



MATURITNÍ PRÁCE

Programování grafické aplikace v C++

René Čakan

vedoucí práce: Dr. rer. nat. Michal Kočer

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně s vyznačením všech použitých pramenů.

V Českých Budějovicích dne podpis

René Čakan

Abstrakt

Klíčová slova

Poděkování

Obsah

Úvod	1
I Teorie k vývoji hry v OpenGL	2
1 Programovací jazyky	3
1.1 Programovací jazyk C	3
1.2 Programovací jazyk C++	4
2 Počítačová grafika	7
2.1 Historie počítačové grafiky (tuto sekci možná úplně smazat, protože není dodelána)	7
2.2 Grafické karty	10
2.2.1 CPU vs. GPU	10
2.2.2 Architektura a paměťová hierarchie GPU	11
2.2.3 Paralelismus	13
2.3 Grafická zobrazovací pipeline	15
2.4 Transformace	16
3 OpenGL	19
3.1 Historie OpenGL	19
3.2 OpenGL pipeline	19
3.3 Shadery	19
3.3.1 Co to je shader	19
3.3.2 Vertex shader	20
3.3.3 Fragment shader	20
3.3.4 Buffery a linkování	20
3.3.5 GLSL	21

3.4	Texturey	21
4	to do	22
II	Vývoj hry v OpenGL	23
5	Architektura hry	24
6	Použité programy a knihovny	26
6.1	CMake	26
6.2	GLAD	26
6.3	GLFW	26
6.4	GLM	27
6.5	stb_image	27
7	Herní mechaniky	28
7.1	Generátor čísel	28
7.2	Generování ovoce	28
7.3	Vykreslování čísel	29
7.4	Detekce kolize	29
	Závěr	31
	Bibliografie	37
	Zkratky	38
	Přílohy	41
A	Fotky z pokusů	42
B	Příloha další	43

Úvod

Část I

Teorie k vývoji hry v OpenGL

1 Programovací jazyky

1.1 Programovací jazyk C

C je středněúrovňový programovací jazyk, tedy jazyk, který je podobou blízko strojovému kódu, ale má už prvky vyššího programovacího jazyka jako jsou funkce, datové struktury nebo to že je strukturovaný. Je kompilovaný a statický, což znamená, že se program musí nejdříve přeložit do strojového kódu a až pak se může spustit. Datové typy jsou známy v čase kompilace, proto všechny proměnné musí být v kódu deklarovány, jelikož vkládání vstupních dat do programu probíhá až při běhu programu. Programuje se v něm strukturovaně a procedurálně, tedy kód se píše pomocí řídicích struktur (if, while, for atd.) a pomocí funkcí, které umožňují používat části kódu vícekrát. C nemá automatický správce paměti, takže je potřeba uvolňovat paměť manuálně. C má strídmostou standardní knihovnu, která obsahuje základní matematické operace a funkce pro práci s pamětí a soubory, takže jakékoliv složitější datové struktury či funkce si člověk musí naprogramovat sám. Tato strohost a blízkost ke strojovému kódu z C dělá jeden z nejrychlejších programovacích jazyků. [30, 27, 18, 37, 39]

C bylo vytvořeno Dennisem Ritchiem na počátku 70. let 20. století v AT&T Bell Labs. Jeho předchůdci byly jazyky ALGOL, CPL, BCPL a B. Jeho prvotním účelem bylo přepsat operační systém UNIX do použitelnějšího jazyka než Assembly a B. Už koncem 70. let bylo C populární, ale nebylo standardizované a vznikalo mnoho různých variant. Na začátku 80. let tedy American National Standards Institute (ANSI) zahájil práci na formální standardizované verzi. Tu dokončili v roce 1989 a je známa pod jménem C89. V průběhu let vycházely další verze, které jazyk zlepšovaly a modernizovali. Nejdůležitější verze byly C99, C11 a C17. Norma C23 byla nedávno schválena a teď se implementuje do kompilátorů. V současnosti mezi nejpoužívanější kompilátory patří GCC, Clang a MSVC. Jelikož bylo C velice populární, ovlivnilo řadu jiných programovacích jazyků, jako C, C#, Java, Rust, Go atd. [4, 22, 30, 27]

C je univerzální programovací jazyk, má tedy širokou škálu využití. Jeho první využití

bylo k napsání UNIXu, který později ovlivnil operační systémy jako Linux, macOS, iOS a Android. Používá se v programování softwaru s omezenou pamětí a výkonem, jako je firmware aut či v zařízeních chytrých domácností. Dále se využívá pro tvoření kompilátorů a interpreterů jako je GCC nebo interpreter Pythonu. Také jsou v něm napsané systémové databáze MySQL a Oracle Database. Kvůli jeho rychlosti jsou v něm napsané knihovny pro jiné programovací jazyky jako je NumPy, OpenGL či GLFW. [4, 30, 53]

Jednoduchý program, který načte ze vstupu počet čísel, která chce uživatel seřadit. Následně daná čísla načte a vytiskne je seřazená:

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3
4 int compare(const void *a, const void *b)
5 {
6     return (*(int *)a - *(int *)b);
7 }
8
9 int main(void)
10 {
11     int sizeOfArray;
12     scanf("%d", &sizeOfArray);
13     int *array = malloc(sizeOfArray * sizeof(int));
14
15     for(int i = 0; i < sizeOfArray; ++i)
16         scanf("%d", &array[i]);
17
18     qsort(array, sizeOfArray, sizeof(int), compare);
19
20     for(int i = 0; i < sizeOfArray; ++i)
21         printf("%d\n", array[i]);
22
23     free(array);
24     return 0;
25 }
```

Zdrojový kód 1.1: sort_n_numbers.c

1.2 Programovací jazyk C++

Programovací jazyk C++ je v mnoha ohledech podobný jazyku C. Je stejně jako C středně-úrovňový, kompilovaný, statický, má datové typy známé v době kompilace a nemá au-

tomatický správce paměti. V C++ se také programuje strukturovaně a procedurálně, ale na rozdíl od C, také umožňuje programovat objekově. Objektové programování umožňuje používat objekty, které jsou instance tříd. Tyto třídy umožňují dědičnost, polymorfismus a zapouzdření, což dělá kód přehlednější a usnadňuje budoucí rozšiřování a debuggování. Dalším rozdílem je standardní knihovna, kterou má C++ rozsáhlejší. Obsahuje nové kontejnery jako vector, map, a priority_queue, které jsou tvořeny pokročilejšími datovými strukturami jako binární vyhledávací strom nebo heap. Dále obsahuje nové algoritmy, například sort, find nebo count. Kvůli velké podobnosti C a C++ se často může C kód používat v C++, ale není tomu tak vždy. Například tento kód:

```
1 | int class(int new, int bool);
```

Zdrojový kód 1.2: incompatibility_example.c

V C tento kód vytvoří funkci class, která vrací int a má dva parametry new a bool. V C++ jsou ale class, new a bool klíčová slova, která nelze použít v názvu proměnných a funkcí. Pokud chce programátor napsat C kód, který se bude jednoduše v C++ programech, doporučuje se programovat v C tak, aby daný C kód byl podmnožinou C++. [52, 51]

C++ bylo vytvořeno Bjarnem Stroustrupem v roce 1979 v AT&T Bell Labs. Před vytvořením C++ pracoval Stroustrup s programovacím jazykem Simula 67, který byl objekově orientovaný a sloužil primárně k vytváření simulací. Stroustrupovi přišlo objekově orientované programování velmi užitečné, ale Simula 67 byl příliš pomalý pro větší projekty. Rozhodl se vytvořit nadmnožinu jazyka C, která by umožňovala objekově orientované programování a zároveň si zachoval rychlost C, s názvem C with Classes. V roce 1982 byl Stroustrup se stavem C with Classes zklamán. Nepřišlo mu, že oproti C přináší významné zlepšení a rozhodl se jazyk dále vylepšovat nad rámec objekově orientovaného programování. V roce 1983 byl jazyk přejmenován z C with Classes na C++. Dále bylo C++ v roce 1985 oficiálně vydáno a začalo se používat komerčně. V roce 1998 byla vydána první standardizovaná verze s jménem C++98. Další významné verze, které jazyk modernizovaly a přidávaly mu nové funkce, byly C++03, C++11, C++14, C++17, C++20 a nejnovější verze C++23. C++ se kompiluje pomocí stejných kompilátorů jako C, tedy GCC, Clang a MSVC. [51, 50, 3, 57]

C++ je stejně jako C univerzální programovací jazyk, a využívá se v široké škále odvětví. První využití je ve videoherním průmyslu. V C++ jsou napsané populární hrací enginy jako Unity nebo Unreal Engine. Dále se v něm vytváří aplikace jako Photoshop nebo Blen-

der. Využívá se v částech operačních systémů jako Apple macOS nebo Microsoft Windows OS. Dále se využívá při vytváření internetových prohlížečů, například Firefox nebo Google Chrome. C++ se využívá i ve vědě, například v CERNu nebo v NASA. [52, 19, 49]

Program se stejnou funkcí jako z kapitoli o C, ale napsán v C++

