[offset.x, 0, offset.y] != null)

21. {

22. for (int y = 0; y < verticalChunks; y++)

23. {

24. ReturnToPool(renderedChunks[offset.x, y, offset.y]);

25. renderedChunks[offset.x, y, offset.y] = null;

26. }

27. }

28. }

## Chunk Pooling System

Pooling system sok játékban jelen van, ahol azonos vagy hasonló dinamikus objektumokból sokat kell létrehozni a program futása során előre nem meghatározott időpontokban. Egy objektum létrehozása idő és erőforrás igényes folyamat. Le kell foglalni a memóriaterületet és azt fel kell tölteni adatokkal. Ez sokszor a frissítési ráta lecsökkenéséhez vezethet egy intenzív szituációban.

A pooling system alapja, hogy a létrehozott objektumokat újrahasznosítja. Ezt úgy éri el, hogy egy pool-ban tárolja a már létrehozott objektumokat és ebből a pool-ból kér le példányokat a játék amikor szükség van rájuk. Amikor egy objektum már nem szükséges, akkor megsemmisítés helyet visszaküldi a pool-ba, hogy később ismét fel lehessen használni.

Egy Object Pool-nak három alapfunkciója van.

### Tárolás

A pool általában egy dinamikus méretű adatszerkezet. C#-ban egy Lista alkalmas erre. Egy listában könnyen el lehet érni az elemeket és könnyen ki is lehet törölni azokat. Hozzáadni a listához is könnyű.

1. private List<CubicChunk> pool = new();

2. private int inPool = 0;

3. private int inWorld = 0;

Bár a lista osztálynak van elérhető length tulajdonsága, amely visszaadja a listában szereplő elemek számát, ennek a használata nem a leg effektívebb módszer. Ha lokális változókkal is könnyen számon lehet tartani az elemek számát, akkor az a módszer minimálisan, de hatékonyabb.

### Lekérés

Amikor a játéknak szüksége van egy objektumra a megadott típusból, akkor meghív egy metódust, amely visszaad egy megfelelő példányt. A metódus le ellenőrzi, hogy a pool-ban van-e elég példány és ha igen kiválasztja az elsőt. Ha nincs akkor kénytelen létrehozni egyet. A legtöbb pool lekezeli az esetet amikor üres állapotban kérnek le belőle példányt. Létezik olyan pool is, amely ezt nem kezeli le, de abban az esetben az egy időpillanatban aktív példányok számát meg kell kötni.

1. private CubicChunk GetFromPool()

2. {

3. CubicChunk c;

4.

5. if (inPool > 0)

6. {

7. inPool--;

8. c = pool[0];

9. pool.RemoveAt(0);

10. c.SetActive(true);

11. }

12. else

13. c = new(worldTransform);

14.

15. inWorld++;

16. return c;

17. }

### Visszahelyezés

Amikor egy példányra már nincs szükség, akkor az vissza lesz helyezve a pool-ba. Ez teszi lehetővé, hogy a későbbiekben ismét le lehessen kérni.

1. private void ReturnToPool(CubicChunk c)

2. {

3. inPool++;

4.

5. if (inWorld > 0)

6. inWorld--;

7.

8. c.SetActive(false);

9. pool.Add(c);

10. }

A pool lehet előre feltöltött is, ami azt jelenti, hogy egy meghatározott számú objektum alapból jelen van a pool-ban későbbi felhasználásra, vagy indulhat a pool 0 elemmel is. Ha kezdetben nulla eleme van a pool-nak, akkor amíg objektum nem kerül visszaküldésre a pool-ba addig minden alkalommal adott időpillanatban kell létrehozni az objektumot, de a későbbiekben újra lehet fel lehet használni azokat. A pool indulhat nem nulla elemszámmal is. Ekkor az első lekérésre is már létező objektumot fog visszaadni a pool addig amíg ki nem fogy.

# Tervezés

Hardverigényes alkalmazások készítésénél fontos figyelembe venni azt, hogy milyen hardverekkel rendelkezik a célcsoport, akiknek az alkalmazást szánjuk. A videójátékok készítésénél ez különösen fontos, hiszen egy számítógép teljesítményét nagyban befolyásolja, hogy milyen erősségű processzorral, videókártyával és mennyi memóriával rendelkezik és hogy ezek az alkatrészek és az összes alkatrész ezek mellett mekkora hatásfokkal tud együtt üzemelni.

