Gymnázium Christiana Dopplera, Zborovská 45, Praha 5

ROČNÍKOVÁ PRÁCE

3D Simulace a Vykreslování v Prostředí Microsoft Excel

Vypracoval: Ondřej Čopák
Třída: 8.M
Školní rok: 2023/2024
Seminář: Seminář z Programování

Prohlašuji, že jsem svou ročníkovou práci napsal samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů. Souhlasím se zapůjčováním práce pro studijní účely.

V Praze dne 13. 1. 2024 Ondřej Čopák

Obsah

1. Úvod

Cílem této práce je přiblížit základní principy vykreslování 3D objektů v herních enginech. Toto téma jsem si vybral s cílem rozšířit dosah celosvětového trendu tzv. *portování* (starších) her, jako například Doom, do různých prostředí. Rozhodl jsem se tak implementovat základy grafického zobrazování krychlí, inspirované počítačovou hrou Minecraft, do prostředí Microsoft Excelu (dále jen *Excel*).

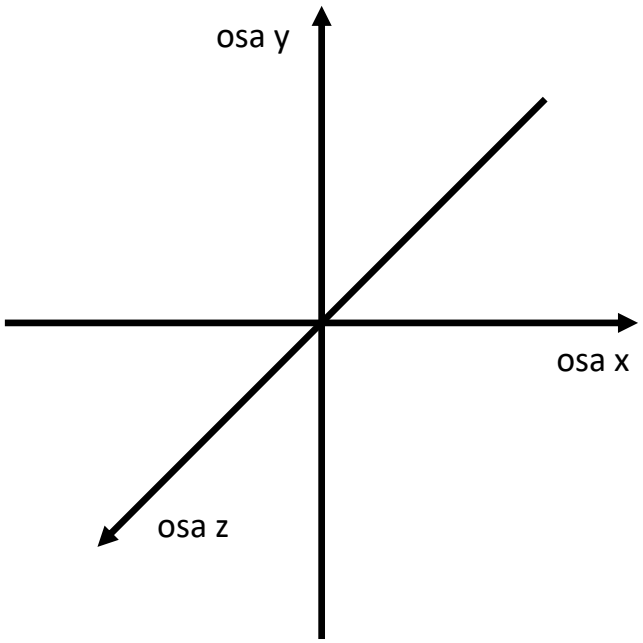
Důraz je také kladen na vysvětlení, jak Excel může být vnímán jako prostředí pro programování 3D her. V rámci této práce se analyzuje otáčení kamery, pohybování hráče, převod do dvou dimenzí a další aspekty týkajících se vizualizací. Velkou částí je také optimalizace kódu tak, aby se minimalizoval počet výpočtů, s cílem zrychlit program. Předpokladem pro dobrou orientaci v práci je základní porozumění fungování počítačových her a základní znalost práce se souřadnicemi.

Celá tato práce je rozdělena do tří částí (teoretický základ, implementace a optimalizace) a je dále členěna do podkapitol. Teoretická část se věnuje algoritmům a matematice, která stojí za pohybováním v třídimenzionálním prostoru. Implementační část se zaměřuje na konkrétní implementaci do prostředí Excelu, a v poslední části se práce zabývá limitujícími faktory prostředí a dalšími optimalizacemi programu. Práce vychází pouze z literatury uvedené na konci práce a z oficiální dokumentace programovacího jazyku. Veškeré obrázky v této práci jsou mé vlastní tvorby.

Doom (1993, id Software)
Minecraft (2009, Mojang Studios)
Microsoft Excel (2016, Microsoft)

2. Teoretický základ 3D prostředí

Kapitola se věnuje teoretickému základu matematických operací – pohybu, otáčení ve 3D prostředí a následnému převodu do 2D. Osy X, Y a Z jsou v průběhu celé práce vždy pravotočivé (obr 2.1). Tvoří tzv. kartézský souřadnicový systém, který určuje jednoznačné souřadnice bodů [1]. Termínem *hráč* se v celé práci myslí pozice, ze které se pozoruje zbytek scény. Pojmem *kamera* se zase myslí směr, ze kterého se *hráč* dívá.



(obr. 2.1 – pravotočivé osy X, Y, Z)

2.1 Pohyb v trojrozměrném prostoru

Pro minimalizaci složitosti výpočtů je výhodné umístit hráče do počátečního bodu souřadnicového systému, konkrétně do bodu $[0, 0, 0]$. Tímto se eliminuje nutnost současné práce s pozicí hráče a polohou krychlí a zjednoduší se tím výpočty. Každá krychle se proto posune po jednotlivých osách dle původního umístění hráče.

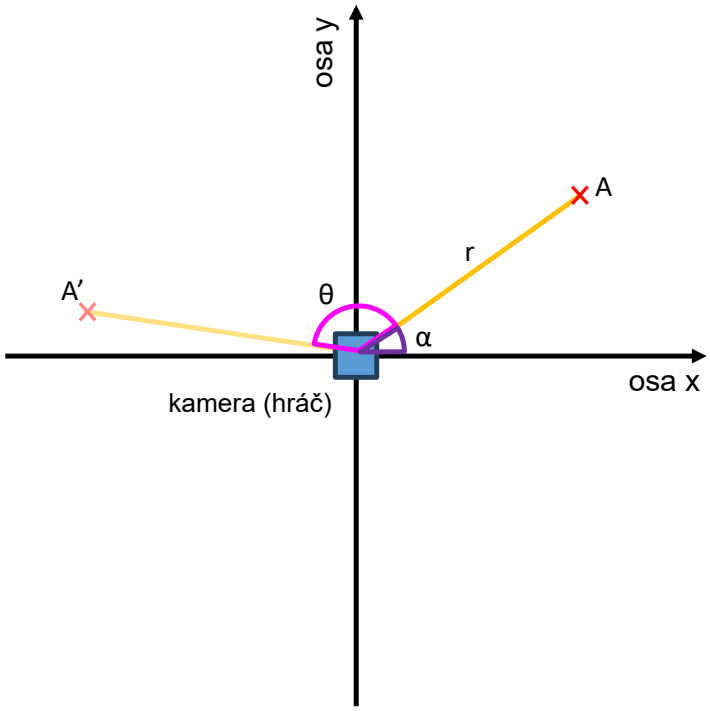
2.2 Rotace v trojrozměrném prostoru

Kamera, podobně jako hráč, se také otočí tak, aby byla orientovaná výchozím směrem $[0, 0, 0]$. Provádí se tedy rotace všech bodů tak, aby zůstaly ve stejné vzdálenosti od hráče, ale pod daným úhlem kamery. Program umožňuje rotaci kamery pouze ve dvou směrech – *nahoru/dolů* a *doleva/doprava*. Původní hra totiž neumožňuje hráči naklánět hlavu směrem

k ramenům. Pro lepší vizualizaci se pracuje v této části práce ve 2D rovině, kde hráč je v bodě $[0, 0]$ a selektivně se zobrazují pouze ty osy, ve kterých dochází ke změně hodnot během konkrétního otočení.

2.2.1 Odvození vzorce pro otáčení ve 2D

Pro přesné umístění a orientaci objektů je nezbytné odvodit vzorec pro otáčení ve 2D rovině. Tento vzorec umožní vypočítat nové souřadnice bodu po rotaci kolem počátku. Cílem je vypočítat nové souřadnice bodu $[x, y]$ na základě úhlu rotace (obr 2.2).



(obr. 2.2 – otáčení bodu A o úhel θ v kartézské soustavě souřadnic roviny XY)

A: bod určen souřadnicemi $[x, y]$, který je otáčen.
A': výsledný bod po otáčení.
θ: úhel rotace (yaw, pitch).
α: původní úhel mezi osou X a bodem.
β: celkový úhel rotace $(\alpha + \theta)$.
r: vzdálenost od počátku k bodu ve 2D rovině.

Úhel α je dán arkus tangem podílu y a x a je dán také kvadrantem, ve kterém se bod nachází.

$$\alpha = \arctan\left(\frac{y}{x}\right)$$

Z toho lze spočítat celkový úhel rotace bodu A.

$$\beta = \alpha + \theta$$

Nové souřadnice bodu proto jsou:

$$x' = r \cdot \cos(\beta)$$

$$y' = r \cdot \sin(\beta)$$

Abychom se vyhnuli problému spojeným s dělením nulou (v případě $x = 0$) a zohlednili kvadrant, ve kterém se souřadnice nacházejí, je třeba upravit vzorce tak, aby obě souřadnice byly vyjádřené pomocí obou goniometrických funkcí $\sin(\theta) + \cos(\theta)$. Lze proto začít úpravy použitím součtového vzorce pro $\tan(\alpha + \beta)$.

$$\tan(\alpha + \beta) = \frac{\tan(\alpha) + \tan(\beta)}{1 - \tan(\alpha) \cdot \tan(\beta)}$$

Hodnota $\tan(\arctan(n))$ se rovná n.

$$\tan(\beta) = \frac{\frac{y}{x} + \tan(\theta)}{1 - \frac{y}{x} \cdot \tan(\theta)}$$

$$\tan(\beta) = \frac{y + x \cdot \tan(\theta)}{x - y \cdot \tan(\theta)}$$

Následuje dosazení β z předchozího kroku do vzorců.

$$x' = r \cdot \frac{x - y \cdot \tan(\theta)}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

$$y' = r \cdot \frac{y + x \cdot \tan(\theta)}{\sqrt{x^2 + y^2}}$$

Po provedení úpravy, kde $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ vyjde:

$$x' = x \cdot \cos(\theta) - y \cdot \sin(\theta)$$

$$y' = x \cdot \sin(\theta) + y \cdot \cos(\theta)$$

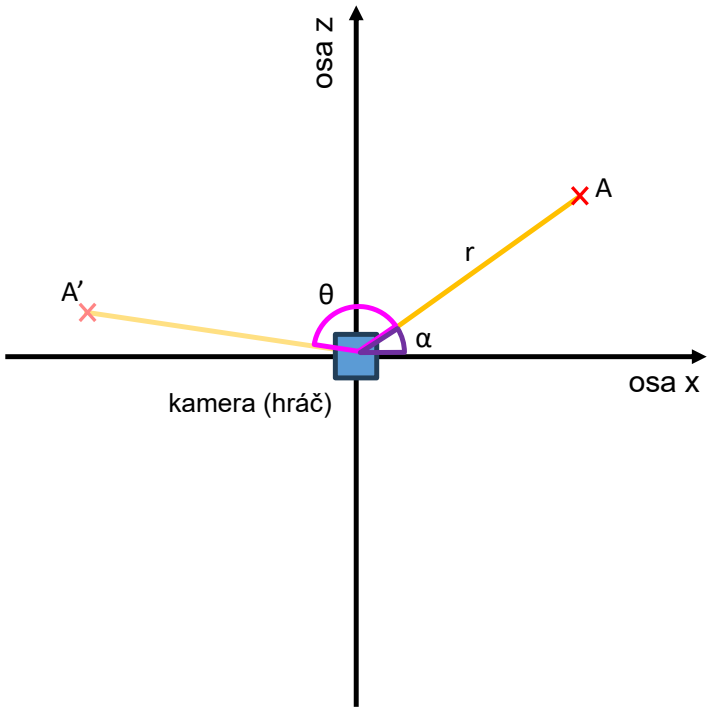
V obou rotacích budou tyto vzorce využity.