```
1 #include <iostream>
2 #include <vector>
3 #include <algorithm>
4
5 int main()
6 {
7     int sizeOfArray;
8     std::cin >> sizeOfArray;
9     std::vector<int> arr(sizeOfArray);
10
11     for(int i = 0; i < sizeOfArray; ++i)
12         std::cin >> arr[i];
13
14     std::sort(arr.begin(), arr.end());
15
16     for(int i : arr)
17         std::cout << i << '\n';
18
19     return 0;
20 }
```

Zdrojový kód 1.3: sort_n_numbers.cpp

2 Počítačová grafika

2.1 Historie počítačové grafiky (tuto sekci možná úplně smazu, proto není dodelána)

Není úplně jasné, který počítač jako první využíval počítačovou grafiku, ale začnu počítačem Small-Scale Experimental Machine (SSEM). Tento počítač byl vytvořen v roce 1948 na Manchesterské univerzitě a jeho tvůrci byli Frederic C. Williams, Tom Kilburn a Geoff Tootill. Tento počítač byl první počítač s uloženým programem, tedy počítač, který měl svůj program uložen ve stejné paměti jako data, se kterými počítač pracoval. Data uchovával na katodové trubici (CRT), které se později začalo říkat Williamsova trubice. Tato trubice si dokázala pamatovat až 2048 bitů, které byly uchovávány jako elektrické náboje. Součástí trubice byl i displej, který na svém fosforovém povrchu promítal oblasti s nábojem. Takto vznikl první počítač s digitálním displejem. [44, 38]

Dalším zajímavým počítačem byl Whirlwind. Americký Office of Naval Research a U.S. Air Force chtěli vytvořit počítač, ve kterém by dokázal běžet letecký simulátor. Tak tedy v roce 1947 začal Jay Forrester pracovat v laboratořích MIT na projektu Whirlwind. Při práci vyvinul Forrester paměť s náhodným přístupem (RAM), tvořenou magnetickými jádry, skrz které proudil koincidenční proud. Počítač byl dokončen v roce 1951. Využíval CRT na zobrazování výsledků podobně jako SSEM a dokázal na svém displeji řešit rovnice, později i simulovat karetní hru blackjack. Následně se projekt Whirlwind stal součástí projektu Semi-Automatic Ground Environment (SAGE). Ten měl za úkol vytvořit počítačový systém, který by pomocí radarů dokázal odhalovat letadla a řídit obranné síly proti případným letadlům. Projekt SAGE byl jeden z prvních systémů, které využívaly interaktivní ovládání pomocí klávesnice či speciálního světelného pera. Pokud bylo perem namířeno na ikonu letadla, zachytilo světlo z displeje a počítač zobrazil informace o daném letadle jako rychlost a směr jeho letu. Další počítač, který navazoval na projekt Whirlwind a SAGE, byl počítač TX-2,

který byl vytvořen Wesem Clarkem na MIT. Ten byl na rozdíl od Whirlwindu tranzistorový. Zajímavým projektem, který tento počítač umožnil, byl Sketchpad vytvořen Ivanem Sutherlandem. Tento program byl první, který umožnil interaktivně kreslit na obrazovku. Obrazovka byla velká 7x7 palců s rastrem 1024x1024 bodů a psalo se na ní perem, které zachytávalo světlo z obrazovky. Poloha pera se poté poslala do počítače a na daném místě se vybarvil bod. Druhou rukou ovládal uživatel box s přibližně 40 tlačítky, které měly funkce jako mazání, zoomování či ukládání. Tím vznikl první počítač s interaktivní počítačovou grafikou. [44, 16, 32, 1, 26]

Společně s vývojem počítačové grafiky začaly vznikat i první videohry. Hra Spacewar! byla jedna z prvních, která se rozšířila po laboratořích na amerických univerzitách. Hru vytvořil na MIT Steve Russell a jeho přátelé v roce 1962. Hra byla vytvořena pro dva hráče, každý ovládal svou loď a jeho cílem bylo sestřelit loď protihráče. Lodě byly ovládány speciálním boxem, který se dá považovat za předchůdce moderních herních kontrolerů. Hra běžela na počítači PDP-1, který namísto rasterové grafiky využíval grafiku vektorovou. Věci vykreslené na osciloskopu byly definované matematickou funkcí. Díky tomu, že vektorová grafika nebyla tolik náročná na CPU jako rasterová, mohla ve hře být hvězda, která svojí gravitací působila na loď. [48, 6, 54]

S postupným vývojem počítačů se začaly vytvářet i grafické algoritmy. Jedním z nich je Bresenhamův algoritmus. Vytvořil ho Jack Elton Bresenham v roce 1962 v International Business Machines Corporation (IBM). Tento algoritmus se používá ke kreslení úsečky mezi dvěma body. Jelikož počítačová obrazovka je rozdělena na pixely, pokud daná úsečka není vodorovná ani svislá, nelze ji vykreslit přesně. Algoritmus determinuje, jaký z dvojice pixelů se více blíží funkci požadované úsečky a tento pixel vybarví. Dalším zajímavým algoritmem je ray casting. První obrázek byl vytvořen v roce 1968. Tento algoritmus funguje tak, že nejdříve uživatel definuje objekty, které chce mít ve své scéně jako matematické rovnice. Pro každý objekt se definuje model osvětlení, což udává jakou má barvu a jak se od něj světlo odráží. Poté se z pohledu kamery vyšle na každý pixel na obrazovce paprsek. Ten putuje, dokud se nezastaví o nějaký námi vytvořený objekt. Následně se z každého místa zastavení vyšle stínový paprsek do zdroje světla. Pokud cestou tento paprsek potká nějaký jiný objekt, daný objekt blokuje světlo, takže tento bod bude ve stínu. [44, 33, 36]

V průběhu 70. let se vyvíjely a vylepšovaly renderovací algoritmy. Jedním z problémů, který bylo potřeba vyřešit, byl hidden surface determination problem. Renderování částí objektů, které nejsou z pohledu kamery vidět zbytečně zatěžuje CPU. Tento problém řeší

více rozdílných algoritmů, jako Z-buffer algorithm, Painters algorithm nebo Binary Space Partitioning. Nejpopulárnější z nich je Z-buffer algoritmus vytvořen Wolfgangem Straßerem v roce 1974. Depth buffer uchovává nejmenší dosud naleznutou hloubku a pokud se přidá nový fragment na daný pixel, algoritmus porovná obě hloubky a pokud je blíže kameře, depth buffer se přepíše na novou hloubku. Další významný pokrok byl v oblasti shadingu. Doposud se využíval k barvení flat shading, takže každý polygon měl svojí vlastní barvu. V roce 1971 vytvořil Henri Gouraud gouraud shading. Tato metoda ukládá barvu polygonů jen do vrcholu daného polygonu, a následně se vypočítává barva každého pixelu váženým poměrem podle vzdálenosti od daného vrcholu. Dalším z důležitých technik je Phong shading, kterou vytvořil Bui Tuong Phong v roce 1974. Pro každý pixel se počítá, jak na daný pixel dopadá světlo a jak se od něj odráží. To se následně aplikuje pro výhcozí barvu polygonu. Tato technika je velice náročná a mohla se plně začít využívat až s rovojem GPU. Pokrok se udělal i v realističnosti povrchů. Pokud by povrch měl mít nějaké výstupky či hrbolky, museli by býti dodány v popisu daného polygonu. Tento problém řeší technika zvaná Bump Mapping, vytvořena Jamesem Blinnem v roce 1978. Vytvoří se texturová mapa, která určuje kde je vrcholek a kde prohlubeň. Poté se ve fázi počítání světla místa s vrcholekm udělají světlejší a místa s prohlubní tmavější, což dodává efekt hrbolatého povrchu na uplně rovném polygonu. [55, 35, 34, 13, 21]