Bár egyes alkalmazási területeken, mint például tudományos számítások vagy szimulációs szoftverek esetén a belépő szintű hardver is drága és kijelenthető, hogy aki nem rendelkezik ilyen hardverrel az ne próbálkozzon meg az alkalmazás futtatásával, addig a videójátékok területén nem érdemes ezt a filozófiát követni.

A gaming területén belül a belépő szintű hardverrel rendelkező felhasználóknak is lehetőséget kell adni a játék futtatására. Természetesen ehhez ideális szituációban egy belépő szintű rendszerre lenne szükség, amelyen a programot teszteljük, viszont figyelembe véve, hogy a játék jelen állapotában még béta fázisúnak tekinthető, megfelelő a középkategóriás számítógépen való tesztelés is.

A tesztelésre használt konfiguráció:

* Alaplap: Asus ROG Strix X99 Gaming
* Processzor: Intel i7 6800K
* Memória: 32 GB (4x8) DDR4 3200 MHz
* GPU: RTX 2080 SUPER

A különböző műveletek időigényessége fontos szempont, hiszen nemcsak az élvezhető frissítési rátát kell elérni, hanem a mai standard-ekkel is tarnai kell a lépést. Már régóta alap követelmény, hogy minden játék tartsa a 60 FPS-t egy közepes erősségű rendszeren. A közepes erősségű rendszer természetesen szubjektív meghatározás, hiszen egy számítógép teljesítménye nagyon sok faktortól függ. Ráadásul, nem is lehet csak egyfajta teljesítményről beszélni, hiszen egyes alkalmazások nagyon memóriaigényesek, míg mások a videókártyát vagy a processzort terhelik le.

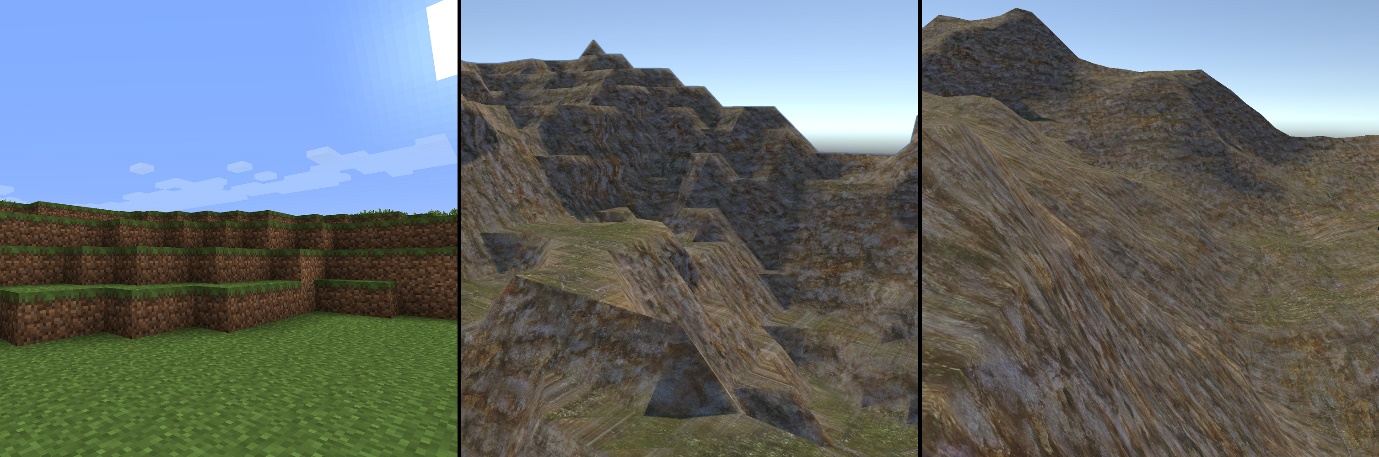
A végrehajtási idő tesztelése a 60 FPS (frames per second = képkocka per másodperc) tartására irányul, amely azt jelenti, hogy:

1. *képlet Rendelkezésre álló idő*

16.6 ms áll rendelkezésre minden képkockára, ha tartani akarjuk a 60 FPS-t.