2.2.2 Rotace kolem osy Y (yaw)

Pro rotaci roviny XZ (otáčení kamery doleva a doprava) lze využít již spočítaný vzorec, kde Y zůstane stejné a X a Z se mění v závislosti na úhlu *yaw* (obr 2.3). Použiji cyklickou záměnu vzorce z oddílu 2.2.1.

θ je úhlem *yaw*.

$$x' = x \cdot \cos(\theta) - z \cdot \sin(\theta)$$
$$y' = y$$
$$z' = x \cdot \sin(\theta) + z \cdot \cos(\theta)$$



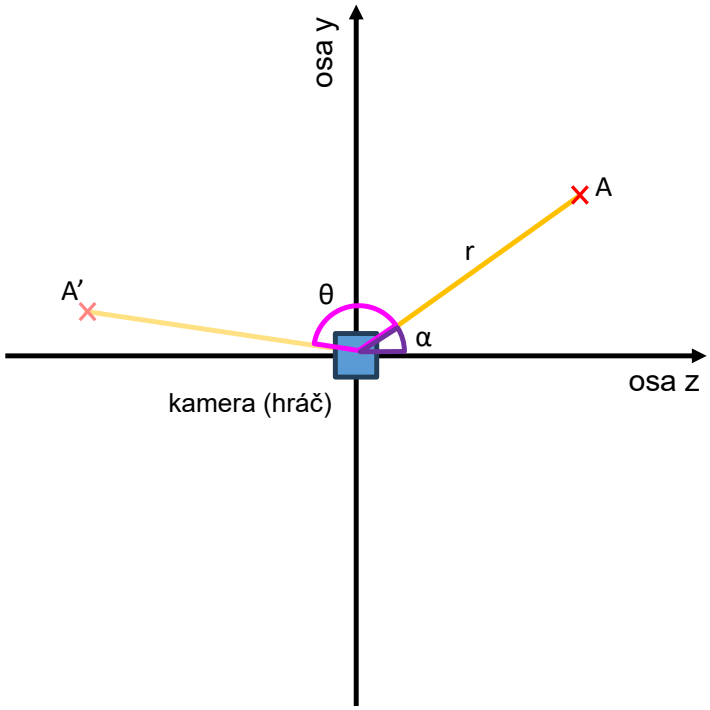
(obr. 2.3 – otáčení bodu A o úhel θ (*yaw*) v případě kamery otáčení kolem osy Y)

2.2.3 Rotace kolem osy X (pitch)

Pro rotaci roviny YZ (otáčení kamery nahoru a dolů) opět použiji odvozený vzorec. Tentokrát cyklickou záměnou zůstane stejná souřadnice X, kde hodnoty Y a Z se opět mění v závislosti na úhlu *pitch*.

θ odpovídá úhlu *pitch*.

$$
\begin{aligned}
x' &= x \\
y' &= y \cdot \cos(\theta) - z \cdot \sin(\theta) \\
z' &= y \cdot \sin(\theta) + z \cdot \cos(\theta)
\end{aligned}
$$



(obr. 2.4 – otáčení bodu A o úhel θ (*pitch*) v případě kamery otáčení kolem osy X)

2.3 Zobrazení do 2D roviny

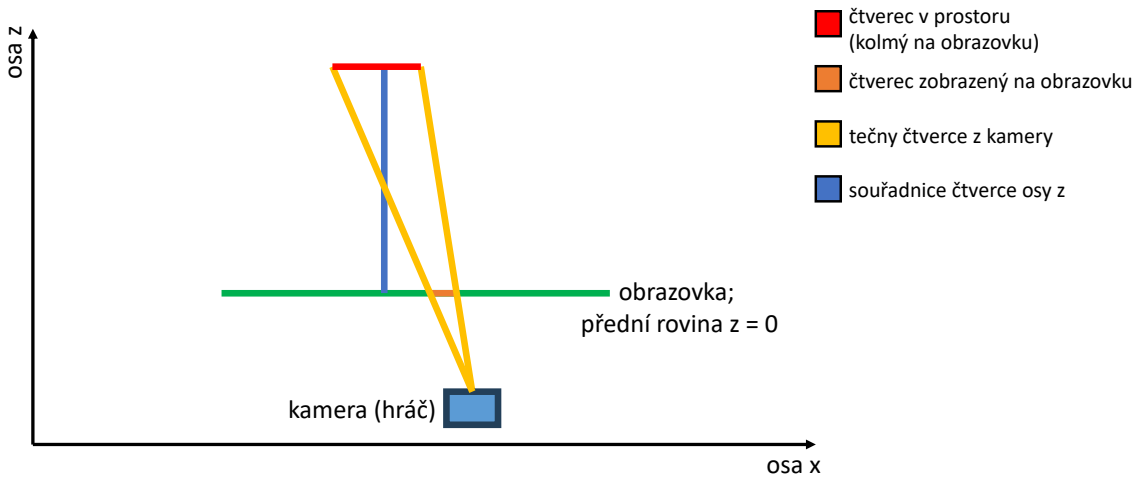
Při převodu 3D prostoru do 2D roviny v soustavě je využíván princip *perspektivní projekce*. Tento princip zajišťuje hloubkovou vizualizaci prostorových objektů na plochu obrazovky [2].

Perspektivní projekce pracuje s tzv. normalizovanými souřadnicemi, jejich princip je vysvětlen v předchozí části práce (viz oddíl 2.1 a 2.2). Normalizované souřadnice x, y a z, získané při pohledu hráče ve směru osy z, lze následně převést na odpovídající 2D souřadnice obrazovky.

$$X_{2D} = \frac{X_{3D}}{Z_{3D}}, \quad Y_{2D} = \frac{Y_{3D}}{Z_{3D}}$$

Tyto vzorce využívají podobnost trojúhelníků (*červená strana* s kamerou a *oranžová strana* s kamerou), kde *oranžová strana* vznikla jako úsečka mezi body, které jsou průsečíky tečen (z kamery k původnímu *červenému* čtverci) s rovinou obrazovky [3]. Koeficient podobnosti vychází ze vzdálenosti od roviny XY (souřadnice z) (obr. 2.5).

S růstem vzdálenosti stran krychle od obrazovky bude její obsah (zobrazeného útvaru na obrazovce) klesat. Program tedy počítá pozice na základě podílů v osách obrazovky s vzdáleností souřadnice z. Pokud krychle prochází obrazovkou, tak se bod posune 1 jednotku ve směru po ose z, aby nevznikl problém s dělením nulou a uživatel mohl vidět danou stranu na obrazovce (kód 2.6; řádek 2).



(obr. 2.5 – perspektivní zobrazení čtverců na obrazovku, pohled shora – převedeno do 2D, pro lepší orientaci)

```
If intersectionPoint(2) == 0 Then
    intersectionPoint = Array(intersectionPoint(0), intersectionPoint(1), 1)
End If

projectedX = intersectionPoint(0) / intersectionPoint(2)
projectedY = intersectionPoint(1) / intersectionPoint(2)
```

(kód 2.6 – perspektivní zobrazení bodů; upraveno)

3. Implementace programu

V této části se zaměřím na konkrétní implementaci celého programu v prostředí Excelu s využitím jazyka Visual Basic for Applications (dále jen *VBA*). Následně detailně rozeberu klíčové algoritmy, funkce a třídy, nezbytné pro funkci programu. Program je napsán v anglickém jazyce, aby byl dostupný co nejširšímu spektru uživatelů. Zdrojový kód spolu s komentáři je k dispozici v příloze práce.

3.1 Prostředí Excelu

V Excelu plní buňky roli pixelů, které se organizují do tabulky, fungující jako obrazovka, kde vytvářejí výsledný obrázek (snímek).

Excelový soubor se skládá ze tří listů. První list slouží jako hlavní obrazovka, na níž se zobrazuje herní scéna. Druhý list slouží pro nastavení, výpis statistik a další ovládací prvky. Poslední list slouží k uchování všech textur. Každá textura je vždy rozdělena do tří skupin buněk o rozměrech 8x8. První skupina obsahuje vrchní texturu krychle, prostřední představuje všechny boční strany krychle a třetí skupina zahrnuje spodní texturu krychle.

3.2 VBA (Visual Basic for Applications)

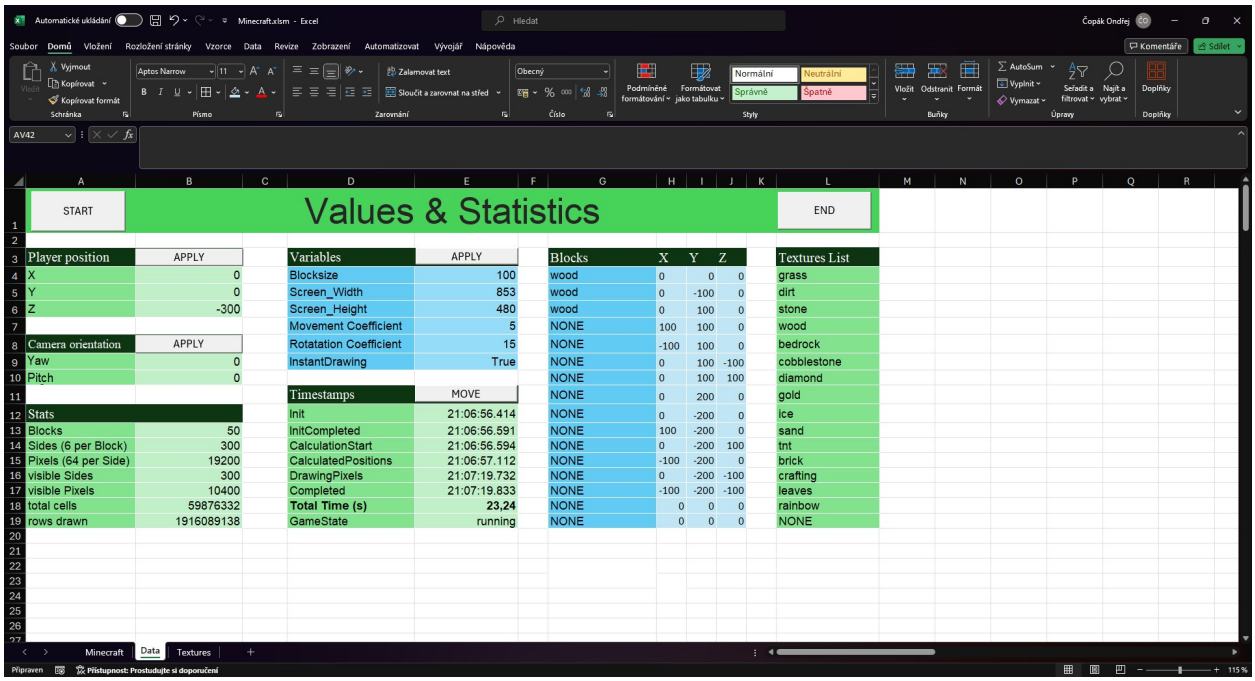
Pro implementaci programu jsem zvolil programovací jazyk VBA, jelikož je to jediný jazyk, který Excel podporuje. Tato volba má svá pozitiva – veškerá dokumentace k funkcím je vytvořena pouze pro tento jazyk, ale má také svá negativa, protože uživatel nemá možnost vybrat si lépe optimalizovaný jazyk.