V 80. letech začaly vytvářet první počítače, které byly dostupné pro veřejnost a začala se využívat GPU. Počítačová grafika se začala využívat ve filmovém průmyslu. V roce 1982 vyšel film Tron, který první masivně využíval CGI. Posun se udělal i v modelování vytvořením matematického modelu Non-Uniform Rational B-Spline (NURBS). Tento model je schopen z bodů a uzlu vytvořit 3D křivku nebo plochu. Další důležitý model byl Cook-Torrancův, který popisuje bidirectional reflective distribution function (BRDF). Tento model je podobný Phong shadingu, ale narozdíl od něj dodržuje fyzikální korektnost. Odražené světlo nikdy nemůže přesahovat světlo dopadající, čímž se vyrendrovaná věc zdá realističtější. Dalším důležitým algoritmem je radiosity algorithm. Tento lgoritmus počítá světlo polygonu součtem světla kolik vyzařuje a kolik světla přijímá od ostatních polygonů. Narodil ale od starších algoritmu všechny polygony také nějaké světlo odrážejí, což je dáno povrchem polygonu. Toto odražené světlo se také počítá do celkového osvětlení ostatních polygonů. Významné zlepšení proběhlo u Ray Casting algoritmu. Paprsek se místo toho, aby se o polygon zastavil, odrazí a algoritmus se znovu rekurzivně spustí pro tento paprsek. Toto zlepšení umožňuje vidět v odraze jednoho polygonu polygon druhý. [2, 31, 46, 41, 7]

V průběhu 90. let se významně vylepšovaly domácí počítače, které dokázali spustit i složitější programy a hry. 3D grafika se stala populárnější a vznikala pro ni i software jako Blender nebo 3D Studio. Nevznikli žádné nové revoluční renderovací metody, ale díky zlepšení výkonu počítačů se mohly začít využívat metody dříve vytvořené, které byly příliš náročné pro tehdejší počítače. Velký pokrok zaznamenal filmový průmysl. Terminátor 2 použil CGI na realistického humanoidního robota. V roce 1995 vydal Pixar první celovečerní plně počítačově animovaný film *Toy Story*. 90. léta jsou označována jako zlatý věk videoher. První z důležitých her je *Wolfenstein 3D*. Tato hra využívá ray-casting, takže není 3D, ale vytváří iluzi 3D prostoru. Další důležitou hrou je *Doom*. Tato hra byla 2.5D, tedy kombinovala prvky 2D a 3D. Zdi a podlaha byly 3D modely, ale příšery byly 2D sprity, kterých bylo více a ukazovaly se podle toho pod jakým úhlem se hráč na příšeru koukal. První plně 3D hra byla *Quake*. *Quake* měl pokročilý client-server multiplayer, takže bylo možno hrát ne jen na LAN, ale i přes internet. 3D modely umožnili vývojářům přidat do hry 3. rozměr a tím i více patrové mapy či létející projekty a nepřátele. [5, 17, 14, 25, 23]

V novém tisíciletí se zlepšovalo vše, co se doposud vynalezlo. Renderovací algoritmy mohli být více realistické kvůli zlepšení GPU.

2.2 Grafické karty

2.2.1 CPU vs. GPU

Tradičně běžela většina aplikací sekvenčně, které běží na procesorech, které mají centrální výpočetní jednotku a provádí instrukce jednu po druhé CPU. V průběhu 20. století se výkon CPU významně zlepšoval až na bilion operací za sekundu, čímž se mohli zlepšovat grafické aplikace a využívat náročnější funkce. Na přelomu tisíciletí se ale vývoj začal zpomalovat, kvůli problému se spotřebou energie a odvodem tepla. Proto výrobci začali vytvářet CPU s více jádry, ale ani to nebylo dostatečně výkonné na složité výpočty, a proto už v sedmdesátých a osmdesátých letech začali vznikat počítače, které nepracovali sekvenčně, ale paralelně. V devadesátých letech se začali vytvářet mikroprocesory, které se soustředili na paralelní výpočty GPU. V průběhu let se počet jader z jednotek dostal na tisíce, což vytvořilo prostor pro inovaci v grafice. [29]

Prvně bylo GPU pouze v počítačích specializovaných pro 3D hry a vizualizace, ale postupně se stala součástí každého počítače. GPU a CPU se používá v různých případech kvůli

rozdílné architektury. CPU má jednotky až desítky jader a umí dělat jeden krok extrémě rychle kvůli sekvenčnímu zapojení. Velká část čipu je určena pro cache, tedy malou paměť, kam se ukládají data která budou pravděpodobně v budoucnosti potřeba, takže není potřeba komunikovat neustále s RAM. Část čipu je také pro control logiku, která dokáže instrukce z jednoho vlákna dělat paralelně nebo na jiném sekvenčním pořadí, ale zachovat sekvenčnost celého procesu. CPU má také menší propustnost paměti než GPU, proto jsou cache-friendly programy výrazně rychlejší. Narozdíl od toho má GPU stovky až tisíce jader. Kontrolní logika a cache jsou v jádru menší a jednodušší, takže velmi pomalu reaguje na události a po dokončení operací se většinou data vrací zpět do virtual random access memory VRAM, což je díky velké propustnosti i pro velmi velký objem dat rychlé. [29]

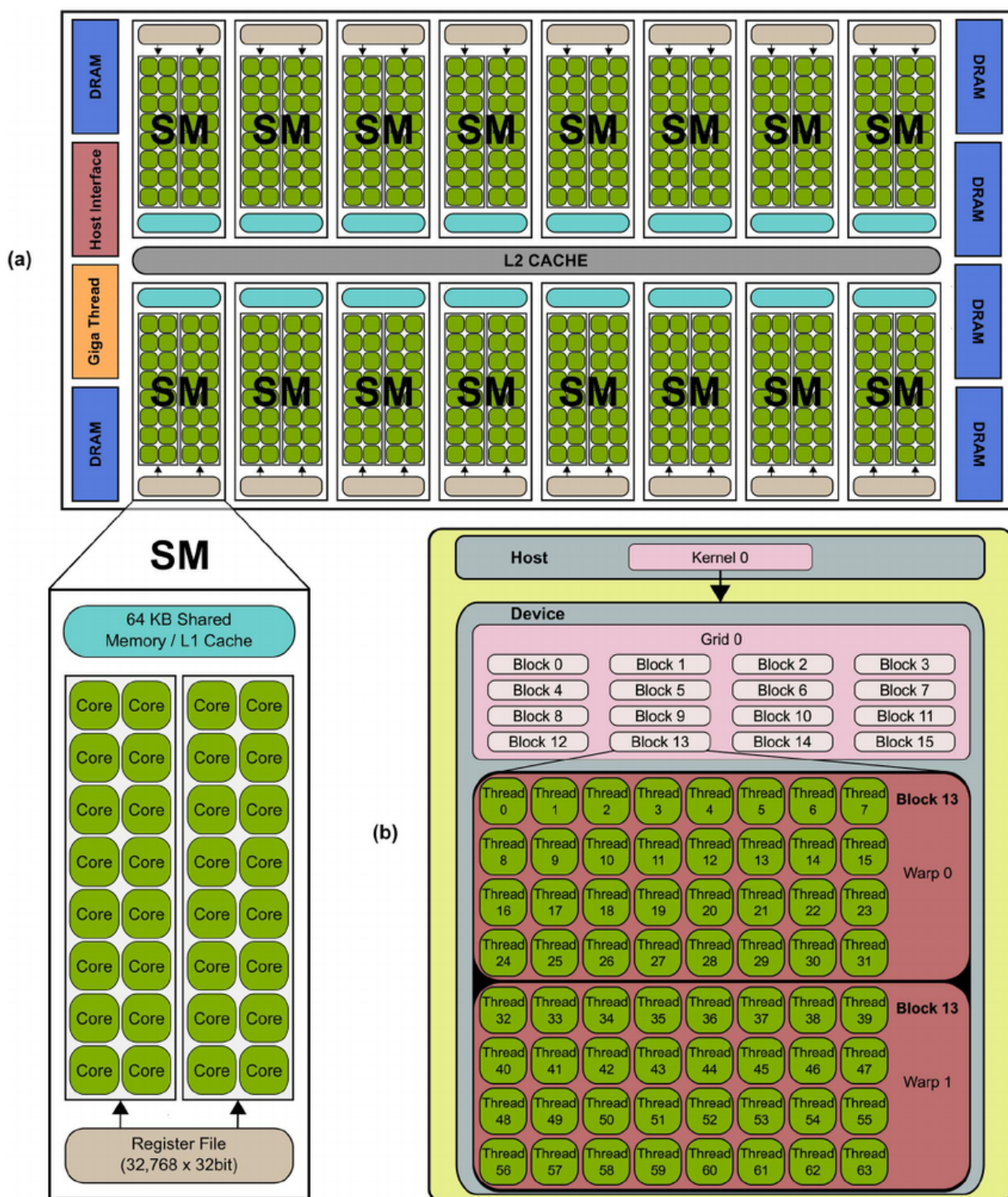
Do roku 2007 se GPU používalo převážně pro renderování, ale v roce 2007 přišla NVIDIA s programovacím modelem pro paralelní výpočty CUDA. Tento model umožňuje psát programy, které běží na GPU a využívají CPU na přenos dat a řízení těchto programů. Díky tomu mohly začít vznikat aplikace, které normálně běží na CPU, ale při potřebě náročnějších početních operací mohly běžet na GPU, a tím zvýšit výkon. Pro účel vysvětlení programovacích modelů pro paralelní výpočty budu využívat model CUDA, přičemž existují i jiné podobné modely jako OpenCL nebo SYCL. [29]

2.2.2 Architektura a paměťová hierarchie GPU

GPU s podporou CUDA je organizováno do pole paralelních streamovacích multiprocessorů SM. Každý SM se skládá z několika streamovacích procesorů SP, které jsou základní výpočetní jednotkou, na které probíhají aritmetické operace. Další součástí jsou řídicí jednotky, které načítají instrukce pro daný SM. Řídicí jednotky také obsahují malou cache na instrukce, aby se pro ně nemuselo pořád sahát do RAM. Dále je uvnitř SM warp scheduler, který řídí, které skupiny vláken budou v každém cyklu použity. [29]

Většina grafických karet má svoji vlastní dynamic random access memory DRAM, které se říká globální paměť. V grafických kartách je specifický typ DRAM zvaný VRAM. Tato paměť má jednotky až desítky gigabytů. Dochází v ní k výměně dat mezi host memory a VRAM. Tato rychlá výměna dat je zaručena velkou propustností, která je způsobena načítáním dat blokově namísto sekvenčně a také posíláním většího objemu dat najednou. VRAM je sdílena mezi všemi SM, ale přístup k ní je relativně pomalý. Další paměť je shared memory, která má většinou desítky kilobajtů. Tuto paměť má každý SM a každý SP si do