## Miért a Marching Cubes-ra esett a választás

A Marching Cubes algoritmus a Minecraft-al ellentétben a kockák szintje alá megy precizitás szempontjából. Míg a Minecraft-ban egy blokk vagy jelen van egy koordinátán, vagy nem, addig a Marching Cubes egy kockához 256 konfiguráció közül társít egyet. Ez lehetővé tesz a talaj lényegesen nagyobb felbontásban való megjelenítését. Ez a precizitás két lépcsőben is jelen van.



18. ábra Kockás (bal) Durva (közép) és Simított felszín (jobb)   
Forrás: Saját ábra

## Az optimalizáció eredménye

Az alábbi értékek mind átlagos esetekből származnak, amikor az alakzat felszíne se nem a 0, se nem az elméleti maximum felé nem konvergál erőteljesen.

19. ábra Vertex-ek száma   
Forrás: Saját ábra

A fenti grafikonon látható, hogy a tér méretének növekedésével drasztikusan nő a vertex-ek száma optimalizálás nélkül. Olyan mértékben, hogy 64x64x64-es nagyságú térnél már több mint 45 ezer vertex van jelen. Ehhez képest, megosztott vertex-eknél mindössze csak 7-8 ezerrel kell számolni. Ez azért is fontos, mert nagyon könnyű átlépni az alapértelmezett 16 bites buffer maximumát, ami 65535.

Olyan eset elméleti szintem sem szabad, hogy fennálljon, amikor a meghatározott területet reprezentáló mesh túllépi a maximum vertex számot. Igaz, a maximum vertex szám mesterségesen is ritka, hogy előforduljon.

20. ábra Memóriaigény   
Forrás: Saját ábra

A vertex szám egyenesen összefügg a mesh memóriafelhasználásával. A 200, de még az 1200 KiB sem sok, de a tér nem csak egy egységből áll, így a gyorsan összeadódnak a MiB-ok és lehet, hogy gyorsan elérjük a 100 MiB-ot is.

## Chunk Loading System kiválasztása

### Végrehajtási idők tesztelése

Minden módszer végrehajtási idejének tesztelése azonos feltételek mellett történt:

* Az első ciklus, amikor még egy chunk sincs jelen nem számít bele az átlagba.
* Az átlag számításához használt adatok mindig olyan értékek, amelyek tartalmazzák törlendő chunk-ok kijelölését is. Ez azt jelenti, hogy a játékos elég messze ment ahhoz, hogy a látótávolság függvényében a betöltés pillanatában felvett pozíciója már nem látható.

Átlag végrehajtási időbe beleszámolt műveletek:

|  |  |
| --- | --- |
| Memória struktúra alapú rendszer | |
| Chunk mutatók memóriában való áthelyezése | ✔ |
| Törlendő chunk-ok kijelölése | ✔ |
| Törlendő chunk-ok visszahelyezése | ✔ |
| Létrehozandó chunk-ok kijelölése | ✔ |
| Létrehozandó chunk-ok létrehozása | ✖ |

1. *táblázat Memória struktúra alapú rendszer*

|  |  |
| --- | --- |
| Pozíció alapú ellenőrzés és létrehozás | |
| Létező chunk-ok átvizsgálása törlendő chunk-okért | ✔ |
| Törlendő chunk-ok visszahelyezése | ✔ |
| Létező chunk-ok átvizsgálása létrehozandó chunk-okért | ✔ |
| Létrehozandó chunk-ok létrehozása | ✖ |

1. *táblázat Pozíció alapú ellenőrzés és létrehozás*

|  |  |
| --- | --- |
| Távolság alapú ellenőrzés és pozíció alapú létrehozás | |
| Létező chunk-ok játékostól való távolságának ellenőrzése | ✔ |
| Törlendő chunk-ok visszahelyezése | ✔ |
| Létező chunk-ok átvizsgálása létrehozandó chunk-okért | ✔ |
| Létrehozandó chunk-ok létrehozása | ✖ |

1. *táblázat Távolság alapú ellenőrzés és pozíció alapú létrehozás*

A létrehozandó chunk-ok létrehozása egyik módszernél sincs beleszámolva, mivel azon műveletek által generált terhelés el van osztva több képkocka idejére.