VBA patří mezi interpretované jazyky [4]. Kód napsaný ve VBA je přeložen do proprietárního prováděcího kódu nazvaného *Microsoft P–code* a poté je ukládán jako zdrojový kód v dokumentu Excelu [4]. VBA umožňuje například ovládání Excelu a manipulaci s buňkami, což lze využít k implementaci herního prostředí.

3.3 Uživatelské rozhraní (ovládání programu)

V druhém sešitě *Data* se nachází veškeré ovládání celého programu. Uživatel si zde může nastavit pozici hráče, orientaci kamery, textury a pozice krychlí, nebo také nastavení obrazovky a zároveň má možnost přehledu o různých statistikách, kdy a kolik výpočtů program u jednotlivých snímků provedl.

Tento celek se blíže věnuje jednotlivým částem uživatelského rozhraní. Veškeré hodnoty se nastavují pomocí změny textové hodnoty buňky a následným potvrzením (kliknutím na tlačítko *Apply*). (obr. 3.1)



(obr. 3.1 – uživatelské rozhraní programu v prostředí Excelu)

3.3.1 Horní lišta

Horní lišta obsahuje nadpis, který informuje uživatele, že se nachází v sekci pro ovládání hry a statistiky. Vlevo se nachází tlačítko *Start*, které po kliknutí hráčem spustí funkci `Init`, která inicializuje celou hru. V pravé části zase tlačítko pro ukončení hry.

3.3.2 Player position

Zde si uživatel může nastavit současnou pozici hráče v souřadnicích x, y, z. Po provedení funkce pohybu zde program automaticky aktualizuje hodnoty aktuálních pozic hráče.

3.3.3 Camera orientation

Podobně jako v sekci pro pozici hráče, zde uživatel nastavuje úhly otočení kamery. Po provedení funkce pohybu program také aktualizuje aktuální hodnoty kamery.

3.3.4 Stats

V sekci *Stats* jsou zahrnuty statistiky, včetně celkového počtu krychlí v herním prostředí, počtu celkových stran (počet krychlí vynásobený 6) a počtu různých barevných jednotek textury (`Pixel` – počet stran vynásobený 64, což je počet pixelů v textuře). Dále tato sekce poskytuje informace o tom, kolik pozic stran, pixelů a buněk program vypočítal. Tato data lze využít jako indikátor úspěšnosti při optimalizaci programu.

3.3.5 Variables

Zde může uživatel změnit výchozí hodnoty grafického výstupu. *Blocksize* určuje délku strany krychlí, a tím i jednoznačné měřítko souřadnic. *Screen Width* a *Screen Height* představují velikost obrazovky v počtu buněk. *Movement* a *Rotation Coefficient* určují měřítka pohybu hráče v konkrétních směrech a otočení kamery ve stupních podle konkrétních os. *InstantDrawing* ovlivňuje, zda se jednotlivé buňky budou vybarvovat postupně, což může sloužit ke grafické vizualizaci celého procesu zobrazování, který je zároveň časově náročnější. Zároveň se všechny buňky budou vybarvovat bez průběžného vykreslování programu, čímž se výrazně zrychlí zakreslování.

3.3.6 Blocks

Uživateli je zde nabídnuto měnit texturu a pozici středů jednotlivých krychlí. Výchozí hodnota textury je *NONE*, což znamená, že krychle nebude do programu začleněna. Pokud chce uživatel vložit krychli do programu, musí zvolit jednu z 16 předpřipravených textur (název) a následně zvolit její souřadnice, které by měly být vždy unikátní a násobky velikosti strany krychle (*Blocksize*), aby se krychle nepřekrývaly.

3.3.7 Texture List

Jedná se o seznam, který umožňuje uživateli vidět, jaké různé textury krychlí jsou k dispozici.

3.3.8 Timestamps

Poslední sekce slouží jako indikátor rychlosti programu. Každá buňka obsahuje přesný čas operace s přesností na milisekundu. V prvním řádku uživatel vidí čas, kdy byl program spuštěn, a následující řádky ukazují, kdy byly jednotlivé funkce pro výpočet snímku dokončeny. Poslední řádek udává celkový čas výpočtu snímku od provedení uživatelského vstupu po dokončení zobrazování buněk. Tento indikátor lze opět využít k optimalizaci a testování programu.

3.4 Třídy (Classes)

Třídy usnadňují organizaci kódu a přispívají k modularitě a srozumitelnosti programu. Rozřazení dat a funkcí do logicky souvisejících celků usnadňuje správu a přehlednost programovacího prostředí, což je klíčové při vývoji komplexních systémů, jako je herní prostředí. Celkem program využívá 8 vlastních tříd.

3.4.1 Herní prostředí

3.4.1.1 Player

Třída `Player` slouží k uchování důležitých informací o hráči v herním prostředí. Tyto hodnoty zahrnují hráčovu aktuální pozici ve třech rozměrech (x, y, z) a úhly natočení kamery (*yaw, pitch*). Využitím této třídy se zpřehlední kód, protože namísto používání 5 různých proměnných se používají proměnné jedné třídy. Navíc používání tříd má za výhodu lepší škálovatelnost programu, například při přidávání více hráčů.

3.4.1.2 Game

Funkce třídy `Game` je uchování všech různých nastavení scény a ovládání hry. Tato funkce obsahuje všechny nastavení týkající se grafického zpracování, která jsou uvedena v oddílu 3.3.4. Stejně jako u třídy `Player` slouží třída `Game` ke zpřehlednění programu. Zároveň by se tato třída dala využít k ukládání různých profilů nastavení hry.

3.4.1.3 Calculations

Třída `Calculations` optimalizuje výpočty goniometrických funkcí (cosinus, sinus, tangens) v herním prostředí. Obsahuje předem vypočtené hodnoty těchto funkcí pro úhly od 0 do 359 stupňů, což eliminuje nutnost opakovaných výpočtů během běhu programu. Použitím této třídy lze efektivněji zpracovávat úhly a minimalizovat tím zátěž spojenou s výpočty goniometrických funkcí při výpočtu pozic krychlí.

3.4.1.4 Textures

`Textures` je třída, která obsahuje funkce pro načítání a ukládání barevných textur. Metoda `LoadInput` načítá textury ze specifikovaného rozsahu buněk v listu a ukládá je do vnitřní kolekce (list) podle zadaného jména textury. Každá textura je reprezentována 8x8 maticí barev.

Metoda `GetColorCollection` umožňuje získání uložené kolekce barev asociované s určitou texturou, což zrychluje přístup k texturám pro vykreslování herních objektů.

3.4.1.5 Stats

Třída `Stats` slouží k ukládání podstatných statistik o herním prostředí v konkrétním snímku (*frame*). Uchovává informace o počtu krychlí (*Blocks*), viditelných pixelů (*VisiblePixels*), viditelných stran krychlí (*VisibleSides*), počtu vykreslených buněk (*Cells*) a vykreslených řádcích (*RowsDrawn*). Tyto data lze využít k vyhodnocení optimalizačních funkcí, například kolik stran krychlí nemusel program počítat, neboť jsou mimo zorné pole hráče. Stejně jako v případě tříd `Player` a `Game` slouží tato třída ke zpřehlednění kódu.

3.4.2 Geometrické objekty

3.4.2.1 Block

Třída `Block` uchovává informace o jednotlivých krychlích. Obsahuje proměnné, jako je *distance*, která představuje vzdálenost středu krychle od hráče, *point*, což je poloha středu krychle, a *sides*, kolekci reprezentující všech šesti stran krychle.

3.4.2.2 Side

`Side` je třídou, která podobně jako `Block` obsahuje informace o jednotlivých stranách krychle. Obsahuje data, jako je *distance*, což značí vzdálenost středu strany od hráče, *texture*, která určuje texturu strany (třída `Texture`), *middlePoint*, což je poloha středu strany, a *orientation*, udávající orientaci strany na (*Up/Down/Left/Right/Top/Bottom*). Dále obsahuje vrcholy strany označené jako *a, b, c* a *d*.

3.4.2.3 Pixel

Poslední třída `Pixel` je podobná třídě `Side`. Na rozdíl od této třídy však neobsahuje střed a vzdálenost od hráče. Místo toho obsahuje konkrétní barvu na základě pixelu textury. Každá instance třídy `Side` odpovídá vždy 64 instancím třídy `Pixel`.

3.5 Procedury (Sub, Functions)

Celý program je rozdělen do pěti modulů (souborů), které tematicky sdružují funkce plnící různé úlohy při výpočtu snímku nebo interakci s prostředím Excelu. Podobně jako u tříd pomáhají moduly zpřehlednit kód.

V tomto prostředí se používají dva typy procedur: *Sub* a *Function*. Procedura Sub (*Subprocess* – podproces), na rozdíl od *Function* (Funkce), nedokáže vrátit hodnotu. Nicméně veškeré změny hodnot proměnných provedené v této proceduře zůstanou zachovány i po jejím ukončení. Sub procedury lze také přiřadit k tlačítkům a klávesovým zkratkám. *Function* se obvykle používají k provádění matematických operací a vždy musí vrátit předem deklarovanou hodnotu. *Sub* procedury se často využívají k interakci s Excelem, tj. práci s buňkami.

V této práci termín *funkce* zahrnuje obě procedury (funkce i podprocesy), se zaměřím na vybrané funkce, které jsou pro pochopení fungování programu nejpodstatnější. Detailněji se práce věnuje algoritmům pro optimalizaci v oddíle 4.3.

3.5.1 Main

Tento modul obsahuje nejdůležitější funkce pro vizualizaci herního prostředí. Hlavní část obsahuje procedury, které numericky zpracovávají vstupní hodnoty a vytvářejí z nich obraz.

3.5.1.1 Init (Sub)

Proces se spustí pouze po kliknutí na tlačítko. Po kliknutí proběhne načtení všech textur, pozic krychlí, pozic hráče, nastavení kamery a výpočtu hodnot goniometrických funkcí. Následně jsou zavolány funkce pro výpočet současného snímku a vytvoření klávesových zkratek.

3.5.1.2 Move (Sub)

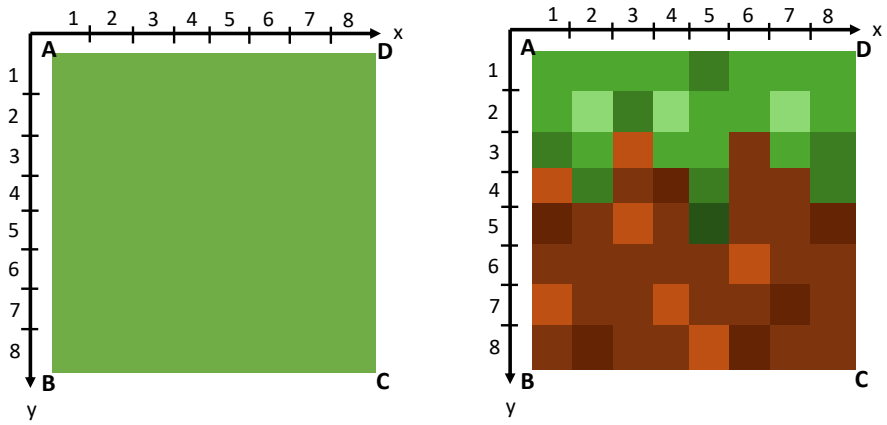
Nejprve se vymaže předchozí snímek tím, že se přebarví stejnou barvou. Poté se zde spustí veškeré funkce, které zajišťují zaznamenávání statistik a času spuštění programu. Dále jsou postupně zavolány tři funkce – `CalculatePositions`, `ApplyTexture` a `ConvertDraw2D`, na které se podrobně zaměřuji v kapitolách 3.5.1.3 až 3.5.1.5. Výsledkem těchto funkcí je kolekce všech pixelů, které vytvářejí výsledný snímek.