ní může sahat. V každém SM se také vyskytuje L1 cache, která slouží k uchovávání dat, ze kterých se nedávno četlo nebo byla změněna. Dále existuje L2 cache, která je větší než L1 cache a je jedna pro všechny SM. Používá se pro uchovávání dat nedávno získaných nebo poslaných do VRAM. Část VRAM je také určena pro dva jiné typy paměti, a to texture a constant memory. Obě paměti mají k sobě přiřazenou svoji cache a jsou read-only. Tím, že jsou read-only, můžeme často používané hodnoty uchovávat v cache bez obavy z toho, že by se daná proměnná mohla v průběhu změnit. Nejmenší, ale také nejrychlejší částí paměti jsou register files. Tato paměť přímo komunikuje s SP a ukládají se do ní dočasné proměnné a mezivýpočty. [29, 9, 56]



Obrázek 2.1: Typická architektura NVIDIA GPU [40]

2.2.3 Paralelismus

Paralelismus je výpočetní technika, která umožňuje vykonávání více operací najednou. Paralelismus se dá rozdělit do dvou kategorií. První z nich je úlohový paralelismus. Tento typ následuje Multiple Instructions, Multiple Data (MIMD) model. Tento model rozdělí různé

úlohy mezi více vláken nebo i jader. Tento model se využívá, pokud na sobě nejsou úlohy závislé. Pokud by se například chtěla vypočítat suma vektoru, může každé vlákno počítat jednu polovinu a oba výsledky sečíst. MIMD se využívá v simulacích nebo ve webových aplikacích. [29, 11]

Druhou metodou je datový paralelismus, který je definován Single Instruction, Multiple Data (SIMD) modelem. Tento model aplikuje jednu úlohu pro velké množství dat a využívá se v GPU. Používá se například při násobení matic, kde se daná matice dá rozdělit na menší části, nebo při vykreslování, kdy se jeden shader aplikuje pro každý pixel. V grafických kartách se jednotlivá vlákna sdružují do warpů, ty dále do bloků, které plánuje SM. Do každého warpu jsou načteny stejné instrukce a postupně se mu dodávají data, na kterých dané instrukce provádí. Díky tomu lze i velké množství dat zpracovat velmi rychle, protože se dodávají s velkou propustností a instrukce na nich jsou prováděny současně na velkém množství warpů. [29, 11]

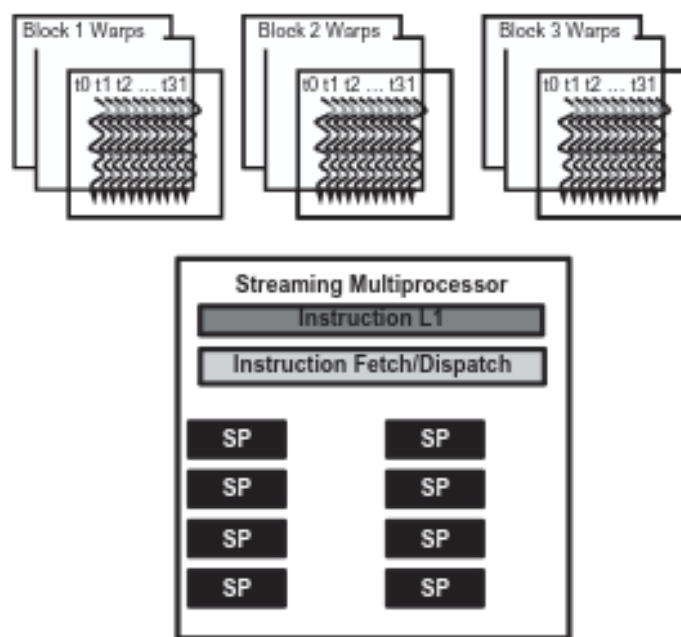


FIGURE 3.13

Blocks are partitioned into warps for thread scheduling.

Obrázek 2.2: Rozdělení vláken do warpů v SM [29]

2.3 Grafická zobrazovací pipeline

Hlavní funkcí grafické zobrazovací pipeline je vyrenderovat dvourozměrný obraz z trojrozměrných objektů, pozice virtuální kamery, zdrojů světla atd., který je schopen být zobrazen například na monitoru. Pipeline se skládá z několika fází. Tyto fáze probíhají paralelně jak v rámci jednotlivých fází (tedy jedna fáze probíhá pro více dat najednou), tak i mezi jednotlivými fázemi, takže po průchodu jednoho bloku dat jednou fází data přecházejí do další fáze, i když pro jiná data ještě předchozí fáze nemusí být ukončena. Hlavní čtyři fáze jsou aplikační fáze, geometrické zpracování, rasterizace a zpracování pixelů. [2]

Aplikační fáze je řízena samotnou aplikací a je většinou implementována jako software běžící na CPU. Tato fáze nemá žádné podprvky, a proto může běžet paralelně na různých jádrech. V této části se zpracovávají vstupy od uživatele, které například pozměňují matici k posunutí, otočení nebo změně velikosti různých objektů. V této části také dochází k detekci kolizí, akceleračním algoritmům, fyzikální simulaci a dalším výpočtům, které připravují data pro další scénu. [2]

Další částí pipeline je geometrické zpracování. Ta je zodpovědná za většinu operací pro každý trojúhelník a vrcholy, které tvoří objekty. Rozděluje se na čtyři podfáze: vertex shading, projekce, clipping a screen mapping. Vertex shading vypočítává pozici vrcholu a připravuje jeho data, jako barvy a textury. Objekt je transformován z modelového prostoru do světových souřadnic, tedy souřadnic relevantních pro všechny objekty ve scéně. Dále se transformuje do kamerového prostoru, ve kterém je kamera v bodě nula. Poté dochází k projekci, kdy dochází k transformaci z kamerového prostoru do clip spacu, aby bylo možné provést clipping. Clipping určuje, jaké objekty se budou renderovat. Pokud by například celý objekt byl mimo zorné pole scény, není renderován, aby zbytečně nezatěžoval GPU. Poslední částí je mapování na obrazovku, které převede souřadnice z clip spacu do souřadnic obrazovky připravených pro rasterizaci. Součástí vertex shadingu jsou také volitelné fáze vertex zpracování. Tessellation generuje vhodné trojúhelníky pro zakřivené povrchy, aby vypadaly realističtěji. Geometry shader umožňuje podle potřeby vytvářet nové vrcholy z existujících trojúhelníků nebo bodů, což se používá například u malých částic, aby byly lépe vidět na obrazovce, takže se z nich udělá například malý čtverec. Poslední volitelná fáze je stream output, která umožňuje namísto poslání vrcholu do další fáze uložit vrcholy do bufferu, na kterých CPU může dělat další výpočty či simulace. [2]

Následující fáze je rasterizace, jejímž účelem je nalézt všechny pixely uvnitř vykreslovaného trojúhelníku. Rasterizace se dělí na přípravu trojúhelníku a průchod trojúhelníkem. Při přípravě se vypočítávají diferenciály, rovnice hran a jiná podobná data, která jsou využívána ke zjišťování, zda daný pixel leží uvnitř trojúhelníku. Při průchodu se zjišťuje, zda střed pixelu leží uvnitř trojúhelníku, a pokud ano, vytvoří se pro daný pixel fragment. Vlastnosti jako barva, hloubka atd. jednotlivých fragmentů se získávají interpolací mezi vrcholy daného trojúhelníku a následně se ukládají do specifických bufferů. Výsledné fragmenty jsou následně předány do fáze pixelového zpracování. [2]

Pixelové zpracování se dělí na pixelové stínování a slučování. Ve fázi pixelového stínování se provádějí výpočty stínování jednotlivých pixelů ze stínovacích dat. Výsledkem je jeden nebo více barevných výstupů. V této fázi se používá hodně specifických technik, jako například texturování. Pixelové stínování je na rozdíl od ostatních fází, které jsou dány architekturou GPU, dáno programovatelnými jádery GPU. Při slučování dochází ke kombinaci výstupu pixelového stínování a uložených barev v bufferech. V této fázi se také řeší viditelnost, aby se vykresloval pro daný pixel fragment s nejmenší hloubkou. [2]

2.4 Transformace