21. ábra Pálya betöltési sebesség   
Forrás: Saját ábra

A grafikonon látható, hogy az optimális távolságnak számító 15-16 chunk-os távolságon az alábbi sorrend áll fent:

1. Memória struktúra alapú rendszer
2. Távolság alapú ellenőrzés és pozíció alapú létrehozás
3. Pozíció alapú ellenőrzés és létrehozás

Ez annak köszönhető, hogy a memóriában adatokat másolni egy kifejezetten gyors művelet. Mindössze 2 instrukcióra van szüksége a számítógépnek a művelet elvégzésére. Assembly-ben ez például egy LOAD instrukció, amely betölti az adott címet egy regiszterbe és egy STORE instrukció, amely a regiszter értékét eltárolja az adott címen.

Ezen műveletek egész tömbön való elvégzése után nem szükséges keresést végrehajtani, hiszen a memóriában az adott pozícióban mindig megfelelő érték van jelen.

A távolság alapú ellenőrzés és pozíció alapú létrehozás módszere második helyen áll, mivel a mai CPU-k már képesek egy instrukcióval gyököt vonni, amely a vektor alapú távolságszámításnak egy fontos eleme. Ezek után viszont egy n\*m súlyú keresést végre kell hajtani, ami eléggé lelassítja a folyamatot.

A Pozíció alapú ellenőrzés és létrehozás módszere kettő n\*m súlyú keresést kell, hogy végrehajtson, ezért ez a leglassabb a három közül.

Bár a leggyorsabb módszerrel is csak átlagban kicsit több mint 1 milliszekundumot nyerünk optimális látótávolság mellett, ez még mindig nagyon jó arány, hiszen mindössze csak 16 milliszekundum áll rendelkezésre 1 képkocka alatt.

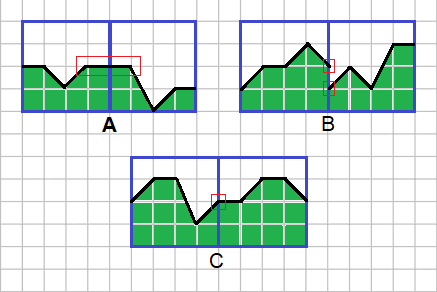
## Tesztek

A tesztek a Marching Cubes algoritmus és a Perlin Noise alapú zajgenerátor együttműködésére és az előállított alakzatok tulajdonságaira fúkuszálnak. Ezek a tulajdonságok viszont matematikailag nagyon összetettek, ebből következően az előállított adathalmazt nem lehetséges automatikus módszerekkel ellenőrizni anélkül, hogy az implementált algoritmusoknál bonyolultabb módszereket ne alkalmazzunk.

Ennek megoldására vizuális tesztek állnak rendelkezésre, amelyek különböző szempontok alapján tudják értékelni a kimenetet és indikációt adnak arra, hogy milyen hibajelenség áll fenn.

### Chunk csatlakozási hiba

Minden chunk külön tárolja a saját adathalmazát, de ahhoz, hogy kettő chunk között ne legyen rés, a szomszédos chunk-ok adathalmazával átfedésben kell, hogy legyen. Ez az átfedés is a procedurálisan generált zaj része. Matematikai hiba miatt lehet túl nagy, vagy túl kicsi. A megfelelő átfedés pontosan 1.

Abban az esetben, hogyha két chunk találkozásánál a talaj magasságát követő, folytonos, de a két chunk pozíciója által megadott tengelyen mindig vízszintes az összeköttetés, akkor az átfedés 2. Ezt reprezentálja 2 dimenziósan az A eset.

22. ábra Chunk csatlakozási hibák

Abban az esetben, ha a két chunk között vizuális rés van, akkor átfedés vagy 0, vagy 2-nél nagyobb, mert ebben az esetben az értékek nem találkoznak egymással. Ezt reprezentálja a B eset.

Csak akkor megfelelő az átfedés, ha a kettő chunk folytonosan, ismétlődés nélkül találkozik. Ezt reprezentálja a C eset, ahol a kettő chunk találkozásánál pontosan 1 érték van jelen mindkét adathalmazban.