3.5.1.3 CalculateSides (Function)

Funkce nejdříve vytvoří kolekci tříd `Block` a přiřadí jim texturu a pozici na základě uživatelského vstupu. Poté založí novou kolekci tříd `Side` pro každou krychli s přiřazenými šesti stranami. Pro všechny vrcholy stran vypočítá nové pozice na základě polohy hráče a natočení kamery pomocí funkce `CalculateCoordinates`. Nakonec seřadí všechny strany podle vzdálenosti od hráče od nejvzdálenější po nejbližší, aby hráč nemohl vidět skrze strany.

3.5.1.4 ApplyTexture (Function)

Funkce ApplyTexture dostane na vstup kolekci Side a vrací kolekci `Pixel`. Pro každou stranu funkce vytvoří 64 menších stran (objekt `Pixel`). Tyto pixely jsou definovány stejně jako strany – čtyřmi vrcholy *a, b, c, d,* které vznikají jako $\frac{k}{8}$ (pro k 1 až 8) násobkem vektorů $\overrightarrow{ab}$ a $\overrightarrow{ad}$. (viz obrázek 3.2, kód 3.3; řádek 5). Následně se aplikuje textura podle orientace (kód 3.3; řádek 16) a zkontroluje se, jestli se všechny vrcholy nacházejí v rovině před hráčem. Pokud ano, `Pixel` se uloží.



(obr. 3.2 – vizualizace aplikace textur - vlevo 1x `Side`, napravo 64x `Pixel`)

```
Function ApplyTexture(allSidesPre As Collection) As Collection
    For Each sIndex In allSidesPre
        For x = 0 To 7
            For y = 0 To 7
                ad = ((s.d(0) - s.a(0)) / 8, (s.d(1) - s.a(1)) / 8, (s.d(2) - s.a(2)) /
                    8)
                ab = ((s.b(0) - s.a(0)) / 8, (s.b(1) - s.a(1)) / 8, (s.b(2) - s.a(2)) /
                    8)

                a3 = (s.a + (ad(0) * x + ad(1) * x + ad(2) * x) + (ab(0) * y + ab(1) * y
                    + ab(2) * y))

                b3 = (s.a + (ad(0) * x + ad(1) * x + ad(2) * x) + (ab(0) * (y + 1) + ab
                    (1) * (y + 1) + ab(2) * (y + 1)))

                c3 = (s.a + (ad(0) * (x + 1) + ad(1) * (x + 1) + ad(2) * (x + 1)) + (ab
                    (0) * (y + 1) + ab(1) * (y + 1) + ab(2) * (y + 1)))

                d3 = (s.a + (ad(0) * (x + 1) + ad(1) * (x + 1) + ad(2) * (x + 1)) + (ab
                    (0) * y + ab(1) * y + ab(2) * y))

                If s.orientation = "up" Then
                    col = textureColor(y + 1 + 18)(8 - x)
                ElseIf s.orientation = "down" Then
                    col = textureColor(y + 1)(8 - x)
                Else
                    col = textureColor(y + 1 + 9)(8 - x)
                End If

                If IsPointInsideFOV(a3, b3, c3, d3) = TRUE Then
                    Set newPixel = New pixel
                    newPixel.Initialize a3, b3, c3, d3, col
                    allSquares.Add newPixel
                End If
            Next y
        Next x
    Next sIndex
Set ApplyTexture = allSquares
```

(kód. 3.3 – aplikace textury každé ze stran; upraveno)

3.5.1.5 ConvertDraw2D (Function)

Poslední funkce `ConvertDraw2D` má za cíl převést všechny `Pixely` ze 3D do 2D a zobrazit je v konkrétních buňkách. Pro každý `Pixel` se vypočítají souřadnice podle algoritmu popsaného v oddíle 2.3. Předchozí část programu zabraňuje vstupu veškerých souřadnic, které mají souřadnici z zápornou.

Problém dělení 0, když souřadnice $z = 0$, se vyřeší nastavením na hodnotu $z = 1$, takže hráč bude tento objekt vidět. V poslední části cyklu se tyto body na škálují podle nastavení velikosti obrazovky (kód 3.4; řádek 8).

Následně se pro každý čtyřúhelník (`Pixel`) na základě všech 4 vrcholů zjistí veškeré souřadnice každé strany pomocí *Bresenhamova algoritmu* (viz oddíl 3.5.2.3). Funkce poté určí, které souřadnice na obrazovce leží uvnitř čtyřúhelníku, čímž získá všechny souřadnice každého `Pixelu`.

```
1  If Int(intersectionPoint(2)) = 0 Then
2      intersectionPoint = Array(intersectionPoint(0), intersectionPoint(1), 1)
3  End If
4
5  projectedX = intersectionPoint(0) / intersectionPoint(2)
6  projectedY = intersectionPoint(1) / intersectionPoint(2)
7
8  If G.screenHeight < G.screenWidth Then
9      screenX = Int((projectedX + 1) * 0.5 * G.screenHeight + (G.screenWidth - G.
           screenHeight) / 2)
10     screenY = Int((1 - projectedY) * 0.5 * G.screenHeight)
11 Else
12     screenX = Int((projectedX + 1) * 0.5 * G.screenWidth)
13     screenY = Int((1 - projectedY) * 0.5 * G.screenWidth + (G.screenHeight - G.
           screenWidth) / 2)
14 End If
```

(kód. 3.4 – převod souřadnic ze 3D do 2D; upraveno)

3.5.2 Geometry

V modulu `Geometry` se nacházejí všechny funkce, které se zabývají počítáním souřadnic. Nachází se zde 3 podstatné funkcí.

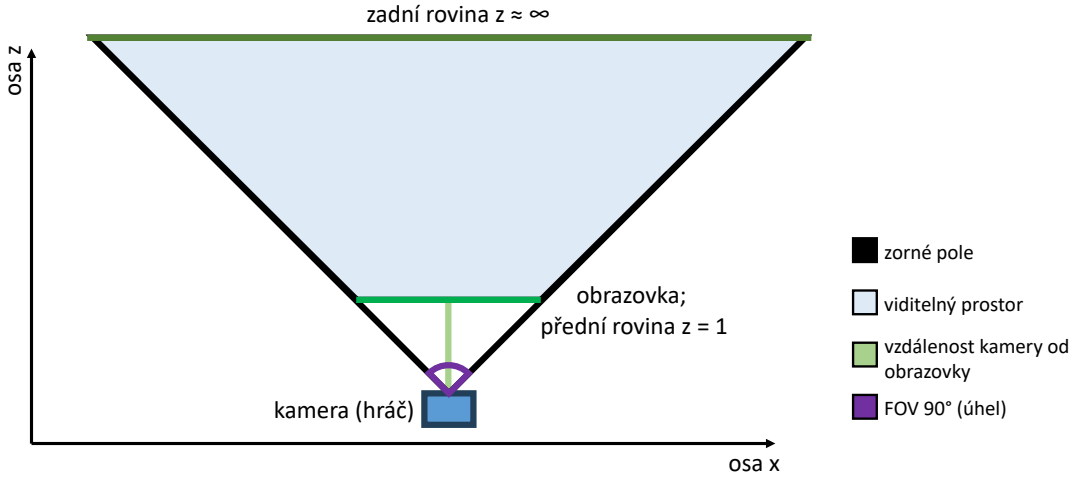
3.5.2.1 CalculateCoordinates (Function)

Tato funkce je implementací již zmíněného algoritmu v oddílu 2.1 a 2.2. Jako první se musí souřadnice jednotlivých stran posunout o opačné souřadnice pozice hráče a poté už nezáleží na pořadí otáčení kolem jednotlivých os X a Y. Výstupem funkce jsou nové souřadnice bodu v závislosti na parametrech hráče a kamery.

3.5.2.2 IsPointInsideFOV (Function)

Úkolem procedury jsou dvě věci. Ověřit, zda je daný bod v rovině před hráčem a také ověřit, zda bod leží v zorném poli hráče. První podmínka je splněna, pokud je souřadnice $z > 0$.

Druhá podmínka vychází z matematického řešení převodu do 2D v oddílu 2.3. Zorné pole hráče připomíná komolý čtyřboký jehlan, kde horní podstava leží v rovině obrazovky hráče (rovina $z = 0$) a spodní podstava běží směrem k nekonečné souřadnici z (obr. 3.5) [5]. V každé rovině $z = k$, $k \in (0, \infty)$ je průnik dané k-té roviny se zorným polem obdélník, takže stačí spočítat, jestli se bod (na základě pozice z) nachází v něm. Nejprve je zapotřebí spočítat měřítko obdélníku. To také záleží na souřadnici z. Čím větší je souřadnice z, tím větší ten obdélník bude. Měřítko se vypočítá pomocí goniometrické funkce tangens (obr. 3.5 a kód 3.6). Funkce zjistí délky menší strany a poté se spočítá délka druhé strany obdélníku v závislosti na poměru stran obrazovky (kód 3.6; řádek 2). Pokud jsou obě podmínky splněny, funkce vrátí hodnotu pravda.



(obr. 3.5 – zorné pole hráče, pohled shora – převedeno do 2D, pro lepší orientaci)

```
1  radius = C.tan(90 / 2) * point(2)
2  If G.screenWidth > G.screenHeight Then
3      If (radius * G.screenWidth / G.screenHeight) - projectedPoint(0) >= 0 And radius -
           projectedPoint(1) >= 0 Then
4          result = TRUE
5      End If
6  Else
7      If radius-projectedPoint(0) >= 0 And (radius * G.screenHeight / G.screenWidth) -
           projectedPoint(1) >= 0 Then
8          result = TRUE
9      End If
10 End If
```

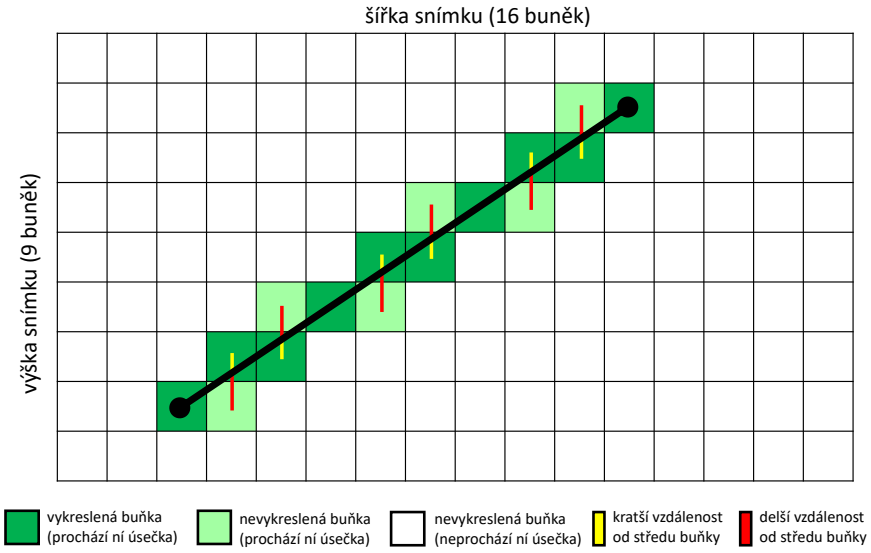
(kód. 3.6 – kontrola, jestli se nachází bod uvnitř zorného pole; upraveno)

3.5.2.3 GetLinePixels (Sub)

Závěrečná funkce modulu `Geometry` má za úkol vypočítat všechny 2D souřadnice úsečky mezi dvěma body. Dosáhnout výsledku lze za použití *Bresenhamova algoritmu*.