V průběhu renderování je často potřeba s objekty různě pohybovat. Mohli bychom pozměňovat souřadnice původních vrcholů a opětovně konfigurovat jejich buffery, ale to je výpočetně náročné. Místo toho se využívají transformace pomocí matic. Matice jsou obdélníková pole matematických výrazů. Souřadnice objektů se ukládají do 4D vektorů a transformace do 4x4 matic, které se mezi sebou vynásobí.

$$\begin{pmatrix} m_{00} \cdot x + m_{01} \cdot y + m_{02} \cdot z + m_{03} \cdot w \\ m_{10} \cdot x + m_{11} \cdot y + m_{12} \cdot z + m_{13} \cdot w \\ m_{20} \cdot x + m_{21} \cdot y + m_{22} \cdot z + m_{23} \cdot w \\ m_{30} \cdot x + m_{31} \cdot y + m_{32} \cdot z + m_{33} \cdot w \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m_{00} & m_{01} & m_{02} & m_{03} \\ m_{10} & m_{11} & m_{12} & m_{13} \\ m_{20} & m_{21} & m_{22} & m_{23} \\ m_{30} & m_{31} & m_{32} & m_{33} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ w \end{pmatrix}$$

Mezi základní operace patří translace, rotace a škálování. Translace je operace, při které se k původnímu vektoru přičte jiný vektor, čímž se původní objekt posune. Potřebujeme translační hodnoty násobit složkou w vektoru, která je nastavena na 1, aby neupravila tyto

hodnoty. Proto používáme 4D vektor, protože s 3D vektorem by translace nebyla možná.

$$\begin{pmatrix} x + T_x \\ y + T_y \\ z + T_z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & T_x \\ 0 & 1 & 0 & T_y \\ 0 & 0 & 1 & T_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Další operací je škálování. Při této operaci se dané souřadnice násobí konstantou, čímž se může daný objekt zmenšit nebo zvětšit.

$$\begin{pmatrix} S_x \cdot x \\ S_y \cdot y \\ S_z \cdot z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} S_x & 0 & 0 & 0 \\ 0 & S_y & 0 & 0 \\ 0 & 0 & S_z & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Poslední důležitá operace je otáčení. Při této operaci závisí na tom, podle jaké osy se má objekt otáčet a o kolik radiánů se má otočit. Rotace podle osy X:

$$\begin{pmatrix} x \\ \cos \theta \cdot y - \sin \theta \cdot z \\ \cos \theta \cdot y + \sin \theta \cdot z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Rotace podle osy Y:

$$\begin{pmatrix} \cos \theta \cdot x + \sin \theta \cdot z \\ y \\ -\sin \theta \cdot x + \cos \theta \cdot z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & 0 & \sin \theta & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta & 0 & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Rotace podle osy Z:

$$\begin{pmatrix} \cos \theta \cdot x - \sin \theta \cdot y \\ \sin \theta \cdot x + \cos \theta \cdot y \\ z \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} x \\ y \\ z \\ 1 \end{pmatrix}$$

Při provádění transformací záleží na pořadí. Pokud je pro transformaci jednoho objektu více matic, pronásobí se matice mezi sebou a používá se výsledná matice. Při tvoření takové

matice se ale postupuje v opačném pořadí násobení. Pokud bychom pro vektor V chtěli udělat operace a , b a c , tak to lze udělat následovně:

$$\mathbf{V}' = \mathbf{C} \cdot (\mathbf{B} \cdot (\mathbf{A} \cdot \mathbf{V}))$$

nebo

$$\mathbf{M} = \mathbf{C} \cdot \mathbf{B} \cdot \mathbf{A}$$

$$\mathbf{V}' = \mathbf{M} \cdot \mathbf{V}$$

3 OpenGL

3.1 Historie OpenGL

OpenGL je považováno za Application Programming Interface API, které uživatelům poskytuje sadu funkcí, kterou můžeme používat k manipulaci s grafickou kartou. Specifikaci pro OpenGL tvoří společnost Khronos Group, která určuje, jaké funkce existují a jak se budou chovat. Poté každá společnost implementuje OpenGL API pro svůj druh grafických karet. [58]

3.2 OpenGL pipeline

Grafická pipeline je velmi podobná obecné grafické pipeline, kterou jsem popisoval v předchozí kapitole. Uživatel je schopen kontrolovat programovatelné fáze pipeline, tedy vertexový a fragmentový shader. Části jako rasterizace jsou neměnné a jsou definované v API. [58]

3.3 Shadery

3.3.1 Co to je shader

Shader je malý program, který běží na GPU. Tyto programy se spouštějí pro konkrétní část grafické pipeline. Shadery přeměňují vstupy a převádějí je na výstupy potřebné pro následující fáze. Starší verze OpenGL měly defaultní shadery, ale v novějších verzích je uživatel povinen vytvořit základní shadery, aby GPU něco vykreslila. Shadery jsou od sebe izolované a komunikují spolu pouze pomocí vstupů a výstupů. Shaderů je více druhů a dva základní jsou vertex a fragment shader. Shadery se kompilují a linkují a následně ukládají do paměti GPU jako součást shader programu. To je objekt, který je výslednou slinkovanou verzí více shaderů. Shader programů může mít uživatel více a pro každý objekt si může

vybrat jiný podle toho, jaké shadery na něj chce použít. [58]

3.3.2 Vertex shader

Základní účel vertex shaderu je zpracovávání vrcholů objektu. Do vertex shaderu vstupují atributy vrcholů, jako barvy nebo 3D souřadnice bodů v modelovém prostoru. Vertex shader provádí transformace těchto souřadnic do světového, kamerového a následně clip prostoru pomocí transformačních matic. Vstupní data jsou uložena v GPU, kde k nim má vertex shader přímý přístup. [58]

3.3.3 Fragment shader

Účelem fragment shaderu je vypočítávání barevného výstupu pro pixely. Barvy se v OpenGL definují 4D vektorem s floaty od 0.0 do 1.0. Tato čísla udávají sílu barev červená, zelená a modrá (RGB). Poslední číslo udává alfa hodnotu, tedy jak moc kombinace daných tří barev bude průhledná. Ve fragment shaderu také dochází k texturování a různým efektům, jako jsou odlesky, stínování atd. [58]

3.3.4 Buffery a linkování

Vstupní data vertex shaderu se ukládají do paměti GPU pomocí Vertex Buffer Objektu VBO. Ten v sobě dokáže uložit velké množství dat, díky čemuž jich posíláme více najednou a využíváme vysokou propustnost GPU. Tato data jsou pak jednoduše přístupná pro vertex shader, který s nimi v GPU pracuje. Následně se propojují vertex atributy. To udává, jak jsou vstupní data linknuta k proměnným uvnitř vertex shaderu. Dalším důležitým objektem je Vertex Array Object VAO, do kterého se ukládá, jak jsou data v VBO uspořádána a jak se mají propojit s vertex shadery. [58]

Shadery se kompilují a linkují a následně ukládají do paměti GPU jako součást shader programu. To je objekt, který je výslednou slinkovanou verzí všech shaderů. Linkování shaderů propojuje výstupy jednoho shaderu se vstupy druhého. Shader programů může mít uživatel více a pro každý objekt si může vybrat jiný podle toho, jaké shadery na něj chce použít. [58]

3.3.5 GLSL