### Chunkon belüli hiba

Abban az esetben, hogyha egy chunk-on belül folytonossági hiba található, amely nagyvalószínűséggel lyuk, akkor a Marching Cubes algoritmus implementációjában keresendő a hiba. Sajnos ez a hibajelenség nem segít behatárolni a pontos problémát.



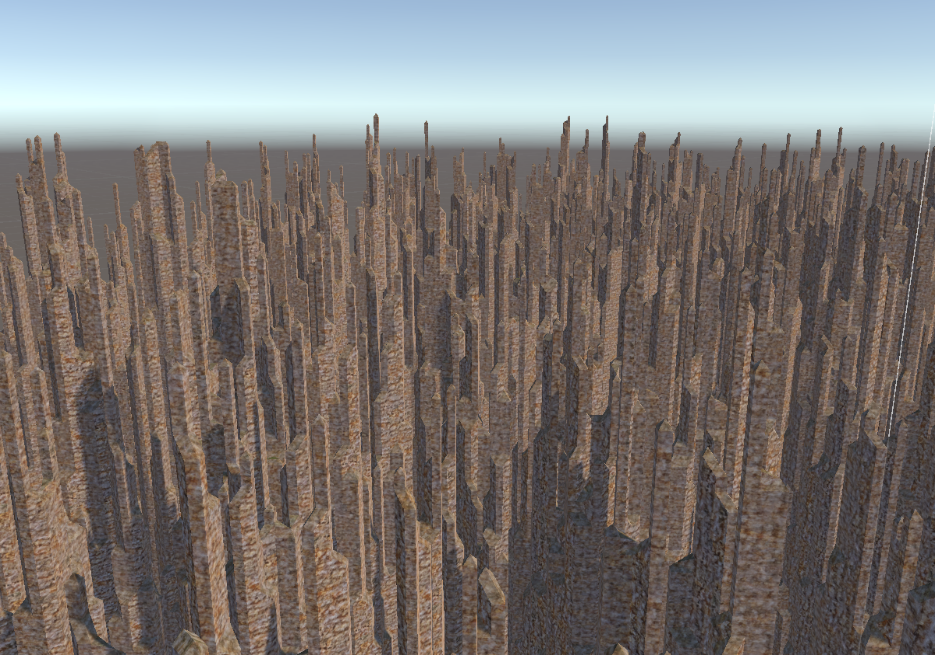
. ábra Chunk-on belüli hiba

### Zaj magasság hiba

Abban az esetben, hogyha hiba nélkül lefut az algoritmus, viszont nem produkál vizuális kimenetet, akkor nagyvalószínűséggel a zaj összes értéke a maximális magasság fölött helyezkedik el. Ebben az esetben a zaj összes vizsgált értéke a felszín szintje alatt van, vagyis azért nem látható a talaj, mert valójában olyan mélyen van a világ, hogy a felszín nem került megjelenítésre.