Bresenhamův algoritmus využívá inkrementálního rozhodování o tom, který pixel vybrat pro vykreslení. Začíná výpočtem rozdílů mezi souřadnicemi koncových bodů, následně postupně prochází body mezi nimi, vybírá vhodné pixely a aktualizuje rozhodovací proměnné (obr. 3.7) [6].

Dále se v rámci optimalizace programu pouze uloží do slovníku nejnižší a nejvyšší hodnota řádku (x) podle klíče sloupce (y). Jelikož se tento proces dělá pro každý bod čtyřúhelníku a vzhledem k tomu, že výsledným výstupem je soubor pixelů, které leží ve čtverci, tak pro každé y musí být všechny body od nejnižšího x do nejvyššího x také elementem čtyřúhelníku. Tuto informaci lze poté využít při vykreslování buněk po řádcích, neboť v Excelu trvá stejnou dobu nastavit barvu jedné buňky jako nastavit stejnou barvu více buněk v obdélníkovém rozsahu [7].



(obr. 3.7 – Bresenhamův algoritmus pro získávání buněk na základě přímky)

3.5.3 Functions

Zde se nacházejí funkce, které srovnávají kolekce (převážně strany krychlí), podle daných kritérií.

3.5.3.1 RemoveDuplicateSides (Sub)

Tato optimalizační funkce odstraní veškeré duplicitní strany, které mají stejný střed. Pokud jsou všechny krychle ve vzdálenosti násobků délek stran, platí, že každý střed může mít pouze strany se stejnou orientací. Zároveň, pokud se v jednom místě nenachází více krychlí, tak v každém středu strany se mohou nacházet maximálně dvě strany.

Funkce dosahuje výsledku tím, že převede kolekci (list) na knihovnu indexovanou podle středu a následně zpětně na kolekci. Vzhledem k tomu, že každý index v knihovně obsahuje pouze jednu hodnotu, výsledkem je list, kde zůstává vždy strana s původně vzdálenějším středem krychle blíže hráči. Vysvětlení tohoto chování lze nalézt v oddílu 4.3.4.3.

3.5.3.2 ReverseCollection (Function)

Jedná se o jednu ze základních funkcí, kterou bylo nutné manuálně implementovat. Tato funkce vrátí nový list, který je seřazen od posledního prvku po první.

3.5.3.3 SortByDistance (Function)

Výstupem této funkce je seřazený list sestupně podle vzdálenosti stran od hráče. Procedura využívá vlastní implementaci řazení čísel pomocí *QuickSortu*.

3.5.3.4 QuickSort (Sub)

`QuickSort` postupně rozděluje list (kolekce) čísel na menší listy pomocí vybraného prvku zvaného *pivot*. Prvky jsou poté uspořádány tak, že prvky menší než *pivot* jsou nalevo a větší jsou napravo [8]. Tento proces je opakovaný rekurzivně, dokud není list seřazen.

3.5.4 Visual

Předposlední soubor obsahuje funkce, které komunikují s Excelem. Funkce se týkají především vybarvováním buněk, zapisováním hodnot a načítáním nastavení.

3.5.4.1 ClearScreen (Sub)

Úkolem této procedury je vyčistit poslední snímek od všech zobrazených krychlí. Funkce toho dosáhne tím, že nastaví barvu všech buněk na jednolitou barvu, defaultně modrou, která představuje nebe.

3.5.4.2 FillCellsInRange (Sub)

Tato funkce dostane na vstupu souřadnice levého horního rohu, pravého spodního rohu a barvu pro daný rozsah buněk. Následovně tato funkce ověří, že všechny buňky se nacházejí na obrazovce, a ty vybarví zvolenou barvou (na základě textur).

3.5.4.3 SetPlayer/Variables (Sub)

Obě funkce načtou informace ohledně pozic hráče/nastavení herního prostředí z 2. listu (nastavení) do paměti programu. Obě funkce se volají vždy před začátkem výpočtu současného snímku.

3.5.5 Keys

Poslední modul se stará o kontrolování hry pomocí klávesových zkratek. Ovládání hry pomocí klávesnice je důležitým prvkem k zjednodušení ovládání hry, místo klikání na tlačítka (na obrazovce) nebo manuálního nastavování číselných pozic hráče.

Excel neumožňuje přiřazovat jednotlivým klávesám možnost spuštění funkcí, proto ke všem klávesovým zkratkám byla přiřazena klávesa *levý shift*. Proto namísto pohybu dopředu pomocí klávesnice *w* se hra ovládá pomocí *shift+w*. V následujících funkcích je shift z klávesových zkratek z důvodu přehlednosti vypuštěn.

Po spuštění každé z funkcí se nejprve upraví pozice hráče nebo natočení kamery vzhledem ke klávesové zkratce a vzápětí se spustí funkce pro výpočet současného snímku. Proměnné *moveBy* a *rotateBy* určují hodnotu, o kolik se hráč pohybuje a otáčí a lze je měnit v sešitu nastavení. V práci symbol *+-* označuje, zda je hodnota kladná nebo záporná v závislosti na směru pohybu hráče.

3.5.5.1 BindKeys (Sub)

Po kliknutí na tlačítko *Start* se spustí tato funkce. Nastaví veškeré klávesové zkratky sloužící k ovládání hry z procedur, které jsou níže uvedeny.

3.5.5.2 FreeKeys (Sub)

Na rozdíl od `BindKeys` tato funkce naopak vymaže všechny klávesové zkratky sloužící k ovládání hry.

3.5.5.3 MoveUp/Down (Sub)

Klávesové zkratky: *mezerník/x*
Pohyb po ose Y

Na rozdíl od pohybu po osách X nebo Z, nezáleží na otočení kamery, proto při pohybu hráče nahoru a dolu se mění pouze po ose Y.

```
1  P.y = P.y +- G.moveBy
```

(kód. 3.8 – pohybování hráče nahoru, dolu; upraveno)

3.5.5.4 MoveLeft/Right (Sub)

Klávesové zkratky: *a/d*
Pohyb po osách X, Z

Zde je potřeba vzít v úvahu otočení kamery hráče podle osy Y. Pokud by se hráč nacházel v bodě $[0, 0, 10]$, otočení kamery y by bylo 0, tak hráč by se měl pohybovat pouze po ose X. V případě, že by hráč stál v bodě $[10, 0, 0]$ a kamera by byla $y = -90°$, tak se hráč musí pohybovat po ose Z. Proto je nutné použít goniometrické funkce v závislosti na otočení kamery.

```
1  dx = C.sin(P.yaw) * G.moveBy
2  dz = C.cos(P.yaw) * G.moveBy
3
4  P.x = P.x -+ dz
5  P.z = P.z +- dx
```

(kód. 3.9 – pohybování hráče doleva, doprava; upraveno)

3.5.5.5 MoveFront/Back (Sub)

Klávesové zkratky: *w/s*
Pohyb po osách X, Z

Stejně jako u pohybu doleva a doprava, i při pohybu nahoru a dolu se opět pracuje se souřadnicemi vztaženými k hráči, nikoliv k osám. Proto je také nutné stejně zohlednit otočení kamery podle osy Y pomocí stejné úvahy.

```
1  dx = C.sin(P.yaw) * G.moveBy
2  dz = C.cos(P.yaw) * G.moveBy
3
4  P.x = P.x +- dx
5  P.z = P.z +- dz
```

(kód. 3.10 – pohybování hráče dopředu, dozadu; upraveno)

3.5.5.6 LookUp/Down (Sub)

Klávesové zkratky: *r/f*
Otočení kamery podle osy X

Hodnota otáčení podle osy X (*pitch*) v rozmezí $(-90; 90)$ stupňů vyjadřuje úhel natočení hlavy hráče a omezuje možnost pohledu směrem nahoru a dolu. Tato omezení odpovídají reálným fyzickým schopnostem pohybu hlavy člověka.

```
1  P.pitch = P.pitch +- G.rotateBy
2
3  If P.pitch >(<) +-90 Then
4      P.pitch = -+90
5  End If
```

(kód. 3.11 – otáčení kamery nahoru, dolu; upraveno)

3.5.5.7 LookLeft/Right (Sub)

Klávesové zkratky: *q/e*
Otočení kamery podle osy Y

V případě otáčení (*celého těla hráče*) podle osy Y (*yaw*) v rozmezí $(0; 360)$, které je udáváno ve stupních, umožňuje program hráči otáčet se kolem vlastní osy. Pokud hráč překročí horní hranici tohoto rozsahu, hodnota otáčení se sníží nebo zvýší o jednu periodu (360°). Tímto způsobem se zajistí, že program může využívat předem spočtených hodnot goniometrických funkcí, což usnadňuje výpočty v rámci hry.

```
1  P.yaw = P.yaw +- G.rotateBy
2
3  If P.yaw >=(<=) 360(0) Then
4      P.yaw = P.yaw +- 360
5  End If
```

(kód. 3.12 – otáčení kamery doleva; doprava, upraveno)

4. Optimalizace programu

Poslední část práce se zabývá analyzováním programu a hledáním možností optimalizací.

4.1 Limitace VBA

Při práci ve 3D prostředí není VBA optimálním jazykem. Na rozdíl od počítačové hry Minecraft není prostředí Excelu koncipováno pro zpracování velkého množství výpočtů v krátkém čase. VBA je především navržen pro automatizaci v aplikacích od Microsoftu [9]. Jazyk není schopen provádět více částí v kódu současně (tzv. *vícevláknovost*) a zároveň nemá možnost využívat *GPU*, grafický procesor určený pro zpracování velkých objemů dat [9].

Dalším problémem je využívání statických typových kontrol (proměnné nejsou vázány na konkrétní datový typ, ale mohou být v průběhu programu měněny). To výrazně zpomaluje kód kvůli nutnosti dynamické adaptace k různým datovým typům [9].

4.2 Složitosti funkcí

Tato část se věnuje tzv. *Landauovi notaci* (v angličtině *Big O Notation*), která určuje náročnost výpočtu v závislosti na růstu parametru. Při hodnocení složitosti každé funkce se vždy upřednostňuje notace nejvyššího řádu [10]. To platí zejména v případech, kdy funkce kombinuje více podfunkcí, které nejsou vzájemně závislé v rámci cyklů. Složitost se v této práci značí pomocí $O(f(x))$.

4.2.1 Init

Jedná se o lineární notaci $O(n)$, která závisí na počtu textur nebo počtu hodnot goniometrických funkcí.

4.2.2 CalculatePosition

Funkce se chová jako $O(n)$, kde n je počet krychlí. Pro každou krychli se spočítá 30 pozic (6 stran, 4 vrcholy a střed) a následně se strany seřadí podle vzdálenosti pomocí *QuickSortu* (oddíl 3.5.3.4), což je v průměru $O(n \log n)$ [8].