Shadery se píší v programovacím jazyce OpenGL Shading Language GLSL, který je podobný jazyku C. GLSL je specificky navržen pro práci s grafikou a obsahuje užitečné funkce na manipulaci s vektory a maticemi. Pokud jsou na sebe linknuté dva shadery, výstupy z prvního shaderu se přenesou do druhého shaderu. Proměnné ovšem musí mít identický typ a velikost. Další důležitou funkcí jsou uniformy, což jsou globální proměnné pro všechny shadery uvnitř jednoho shader programu. V uniformách se často uchovávají matice a další konstanty. [58]

3.4 Textury

Textura je obrázek používaný k přidávání detailů k objektu. Pro každý vrchol objektu přiřadíme souřadnici textury, která určuje, jaká část textury odpovídá danému vrcholu. Souřadnice textury se ukládají do vertex atributů. Textura se pak aplikuje ve fragment shaderu na každý fragment objektu, čímž se promítne. Je také možno mít původní barvu objektu s jednou nebo více texturami na jednom objektu. Následně se barvy a textury poměrově míxují podle nastavených alpha hodnot. [58]

4 to do

mozna pridať trochu historie compileru u C a CPP

celá část historie počítačové grafiky je scuffed, chybí tam části o gpu, a nejspis to bude potreba zkratit a udelat rozdeleni do subsectionu podle let

kdyz introdusuju zkratku, dej ji velka pismena, at ctenar vi ze je to zkratka

predelat pomlcky z - na tu dinvou co pouziva chat a chce ji pazi

odendej vsechny cislovky z textu a nahrad je slovama

Část II

Vývoj hry v OpenGL

5 Architektura hry

Pro vytváření své hry jsem si vybral OpenGL, protože je to nízkourovňové API, jehož použití vyžaduje základní porozumění grafické pipeline. Jako programovací jazyk jsem si vybral C++, protože je s C knihovnami dobře kompatibilní, ale přitom mohu využívat prvky objektově orientovaného programování, které jsou ve vývoji hry užitečné.

Moje hra má dva základní stavy. Prvním z nich je menu, ve kterém se uživatel nachází při prvním zapnutí hry. Po kliknutí na tlačítko „Play“ se uživatel přesouvá do druhého stavu běžící hry. Při běhu hry je cílem hráče pohybovat košíkem a sbírat jablka, což přidává skóre. Zároveň je cílem hráče vyhýbat se padajícím kokosům, které hráči odebírají životy. Tento stav běží, dokud uživateli nedojdou všechny životy, a následně je přesunut zpět do herního menu. Hra je tvořena větším počtem souborů, které níže vysvětlím.

- `main.cpp` – Vytváří herní okno a spouští hlavní smyčky.
- `window.cpp` – Inicializuje GLFW a spravuje okno aplikace.
- `game.cpp` – Řídí přepínání herních stavů a resetuje proměnné při restartu hry.
- `game_menu.cpp` – Renderuje stav menu a předává informaci do hlavní herní logiky, zda byla hra spuštěna.
- `game_running.cpp` – Renderuje stav, kdy hra běží, a volá funkce pro objekty ve hře.
- `shader.cpp` – Spravuje shadery, tedy kompilaci, linkování, aktivaci a nastavování uniform.
- `rendering_function.cpp` – Poskytuje funkce pro načítání shaderů a propojování vstupních dat s VBO a VAO.
- `texture.cpp` – Spravuje vytváření, aktivaci a nastavení parametrů textur.
- `vertices.cpp` – Uchovává vstupní data, jako jsou souřadnice objektů a textur.

- `fruit.cpp` – Spravuje tvoření, pohyb a mazání ovoce.
- `player.cpp` – Spravuje pohyb hráče.
- `text.cpp` – Spravuje vytváření a aktualizaci textu pro počítání životů a bodů.
- `collision_detection.cpp` – Zjišťuje, zda dochází ke kolizi hráče s ovocem, a případně volá aktualizaci životů a skóre.
- `random.cpp` – Vytváří náhodné hodnoty typu `double` a `float`.

6 Použité programy a knihovny

6.1 CMake

CMake je program, který generuje nativní soubory build systému pro různé platformy. Do textového souboru `CMakeLists.txt` se zapisují zdrojové soubory, cesty ke knihovnám, které program používá, a také konfigurace verze C++, kterou chce uživatel používat. CMake tyto informace předá compileru, takže uživatel nemusí vypisovat pro každou kompilaci všechny dependencies svého programu. Další výhodou je, že build vytvořený pomocí CMake může fungovat napříč platformami. [8]

6.2 GLAD

GLAD je knihovna, která generuje loader na základě oficiální specifikace OpenGL. Od verze OpenGL 1.1 nejsou moderní funkce přímo v systému, takže nejdou importovat do programu jako knihovna, ale jsou implementovány v ovladačích grafických karet. Kvůli tomu by kompilátor nebyl schopen najít deklarace těchto OpenGL funkcí. Proto se využívají loadery jako GLAD, které načtou tyto funkce a skrze hlavičkový soubor je vloží do C++ programu. [28]

6.3 GLFW

GLFW je knihovna určená pro vývoj aplikací využívajících OpenGL nebo Vulkan. Hlavním účelem GLFW je otevírání, správa a nastavení vlastností oken. Pro každé okno je vytvořen kontext, který obsahuje stav grafiky spojený s daným oknem. GPU při vykreslování čerpá z kontextu uchovaný stav, který funguje jako prostředník mezi programem a GPU. Další důležitou funkcí je zpracovávání vstupů uživatele, jako je stisk klávesy či myši, čímž je program schopen reagovat na interakce uživatele s oknem. [20]

6.4 GLM

GLM je matematická knihovna určená pro grafický software. GLM poskytuje funkce a třídy implementované se stejnými názvy a funkcemi jako GLSL, což usnadňuje práci se shadery. GLM se převážně používá pro práci s maticemi a obsahuje funkce pro operace s nimi, což ulehčuje transformace objektů, jako je posun či rotace. GLM také obsahuje generátor náhodných čísel nebo kvaterniony, které slouží k provádění rotací ve 3D prostoru. [42]

6.5 stb_image

Knihovna stb_image je jednoduchá knihovna pro načítání obrázků. Dokáže zpracovat většinu běžných formátů obrázků, jako jsou PNG nebo JPG. Tyto obrázky ukládá jako syrová data do paměti. Pro každý pixel jsou uložena 3 čísla při používání RGB nebo 4 čísla při RGBA. [12]

7 Herní mechaniky

7.1 Generátor čísel

Pro mou hru jsem potřeboval nějaký generátor náhodných čísel pro počáteční x souřadnici ovoce nebo pro rychlost, jakou bude padat. Moje classa využívá pseudonáhodný generátor mt19937. Tento generátor po dodání seedu vygeneruje náhodnou sekvenci čísel. Pro vytvoření seedu používám funkci `random_device`, která vygeneruje náhodné číslo z náhodných parametrů systému. Generování čísel podle parametrů systému je náhodnější, ale tento proces je poměrně pomalý, a proto se využívá jen na generování seedu. Pro vytvoření čísla z nějakého rozmezí se používá funkce `uniform_real_distribution`. Ta vydělí každé vygenerované číslo tím největším možným vygenerovaným číslem, čímž vytvoří číslo v rozmezí od 0 do 1. Následně se rozmezí, které chceme vytvořit, přemapuje na rozmezí od 0 do 1. [10]

7.2 Generování ovoce

Pro generování a práci s ovocem jsem si vytvořil dvě pomocné struktury.