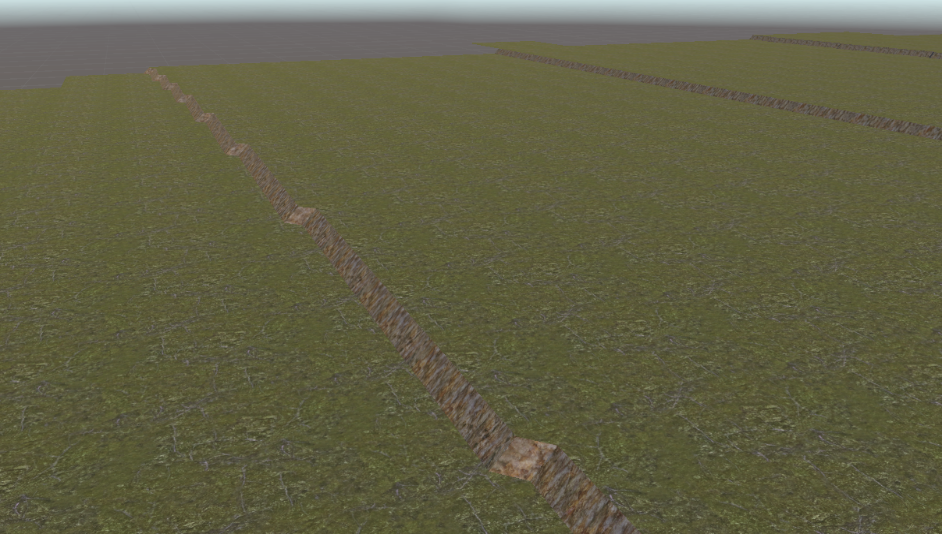
### Zaj intenzitás hiba

A zaj intenzitása határozza meg, hogy milyen gyorsan változik a magasság adott távolság alatt. Abban az esetben, hogyha a kimenet sok nagyon magas és nagyon alacsony értéket tartalmaz kis területen, akkor az intenzitás túl magas. Az ilyen probléma tüskés megjelenés formájában jelentkezik.



. ábra Tüskés felszín

Ellenkező esetben a túl alacsony intenzitás viszont lapos megjelenést kölcsönöz a felszínnek.



. ábra Lapos felszín

# Konklúzió

Egy hasonló videójáték 3 fő rétege közül ez a dolgozat a játék technikai megvalósításával foglalkozott. A legalsó réteg, a játékmotor már adott volt a Unity által, amely saját fejlesztőkörnyezettel érkezik, nagyban megkönnyítve a munkát. A fölső réteg, a játékélmény megvalósításához már adottak a feltételek a játék vázának kifejlesztése által. Már rendelkezésre áll egy világ, amit meg lehet tölteni tartalommal, de látszik, hogy a tartalom előállítása is legalább annyi időt venne igénybe, mint a játék vázának felépítése. Következő lépésben elő kéne állítani a játék számára egy témát. A téma meghatározása után lehetne foglalkozni a játékelemekkel, majd a grafikai stílussal. A videójáték iparban ezek mind egyedi munkakörök, amelyet grafikusok, történetírók és tervezők töltenek be. Egy jó videójáték akkor születik meg ha a fejlesztésnek a különböző aspektusai jól össze vannak hangolva és a programozás szinkronban tud haladni a játékélmény megalkotásával. Természetesen nem követelmény, hogy egy játékon egy egész fejlesztőcsapat dolgozzon, hiszen korunk egyik legsikeresebb játékát (Undertale) egy fejlesztő készítette, aki egy személyben volt felelős a programozástól kezdve a történetíráson át a grafikáig. Mindenesetre a fejlesztést folytatni szeretném a jövőben, annak ellenére, hogy mekkora mennyiségű munkára volt szükség ahhoz, hogy egy algoritmusból megjeleníthető pálya szülessen és hogy még mennyi munkára lenne szükség ahhoz, hogy az a pálya tartalmas is legyen.

# Mellékletek

Az elektronikus melléklet tartalmazza a Unity projektet, amely **Unity Editor 2021.3.35f1**használatával megnyitható szerkesztésre. A projekt a **MarchinCubesProjectFinal** nevű gyökérmappa a tömörített állományban.

A projekt tartalmaz futtatható állományt is az **Assets\Builds\Release\_** mappában **MarchingCubesProject.exe** néven.

Rendelkezésre áll **Visual Studio Solution** a projekt gyökerében. A dolgozatban említett forráskódok az **Assets\Scripts\** mappában találhatók, többnyire C# nyelven. A GPU-n való futtatáshoz szükséges compute shader-ek HLSL-t (High Level Shader Language) használnak.

Mappaszerkezet alább látható.

+-MarchingCubesProjectFinal Unity Projekt - Unity Editor 2021.3.35f1

| +-Assets

| | +-ADG\_Textures

| | +-Editor

| | +-Materials

| | +-PhysicsMaterials

| | +-Prefabs

| | +-Resources

| | +-Scenes

| | +-Scripts Forráskódok (CubicChunk.cs, World.cs, ...)

| | | +-Compute GPU-n futó Marching Cubes

| | | +-FirstPersonController Karakter mozgatás

| | | +-NoiseShader GPU-n futó Perlin Noise generátor

| | | \-Player Játékos környezet manipulációs script-je

| | +-Shaders

| | +-TextMesh Pro

| | \-Wireframe

| +-Builds

| | +-Release\_ Végleges verzió futtatható állománya

| | +-TestVersion Korai Perlin Noise teszt

| | \-WorldTest Világgenerálás teszt

| +-Documents Szakdolgozat másolata + Dokumentáció

| | +-Data Grafikonokhoz használt adatok

| | +-Diagrams Felhasznált diagramok

| | +-html Doxygen dokumentáció

| | +-Images Felhasznált képek

| | \-Misc Egyéb dokumentumok

| +-Logs

| +-obj

| +-Packages

| +-ProjectSettings

| \-UserSettings

\*A nem jelölt mappák a Unity funkcionalitásához szükségesek.