4.2.3 ApplyTexture

Tato funkce také vykazuje lineární složitost $O(n)$. Prochází všechny strany a rozděluje je na 64 částí. Koeficient bývá poměrně vysoký, v řádech desítek, kvůli všem početním funkcím, avšak zůstává konstantní v závislosti na počtu stran.

4.2.4 ConvertDraw2D

Tato funkce má největší množství výpočtů. Pro každou stranu se vypočítají 2D souřadnice všech čtyř vrcholů. Program poté musí určit buňky, které nastavit na danou barvu na základě pozice všech bodů ležících ve čtyřúhelníku, což se děje pomocí *Bresenhamova algoritmu* (oddíl 3.5.2.3).

Celková složitost této funkce je obtížná k určení, a může dosahovat až $O(n \cdot p^3)$, kde n je počet stran a p je průměrná délka strany (v buňkách), která v blízkosti hráče může dosahovat hodnot blížících se nekonečnu.

4.2.5 Celková

Vzhledem k tomu, že tyto funkce jsou vykonávány postupně a každá pouze jednou, celková komplexita se řídí notací funkce `ConvertDraw2D`, která má nejvyšší časovou náročnost.

Ostatní funkce mají časovou náročnost převážně kolem $O(n)$. Při zpracování velkého množství souřadnic, což platí již při výpočtu jedné krychle (v rozumné vzdálenosti od hráče), jsou tyto funkce z hlediska časové náročnosti zanedbatelné ve srovnání se složitostí třetího stupně.

4.3 Optimalizace

Pro plynulý zážitek by běžná počítačová hra měla být schopna vykreslit jeden snímek za $\frac{1}{60}$ sekundy. Tomu se říká počet snímků za sekundu (*fps*).

Cílem této části je zredukovat počet výpočtů tak, aby se program této hodnotě co nejvíc přiblížil. Toho lze v případě VBA dosáhnout pouze pomocí hledání rychlejších algoritmů a vynecháním výpočtů objektů, které hráč nevidí.

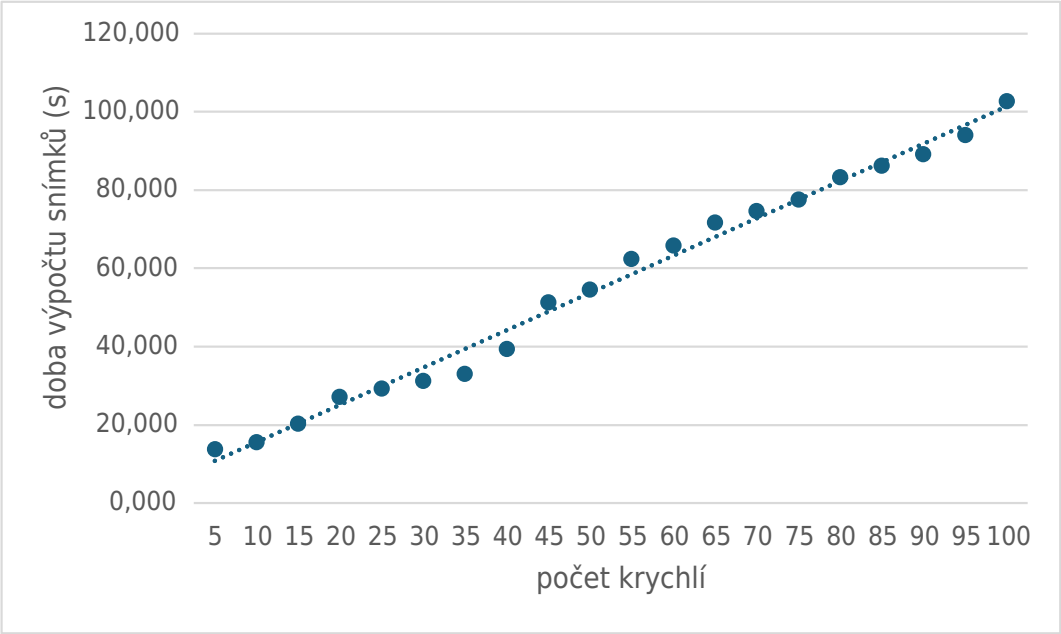
4.3.1 Závislost výkonu

V prvním segmentu optimalizace se detailněji zaměřím na to, jak růst některých z parametrů může ovlivnit celkovou rychlost programu. Tato analýza se opírá o naměřené hodnoty z provedených testů, které byly realizovány na celkově optimalizovaném kódu. Konkrétně se jedná o program, který integruje všechny optimalizační opatření popsané v sekci 4.3.4.

Dále se zaměřím na vztah mezi růstem počtu krychlí a počtu vykreslovaných buněk s výkonem programu, s cílem porozumění, jak jednotlivé parametry ovlivňují jeho chování.

4.3.1.1 Počet krychlí

Test zkoumal závislost času vykreslování snímku na rostoucím počtu krychlí. Testy byly provedeny na sadě od 5 do 100 krychlí s krokem 5 krychlí. Krychle byly náhodně rozmístěny v blízkém okolí hráče. Z grafu (obr. 4.1) vyplývá, že závislost je lineární, a s rostoucím počtem krychlí se doba vykreslování na jednu krychli blíží jedné sekundě. To znamená, že vykreslení jedné krychle trvá programu zhruba 1 sekundu (tab. 4.2).



(obr 4.1 – závislost doby výpočtu jednoho snímku na celkovém počtu vykreslovaných krychlí (optimalizovaný kód))

Počet krychlí	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
Doba výp. snímku (s)	13,715	15,616	20,354	27,087	29,257	31,233	33,010	39,448	51,343	54,532
Čas / krychle (s)	**2,743**	**1,562**	**1,357**	**1,354**	**1,170**	**1,041**	**0,943**	**0,986**	**1,141**	**1,091**

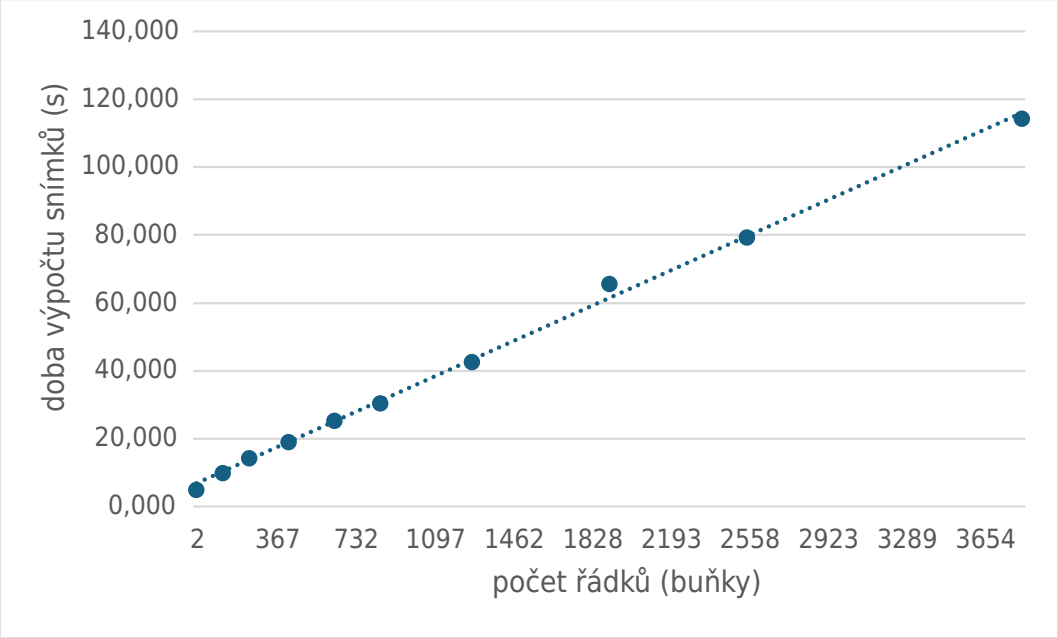
Počet krychlí	55	60	65	70	75	80	85	90	95	100
Doba výp. snímku (s)	62,370	65,750	71,733	74,558	77,524	83,243	86,227	89,180	94,052	102,588
Čas / krychle (s)	**1,134**	**1,096**	**1,104**	**1,065**	**1,034**	**1,041**	**1,014**	**0,991**	**0,990**	**1,026**

(tab. 4.2 – doba výpočtu jednoho snímku v závislosti na celkovém počtu krychlí (optimalizovaný kód))

4.3.1.2 Počet buněk

Test zkoumal závislost času vykreslování snímku na rostoucím počtu buněk tvořící obrazovku. Testy byly provedeny v rozpětí od výšky řádku 9 do 2160 buněk v posloupnosti běžně používaných hodnot od $nHD(360)$ do $4KUHD(2160)$ s poměrem obrazovky $16:9$ [11].

Z výsledků lze usoudit, že s rostoucím počtem buněk výrazně klesá čas na výpočet jedné buňky. Toto pravidlo platí, i když se čas vztáhne na počet řádků (*buněk*) (obr. 4.3). To znamená, že níže optimalizovaný kód skutečně urychluje vykreslování buněk po řádcích. Z testů vypadá, že limitní hodnota pro řádek bude blízká 0,03 sekundy na řádek (tab. 4.4).



(obr. 4.3 – závislost doby výpočtu jednoho snímku na počtu vykreslovaných buněk (optimalizovaný kód))

Celkový počet buněk	144	9216	36864	102400	230400	409600	921600	2073600	3686400	8294400
Šířka obrazu (buňky)	16	128	256	427	640	853	1280	1920	2560	3840
Výška obraz (buňky	9	72	144	240	360	480	720	1080	1440	2160
Doba výp. snímku (s)	5,031	9,804	14,196	19,055	25,375	30,391	42,555	65,640	79,297	114,359
Čas / 1000 buněk (s)	**34,938**	**1,064**	**0,385**	**0,186**	**0,110**	**0,074**	**0,046**	**0,032**	**0,022**	**0,014**
Čas / počet řádků (s)	**0,314**	**0,077**	**0,055**	**0,045**	**0,040**	**0,036**	**0,033**	**0,034**	**0,031**	**0,030**

(tab. 4.4 – doba výpočtu jednoho snímku v závislosti na celkovém počtu vykreslovaných buněk (optimalizovaný kód))

4.3.2 Sady testů

Všechny optimalizace byly testovány na základě 5 sad testů, které vycházejí z 10 různých měření. Každá sada testů byla navržena s ohledem na časovou povahu a využívala stejné náhodně umístěné krychle napříč měření. Průměrná časová zlepšení pro každou optimalizaci jsou zaznamenána v tab. 4.5.

Výsledky měření se mohou lišit v závislosti na zařízení, na kterém byly provedeny. Měření doby vykreslování stejných snímků se liší například kvůli prioritizaci procesoru, který může v daný moment prioritizovat jiné úlohy, množství dostupné paměti *RAM* a další [12]. Naměřené hodnoty jsou uvedené v příloze práce a program tyto hodnoty pročítal přes 16 hodin.

- Hráč ve středu jedné krychle, náhodné otáčení kamery.
- 50 náhodně umístěných krychlí v blízkosti hráče. (Nemusí být v zorném poli hráče, nezapočítává se do průměru)
- 50 náhodně umístěných krychlí v blízkosti hráče bez zakreslování pixelů.
- 50 náhodně umístěných krychlí v blízkosti hráče bez všech výpočtů, pouze zakreslování pixelů. (Určeno jako rozdíl předchozích dvou měření)
- Pohled na 27 sousedících krychlí s konstantními parametry pozic a otáčení.