```
1 enum class FruitType
2 {
3     apple = 0, coconut = 1
4 };
5
6 struct fruitAttributes
7 {
8     FruitType type;
9     glm::mat4 transform;
10    float speed;
11};
```

Zdrojový kód 7.1: pomocne struktury

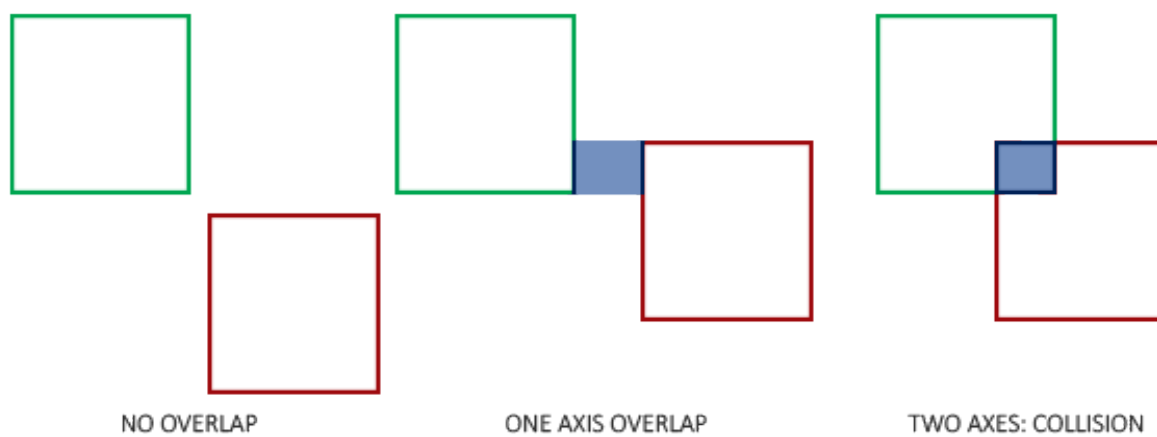
FruitType slouží k tomu, aby se přiřadila správná textura k danému ovoci a aby se při kolizi přidal bod nebo odebral život. Ve fruitAttributes jsou všechny potřebné parametry pro každé ovoce pohromadě, takže se s nimi lépe pracuje. Poté si vytvořím deque, do kterého si ukládám všechno ovoce, které je na obrazovce. Při vytváření ovoce vygeneruji náhodnou rychlost a matici, ve které je náhodné posunutí v souřadnici x. Pro mazání a kolize následně vždy jen iteruji skrz všechno ovoce a zjišťuji, zda se dostalo pod hranu obrazovky nebo zda kolidovalo s košíkem.

7.3 Vykreslování čísel

Pro počítání skóre a životů jsem si vytvořil třídu pro vykreslování čísel. Protože čísla, která potřebuji vykreslit, mohou mít libovolnou hodnotu, nevyplatí se pro každé číslo vytvářet samostatnou texturu. Místo toho jsem využil techniku zvanou texture atlas. Tato technika využívá jednu velkou texturu s číslicemi od 0 do 9. Každá cifra vykreslovaného čísla je samostatný objekt a je mu přiřazena část textury s odpovídající číslicí. Aby byla číslice správně vycentrovaná, musí se každému objektu přiřadit transformační matice. Pozice jednotlivé číslice závisí na celkové délce vykreslovaného čísla a také na pozici dané cifry v čísle. V shaderu se pomocí posunu texturových souřadnic určuje, jaká část textury se má vykreslit na daný objekt.

7.4 Detekce kolize

Pro detekci kolizí jsem využil AxisAligned Bounding Box (AABB) detekci. Každý objekt je reprezentován dvojicí bodů (horní levý roh a dolní pravý roh), které určují obdélník zarovnaný s osami. Kolize se zjišťuje porovnáním intervalů obou obdélníků na osách X a Y. Pokud dojde u obou os k překryvu, objekty mezi sebou kolidují.



Obrázek 7.1: AABO collision detection [2]

Závěr

Bibliografie

1. *A Critical History of Computer Graphics and Animation* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://web.archive.org/web/20070405181508/http://accad.osu.edu/%7Ewayne/history/lesson2.html>. [citováno 2025-11-07].
2. AKENINE-MÖLLER, Tomas et al. *Real-Time Rendering*. 4th. A K Peters/CRC Press, 2018. ISBN 9781138627000.
3. ALBATROSS. *History of C++* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://cplusplus.com/info/history/>. [citováno 2025-10-17].
4. BANAHAN, Mike; BRADY, Declan; DORAN, Mark. *The C Book: Featuring the ANSI C Standard(Instruction Set)*. 2nd. Addison-Wesley, 1991. ISBN 9780201544336.
5. BHATTACHEJEE, Souktik. *A timeline of 3D softwares* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.re-thinkingthefuture.com/career-advice/a2944-a-timeline-of-3d-softwares/>. [citováno 2025-12-02].
6. BRITANNICA. *vector graphics* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.britannica.com/technology/vector-graphics/additional-info#history>. [citováno 2025-11-12].
7. CCGOMENZ. *Radiosity Algorithm* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://ccgomezn.github.io/vc/docs/workshops/rendering/radiosity>. [citováno 2025-11-17].
8. CMAKE.ORG. *Software Development with CMake* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://cmake.org/about/>. [citováno 2025-01-08].
9. COMPUTE, Arc. *Memory Hierarchy of GPUs* [Online]. 2023. Dostupné také z: <https://www.arccompute.io/arc-blog/gpu-101-memory-hierarchy>. [citováno 2025-12-13].
10. CPPREFERENCE.COM. *C++ reference* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://cppreference.com/>. [citováno 2025-01-09].

11. CSBRANCH. *Types of Parallelism: Data vs. Tasks Parallelism* [Online]. 2024. Dostupné také z: <https://csbranch.com/index.php/2024/10/26/types-of-parallelism-data-vs-task-parallelism/>. [citováno 2025-12-15].
12. DEEPWIDI.COM. *Image Loading(stb_image)* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: [https://deepwiki.com/nothings/stb/2.1-image-loading-\(stb_image\)](https://deepwiki.com/nothings/stb/2.1-image-loading-(stb_image)). [citováno 2025-01-08].
13. DIGITAL ARTS, Copenhagen Academy of. *WHAT IS PHONG SHADING? (GUIDE WITH EXAMPLES)* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://cada-edu.com/guides/what-is-phong-shading>. [citováno 2025-11-15].
14. DOUGC. *What was the deal with 2.5D games like DOOM* [Online]. 2002. Dostupné také z: <https://boards.straightdope.com/t/what-was-the-deal-with-2-5d-games-like-doom/105737/3>. [citováno 2025-12-02].
15. ENGEL, Wolfgang. *The History of the GPU - New Developments*. 1st. Springer International Publishing, 2023. ISBN 9783031140464.
16. ENGINEERING; WIKI, Technology History. *Milestones:Whirlwind Computer, 1944-59* [Online]. 2024. Dostupné také z: https://ethw.org/Milestones:Whirlwind_Computer,_1944-59. [citováno 2025-11-06].
17. FRONT, Wolf. *Development History* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://wolfenstein3d.nl/development-history/>. [citováno 2025-12-02].
18. GEEKSFORGEEEKS. *Features of C* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.geeksforgeeks.org/c/features-of-c-programming-language/>. [citováno 2025-10-12].
19. GEEKSFORGEEEKS. *Top 25 C++ Applications in Real World[2025]* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.geeksforgeeks.org/blogs/top-applications-of-cpp-in-real-world/>. [citováno 2025-10-22].
20. GLFW.ORG. *GLFW Introduction* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.glfw.org/docs/latest/index.html>. [citováno 2025-01-08].
21. GLOSSARY, Computer Graphics. *Bump Mapping - Definition & Detailed Explanation - Computer Graphics Glossary Terms* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://pcpartsgEEK.com/bump-mapping/>. [citováno 2025-11-15].

22. HARBISON, Samuel P.; STEELE, Guy L. *C, a Reference Manual*. 5th. Prentice-Hall, 2002. ISBN 9780130895929.