# Irodalomjegyzék

|  |  |
| --- | --- |
| [1] | A. Kaufman, D. Cohen és R. Yagel, „Volume Graphics,” *IEEE Computer,* %1. kötet 26, %1. szám 7, pp. 51-64, 1993. |
| [2] | T. Mc Shea, „Gamespot,” 31 May 2011. [Online]. Available: https://www.gamespot.com/reviews/terraria-review/1900-6316247/. [Hozzáférés dátuma: 25 09 2024]. |
| [3] | M. McWhertor, „Kotaku,” Gawker Media, 13 May 2011. [Online]. Available: https://kotaku.com/5801827/somewhere-between-super-metroid-and-minecraft-lies-the-intriguing-terraria. [Hozzáférés dátuma: 25 09 2024]. |
| [4] | A. Jeremy, „This is Minecraft,” IGN, 11 November 2010. [Online]. Available: https://www.ign.com/articles/2010/11/11/this-is-minecraft. [Hozzáférés dátuma: 02 10 2024]. |
| [5] | G. Anthony, „Minecraft Review,” IGN, 24 November 2011. [Online]. Available: https://www.ign.com/articles/2011/11/24/minecraft-review. [Hozzáférés dátuma: 02 October 2024]. |
| [6] | BCA Labs, „Polygon Meshes in Computer Graphics,” BCA Labs, [Online]. Available: https://bcalabs.org/subject/polygon-meshes-in-computer-graphics. [Hozzáférés dátuma: 13 November 2024]. |
| [7] | E. W. Weisstein, „Vertex,” MathWorld, 7 November 2024. [Online]. Available: https://mathworld.wolfram.com/Vertex.html. [Hozzáférés dátuma: 13 November 2024]. |
| [8] | Unity Technologies, „Mesh,” Unity Technologies, 13 November 2024. [Online]. Available: https://docs.unity3d.com/ScriptReference/Mesh.html. [Hozzáférés dátuma: 13 November 2024]. |
| [9] | B. T. Phong, „Illumination for computer generated pictures,” *Communications of the ACM,* %1. kötet 3, %1. szám 6, pp. 311-317, 1975. |
| [10] | H. Gouraud, „Continuous Shading of Curved Surfaces,” *IEEE Transactions on Computers,* %1. kötet 20, %1. szám 6, pp. 623-629, 1971. |
| [11] | W. E. Lorensen és H. E. Cline, „Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm,” in *SIGGRAPH*, Anaheim, 1987. |
| [12] | H. E. Cline és W. E. Lorensen, „System and method for the display of surface structures contained within the interior region of a solid body”. United States of America Szabadalom száma: US4710876A, 1 December 1987. |
| [13] | National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, „Computed Tomography (CT),” National Institute of Biomedical Imaging and Bioengineering, Június 2022. [Online]. Available: https://www.nibib.nih.gov/science-education/science-topics/computed-tomography-ct. [Hozzáférés dátuma: 1 10 2024]. |
| [14] | P. Visutsak, „Marching Cubes and Histogram Pyramids for 3D Medical Visualization,” *Journal of Imaging,* %1. kötet 9, %1. szám 88, pp. 1-12, 2020. |
| [15] | Unity Technologies, „Compute shaders,” Unity Technologies, [Online]. Available: https://docs.unity3d.com/Manual/class-ComputeShader.html. [Hozzáférés dátuma: 14 November 2024]. |
| [16] | Unity Technologies, „Introduction to compute shaders,” Unity Technologies, [Online]. Available: https://docs.unity3d.com/Manual/class-ComputeShader-introduction.html. [Hozzáférés dátuma: 14 November 2024]. |