4.3.3 Bez optimalizace

Bez jakýchkoliv optimalizací měl program problém s některými výpočty stran v blízkosti hráče, a dokonce program nedokázal tyto hodnoty spočítat kvůli chybě přetečení hodnot (*overflow*) u některých kolekcí. Výpočet 50 krychlí trval programu v průměru kolem **20 minut**, a průměrný čas všech testů se pohyboval kolem **8 minut** (tab. 4.5). Tento čas je výrazně dlouhý a je nutné ho zkrátit.

4.3.4 Konkrétní optimalizace

4.3.4.1 Zorné pole hráče

Tato optimalizace výrazně snižuje počet výpočtů pro všechny body, které hráč na obrazovce nemůže vidět, vycházející z jeho zorného pole, které je v tomto programu 90°. To vede ke snížení výpočtů pro množství 2D souřadnic v blízkosti hráče. Největší zlepšení výkonu je patrné v *1. sadě testů*, kde se program v průměru zlepšil o **68 %** (tab. 4.6). Podobné zlepšení je také viditelné při testu s *náhodně umístěnými 50 krychlí*, zejména když se hráč nachází ve více krychlích současně (tab. 4.6). Naopak tato optimalizace nemá výrazný vliv při testu s *27 sousedícími krychlemi*, které jsou již v zorném poli hráče. Stejně tak není zlepšení patrné při testu s *50 krychlemi bez zakreslování*, protože optimalizace se nevztahuje k samotnému kreslení barev buněk do sešitu (tab. 4.6). Implementace algoritmu je v oddíle 3.5.2.2.

4.3.4.2 Počet stran krychle

Jedná se o algoritmus, který snižuje počet zobrazených stran pro každou krychli. Pokud se hráč dívá na krychli a není uvnitř, ale vně krychle, může v jednom okamžiku vidět maximálně tři různé strany (z jednoho bodu). Při srovnání původních dat, kde byly testované všechny optimalizace, s daty, kde byla tato optimalizace vynechána, lze pozorovat **40 %** zrychlení při testu *zobrazování 27 krychlí* (tab. 4.7). Ve srovnání s programem bez jakýchkoliv optimalizací je však toto zrychlení pouze **8 %** (tab. 4.6). *Uvnitř krychle* je dokonce rychlejší než při použití celkové optimalizace (tab. 4.7), což je způsobeno odchylkou zmíněnou výše.

4.3.4.3 Duplicitní strany

Tato optimalizace vyřazuje strany, které se nacházejí blízko sebe. Funkce odstraní pouze jednu z nich pro lepší průběžnou vizualizaci. Tato optimalizace by mohla být vylepšena tak, aby vyřazovala obě strany, protože v případě, kdy se krychle dotýkají, ani jedna z dotýkaných stran nemůže být vidět (za předpokladu, že jsou krychle umístěny v násobcích svých stran). Nejvýraznější zlepšení se projevuje v testu, kde se všech *27 krychlí* dotýká. V porovnání s programem bez optimalizace se kód v průměru zrychlil o **12 %** (tab. 4.6) a oproti celkové optimalizaci o **60 %** (tab. 4.7).

4.3.4.4 Vykreslování po řádcích

Vykreslování po řádcích je optimalizace, kde program vybarvuje buňky po řádcích podle současné barvy textury místo toho, aby vybarvoval každou buňku zvlášť. Tato optimalizace zlepšuje výkon, zejména v sadě testů *50 krychlí se zakreslováním*, a to o **95 %** v porovnání s celkovou optimalizací (tab. 4.6) a **25 %** vůči programu bez optimalizací (tab. 4.6). Navíc dochází ke snížení složitosti zakreslování buněk do sešitu z $O(n^2)$ na $O(n)$.

4.3.5 Veškeré optimalizace

Kombinací všech pěti uvedených optimalizací dojde k výraznému zvýšení efektivity programu a zkrácení času vykreslování v průměru o **96 %** (tab. 4.6). Průměrný snímek v dané sadě testů trvá **15 sekund** místo původních **491 sekund** (tab. 4.5). I přes tyto zlepšení zůstává nejnáročnějším procesem výpočet konkrétních buněk na základě vrcholů čtyřúhelníků (oddíl 4.2.4).

4.3.6 Další možnosti

Další možnosti, jak zefektivnit program, zahrnují optimalizaci algoritmu pro výpočet pozic buněk u lichoběžníků. Současný algoritmus musí procházet všechny buňky mezi všemi vrcholy, což může být neefektivní, zejména při malých vzdálenostech s vysokými hodnotami.

Výraznou optimalizací by mohlo být omezení výpočtu pozic krychlí a stran, které nejsou viditelné hráčem za ostatními krychlemi. Také by se mohlo zvážit přestat zobrazovat textury krychlí, ve kterých se hráč nachází. Celkově lze program dále optimalizovat, avšak kvůli povaze prostředí nelze dosáhnout vyšší vykreslovací rychlosti blízké $\frac{1}{60}$ sekundy.

⌀ hodnoty (čas / snímek)	Uvnitř jedné krychle	27 sousedících krychlí	50 náhodných krychlí	50 krychlí, bez zakreslování	50 krychlí, pouze zakres.	Průměr
Bez optimalizací (s)	**83,581**	**462,391**	**1420,584**	**1144,963**	**275,621**	**491,639**
Zorné pole hráče (s)	26,709	439,961	701,132	429,356	271,776	**291,951**
Počet stran krychle (s)	78,337	422,852	1369,481	1099,550	269,931	**467,667**
Duplicitní strany (s)	78,013	404,532	1384,568	1114,410	270,158	**466,778**
Vykres. po řádcích (s)	49,766	427,275	1322,370	1117,569	204,801	**449,853**
Celková Optimalizace (s)	**5,437**	**22,185**	**31,125**	**28,199**	**2,927**	**14,687**

(tab. 4.5 – doba trvání průměrného vykreslení obrázku v sekundách)

⌀ hodnoty (% opt. / bez opt.)	Uvnitř jedné krychle	27 sousedících krychlí	50 náhodných krychlí	50 krychlí, bez zakreslování	50 krychlí, pouze zakres.	Průměr
Bez optimalizací (%)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	**0,000**
Zorné pole hráče (%)	68,044	4,851	50,645	62,500	1,395	**34,197**
Počet stran krychle (%)	6,275	8,551	3,597	3,966	2,065	**5,214**
Duplicitní strany (%)	6,663	12,513	2,535	2,668	1,982	**5,957**
Vykres. po řádcích (%)	40,458	7,594	6,914	2,393	25,695	**19,035**
Celková Optimalizace (%)	**93,495**	**95,202**	**97,809**	**97,537**	**98,938**	**96,293**

(tab. 4.6 – poměr optimalizací vůči programu bez žádných optimalizací vztaženo k bez optimalizací v procentech)

⌀ hodnoty (% celk. opt. / opt.)	Uvnitř jedné krychle	27 sousedících krychlí	50 náhodných krychlí	50 krychlí, bez zakreslování	50 krychlí, pouze zakres.	Průměr
Bez optimalizací (%)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	**0,000**
Zorné pole hráče (%)	90,440	1,091	95,674	96,059	23,886	**52,869**
Počet stran krychle (%)	–3,663	43,891	39,093	37,906	48,569	**31,676**
Duplicitní strany (%)	2,369	61,657	13,579	7,704	46,433	**29,541**
Vykres. po řádcích (%)	83,921	36,824	68,309	–2,938	95,868	**53,419**
Celková Optimalizace (%)	**93,495**	**95,202**	**97,809**	**97,537**	**98,938**	**96,293**

(tab. 4.7 – poměr celkové optimalizace vůči konkrétní optimalizaci vztaženo k celkové optimalizaci v procentech)

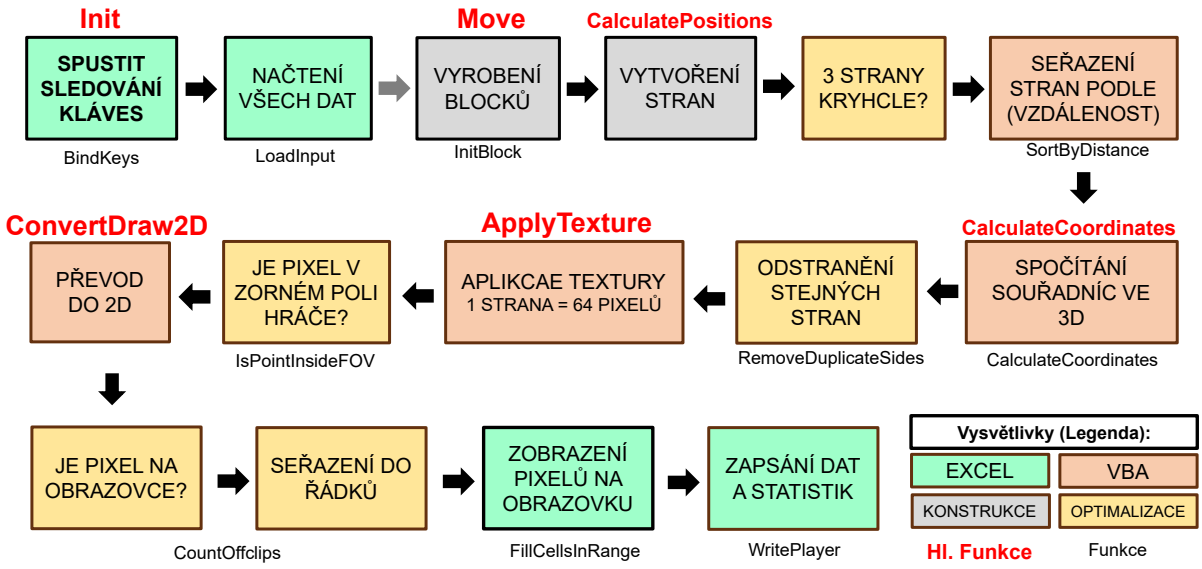
4.4 Shrnutí struktury programu

Tento úsek se věnuje klíčové struktuře programu.

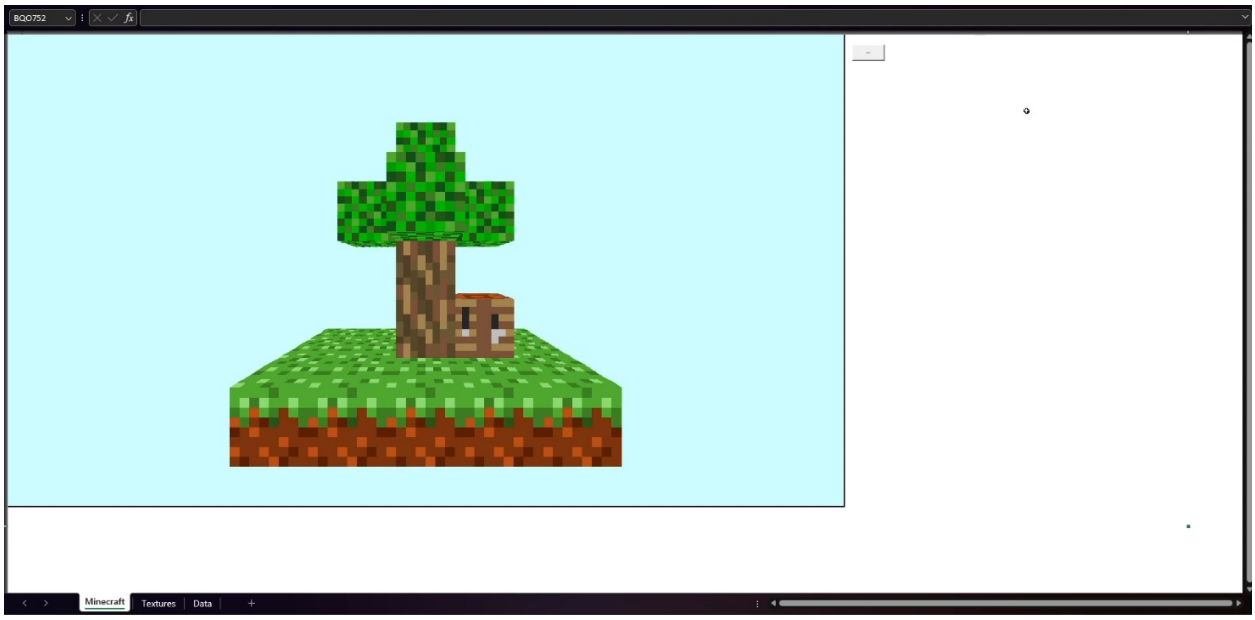
Počítání snímku se dá spustit pomocí `Init`, které následovně spustí `Move`, nebo pomocí kláves, sloužících k pohybu hráče, které také spustí `Move`. Po načtení všech proměnných a parametrů prostředí se začnou vyrábět datové struktury `Block` a `Side`. Následně se zobrazí vždy 3 nejbližší strany každé z krychlí (pokud je hráč mimo krychli) a všechny strany se seřadí podle vzdálenosti od nejvzdálenější po nejbližší.

Dále se spočítají veškeré souřadnice vrcholů a středy každé ze stran. Odstraní se strany, jenž sdílí stejný střed. Každá ze stran se rozdělí na 64 menších stran, které už mají konkrétní barvu na základě textury. Zkontroluje se, zdali se nachází před hráčem a v jeho zorném poli a tyto stejnobarevné části stran se převedou do 2D.

V poslední řadě se převedou (na základě čtyř vrcholů daných čtyřúhelníků) na konkrétní buňky, ty se převedou do příkazů (vybarvení řádků) a zkontroluje se, aby všechny buňky ležely v obrazovce. Po zobrazení všech stran se zapíšou do programu statistiky a program vyčkává na další vstup. (obr. 4.8, obr. 4.9)



(obr. 4.8 – graf základní struktury celého programu)



(obr. 4.9 – příklad vykreslení snímku pomocí programu)

5. Závěr

Tato ročníková práce měla za cíl implementovat program pro renderování 3D krychlí pomocí 2D zobrazení do buněk v prostředí Microsoft Excel s využitím jazyka Visual Basic for Applications.

V první části se práce zabývala teorií počítání souřadnic na základě otáčení kamery a pohybu hráče. Další částí byla samotná implementace problému, kde jsem podrobně popsal každou funkci, která za programem stojí. Poslední část se zabývala problémy prostředí Excelu, který znemožnil dosáhnutí uspokojivých výsledků ohledně rychlosti výpočtu snímků. Tento problém byl následně řešen pomocí implementace algoritmů, jež sloužily k optimalizaci programu a redukci nutných výpočtů.

Závěrem lze proto říct, že Excel není vhodné prostředí k implementaci jakéhokoliv programu, fungujícím na bázi 3D prostředí. Celkově informace v této práci mohou posloužit pro uživatele jako náhled do základů fungování třídimenzionálních prostředí. Tento program má velké prostory pro vylepšení, a to jak z hlediska optimalizací, tak i z hlediska uživatelského rozhraní.

Literatura

[1] Jarmila Robová a kol. (2010): *Soustava souřadnic v prostoru*. Katedra didaktiky matematiky, Matematicko–fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze, Dostupné z: [https://www.karlin.mff.cuni.cz/~portal/analyticka_geometrie/souradnice.php?kapitola=soustavaSouradnicP]

[2] Rostislav Horčík (2009): *Perspektivní projekce*. Ústav informatiky Akademie věd ČR, Dostupné z: [https://uivty.cs.cas.cz/~horcik/Teaching/applications/node4.html]

[3] Martin Tichota (2009): *Perspektiva jako matematický model objektivu*. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta aplikovaných věd, Katedra informatiky a výpočetní techniky, 2, Dostupné z: [https://home.zcu.cz/~mikaMM/Galerie%20studentskych%20praci%20MM/2009/Tichota-Perspektiva%20v%20PG.pdf]

[4] Ivanov O a kol. (2011): *Applications and Experiences of Quality Control. InTech. Research about New Predictive–Maintenance Methodology using VBA for Marine Engineering Applications*. José A. Orosa, Angel M. Costa a Rafael Santos, University of A Coruña, Spain, 399–410, Dostupné z: [https://cdn.intechopen.com/pdfs/14853.pdf]

[5] Unity Technologies (2023): *Understanding the View Frustum*. Unity Documentation, Dostupné z: [https://docs.unity3d.com/Manual/UnderstandingFrustum.html]

[6] Matúš Lipa, Pavel Rajmic (2019): *Rasterizace úsečky pomocí Bresenhamova algoritmu – applet*. Ústav telekomunikací, FEKT, VUT v Brně, Dostupné z: [https://www.utko.fekt.vut.cz/~rajmic/applets/Bresenham_line/line.html]

[7] Mark Johnson (2018): *9 quick tips to improve your VBA macro performance*. Microsoft Tech Community, část 6, Dostupné z: [https://techcommunity.microsoft.com/t5/excel/9-quick-tips-to-improve-your-vba-macro-performance/m-p/173687]

[8] Hoare, C. A. R (1962): *Quicksort*. The Computer Journal, 11–12, Dostupné z: [https://academic.oup.com/comjnl/article-pdf/5/1/10/1111445/050010.pdf]

[9] Martin Král (2012): *Excel VBA*. Computer Press, 11–16, 442, 478, Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=khu2DwAAQBAJ]

[10] P. Danziger (2016): *Big O Notation*. 1–6 Dostupné z: [https://www.cs.ryerson.ca/~mth210/Handouts/PD/bigO.pdf]

[11] Komal Munawar (2021): *Video Aspect Ratios: A Definitive Guide*. Dostupné z: [https://motioncue.com/video-aspect-ratios]

[12] Michael Haavertz (2023): *Does CPU Affect FPS*. Kingston College London, Dostupné z: [https://kingstoncollege.org/does-cpu-affect-fps]

Přílohy

Zdrojový kód je volně k dispozici na: [`https://github.com/ProfiPoint/minecraft-excel`

Naměřené hodnoty testů (měřeno v závislosti na celkové optimalizaci vždy s vynecháním dané optimalizace (v sekundách); červeně chybné, nebo záporné):

	Uvnitř jedné krychle	27 sousedících krychlí	50 náhodných krychlí	50 krych. bez zakreslení	50 krych. pouze zakres.
1	83,421	462,797	3193,812	2512,327	681,485
2	85,039	461,758	945,505	721,516	223,989
3	82,496	461,221	1141,775	915,820	225,955
4	83,691	464,545	912,871	718,750	194,121
5	83,843	462,612	failed; overflow	failed; overflow	–
6	83,211	461,657	1274,027	987,548	286,479
7	82,793	461,680	955,753	751,949	203,804
8	83,687	462,976	2154,002	1885,363	268,639
9	82,981	462,675	1362,336	1152,305	210,031
10	84,652	461,990	845,172	659,086	186,086

(bez optimalizace (oddíl 4.3.3))

	Uvnitř jedné krychle	27 sousedících krychlí	50 náhodných krychlí	50 krych. bez zakreselní	50 krych. pouze zakres.
1	56,656	22,500	1410,147	1397,542	12,605
2	57,226	22,540	652,652	646,417	6,235
3	56,735	22,359	761,587	759,532	2,055
4	56,367	22,875	failed; overflow	failed; overflow	–
5	57,039	22,305	487,726	491,552	–3,826
6	56,867	22,258	568,121	554,235	13,886
7	56,672	22,367	455,133	462,042	–6,909
8	57,133	22,399	1163,438	1152,523	10,915
9	57,219	22,304	647,773	654,610	–6,837
10	56,805	22,390	328,485	322,004	6,481

(zorné pole hráče (oddíl 4.3.4.1))

	Uvnitř jedné krychle	27 sousedících krychlí	50 náhodných krychlí	50 krych. bez zakreslení	50 krych. pouze zakres.
1	5,297	39,547	79,816	65,411	14,405
2	5,230	39,430	47,521	35,606	11,915
3	5,043	39,352	45,598	40,851	4,747
4	5,363	38,945	39,344	35,164	4,180
5	5,293	38,977	51,234	45,817	5,417
6	5,160	40,078	39,282	35,418	3,864
7	5,449	40,797	59,891	57,078	2,813
8	5,330	38,890	43,863	41,153	2,710
9	5,105	39,500	55,637	55,543	0,094
10	5,179	39,876	48,844	42,086	6,758

(počet stran krychle (oddíl 4.3.4.2))

	Uvnitř jedné krychle	27 sousedících krychlí	50 náhodných krychlí	50 krych. bez zakreslení	50 krych. pouze zakres.
1	5,375	57,617	53,391	45,273	8,118
2	6,211	57,586	28,875	26,375	2,500
3	5,289	58,000	34,446	34,274	0,172
4	5,856	57,938	25,281	21,899	3,382
5	5,486	57,922	41,750	35,453	6,297
6	6,180	58,391	27,758	23,969	3,789
7	5,185	57,625	46,461	38,648	7,813
8	5,732	57,687	29,711	26,484	3,227
9	5,168	57,984	39,250	29,062	10,188
10	5,207	57,843	33,234	24,086	9,148

(duplicitní strany (oddíl 4.3.4.3))

	Uvnitř jedné krychle	27 sousedících krychlí	50 náhodných krychlí	50 krych. bez zakreslení	50 krych. pouze zakres.
1	33,648	35,113	153,578	40,625	112,953
2	33,402	35,082	75,414	22,899	52,515
3	34,453	35,035	92,812	27,789	65,023
4	33,930	35,118	59,055	19,328	39,727
5	34,082	35,082	125,023	31,812	93,211
6	33,664	35,097	75,523	21,109	54,414
7	33,778	35,180	140,414	34,368	106,046
8	33,516	35,035	85,375	22,757	62,618
9	34,025	35,152	106,274	29,039	77,235
10	33,655	35,265	68,672	24,211	44,461

(vykreslování po řádcích (oddíl 4.3.4.4))

	Uvnitř jedné krychle	27 sousedících krychlí	50 náhodných krychlí	50 krych. bez zakreslení	50 krych. pouze zakres.
1	5,251	22,769	46,754	42,180	4,574
2	5,494	22,945	25,953	23,922	2,031
3	5,884	22,719	24,723	22,986	1,737
4	5,484	22,889	22,539	20,321	2,218
5	5,748	21,707	40,305	34,313	5,992
6	5,052	21,726	24,372	22,242	2,130
7	5,419	21,769	39,367	35,804	3,563
8	5,204	21,773	25,782	24,250	1,532
9	5,429	21,780	33,250	30,593	2,657
10	5,405	21,772	28,207	25,375	2,832

(veškeré optimalizace (oddíl 4.3.5))