23. HICKMAN, Zachary. *Quake Engine Analysis* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://zhickman.com/analysisfinal.pdf>. [citováno 2025-12-02].
24. HUGHES, John F. et al. *Computer Graphics: Principles and Practice*. 3rd. Addison-Wesley Professional, 2013.
25. JPIOLHO. *[2021 Re-release] How multiplayer works* [Online]. 2021. Dostupné také z: <https://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?id=2624343184>. [citováno 2025-12-02].
26. KAY, Alan. *Vision & Reality of Hypertext and Graphical User Interfaces* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: https://mprove.de/visionreality/text/3.1.2_sketchpad.html. [citováno 2025-11-07].
27. KERNIGHAN, Brian W.; RITCHIE, Dennis M. *The C Programming Language*. 2nd. Pearson, 1988. ISBN 9780131103627.
28. KHRONOS.ORG. *OpenGL Loading Library* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: https://wikis.khronos.org/opengl/OpenGL_Loading_Library. [citováno 2025-01-08].
29. KIRK, David B.; HWU, Wen-mei W. *Programming Massively Parallel Processors: A Hands-on Approach*. 3rd. Morgan Kaufmann, 2016.
30. KOCHAN, Stephen G. *Programming in C*. 4th. Pearson Education, 2015. ISBN 9780321776419.
31. KONOW, David. *Putting the Original Tron's Special Effects Together* [Online]. 2015. Dostupné také z: <https://web.archive.org/web/20180512181521/http://www.tested.com/art/movies/520562-putting-original-trons-special-effects-together/>. [citováno 2025-11-16].
32. LABORATORY, Lincoln. *SAGE: SEMI-AUTOMATIC GROUND ENVIRONMENT AIR DEFENSE SYSTEM* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.ll.mit.edu/about/history/sage-semi-automatic-ground-environment-air-defense-system>. [citováno 2025-11-06].
33. LABS, BCA. *Vision & Reality of Hypertext and Graphical User Interfaces* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://bcalabs.org/subject/bresenhams-line-algorithm-in-computer-graphics>. [citováno 2025-11-11].

34. LEE, Sarah. *Mastering Gouraud Shading Techniques* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.numberanalytics.com/blog/mastering-gouraud-shading-techniques>. [citováno 2025-11-15].
35. LOGAN. *Z-Buffer Algorithm* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.onlycode.in/z-buffer-algorithm/>. [citováno 2025-11-15].
36. LONDON, Imperial College. *Ray Tracing* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.doc.ic.ac.uk/~bkainz/graphics/notes/GraphicsNotes1011.pdf>. [citováno 2025-11-12].
37. MORTENSEN, Peter. *What's the difference between a low-level, midlevel and high-level language* [Online]. 2023. Dostupné také z: <https://stackoverflow.com/questions/3468068/whats-the-difference-between-a-low-level-midlevel-and-high-level-language>. [citováno 2025-10-13].
38. NAPPER, Brian. *The Manchester Small Scale Experimental Machine – "The Baby"* [Online]. 1999. Dostupné také z: <https://web.archive.org/web/20120604211339/http://www.computer50.org/mark1/new.baby.html>. [citováno 2025-11-05].
39. NOLLE, Tom. *What is structured programming(modular programming)* [Online]. 2023. Dostupné také z: <https://www.techtarget.com/searchsoftwarequality/definition/structured-programming-modular-programming>. [citováno 2025-10-14].
40. NVIDIA. *Accelerating Fibre Orientation Estimation from Diffusion Weighted Magnetic Resonance Imaging Using GPUs* [Online]. 2013. Dostupné také z: https://www.researchgate.net/figure/Typical-NVIDIA-GPU-architecture-The-GPU-is-comprised-of-a-set-of-Streaming_fig1_236666656. [citováno 2025-12-11].
41. OPENGL, Learn. *Theory, BRDF* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://learnopengl.com/PBR/Theory>. [citováno 2025-11-16].
42. OPENGL.ORG. *OpenGL Mathematics(GLM)* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.opengl.org/sdk/libs/GLM/>. [citováno 2025-01-08].
43. PEDDIE, Jon. *The History of the GPU - Eras and Environment*. 2nd. Springer Nature, 2023. ISBN 9783031135811.
44. PEDDIE, Jon. *The History of the GPU - New Developments*. 1st. Springer International Publishing, 2023. ISBN 9783031140464.

45. PEDDIE, Jon. *The History of the GPU - Steps to invention*. 1st. Springer International Publishing, 2023. ISBN 9783031109676.
46. RHINOCEROS. *What are NURBS* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: <https://www.rhino3d.com/features/nurbs/>. [citováno 2025-11-16].
47. SEVO, Daniel. *HISTORY OF COMPUTER GRAPHICS 1990-99* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: https://www.danielsevo.com/hocg/hocg_1990.htm. [citováno 2025-12-03].
48. SMITH, Ryan P. *How the First Popular Video Game Kicked Off Generations of Virtual Adventure* [Online]. 2018. Dostupné také z: <https://www.smithsonianmag.com/smithsonian-institution/how-first-popular-video-game-kicked-off-generations-virtual-adventure-180971020/>. [citováno 2025-11-12].
49. SRUTHY. *What Is C++ Used For? Top 12 Real-World Applications And Uses Of C++* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.softwaretestinghelp.com/cpp-applications/>. [citováno 2025-10-22].
50. STROUSTRUP, Bjarne. *Design and Evolution of C++, The*. 1st. Addison-Wesley Professional, 1994. ISBN 9780201543308.
51. STROUSTRUP, Bjarne. *Programming Principles and Practice Using C++*. 2nd. Pearson Education, 2014. ISBN 9780321992789.
52. STROUSTRUP, Bjarne. *The C++ Programming Language*. 4th. Pearson Education, 2013. ISBN 9780321563842.
53. TECH, WsCube. *Top Applications of C programming* [Online]. 2024. Dostupné také z: <https://www.wscubetech.com/resources/c-programming/applications>. [citováno 2025-10-09].
54. TILLEY, Thomas. *Spacewar! Controllers* [Online]. 2015. Dostupné také z: <https://tomtilley.net/projects/spacewar/>. [citováno 2025-11-12].
55. TODAY, Everything Explained. *Hidden-surface determination explained* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: https://everything.explained.today/Hidden-surface_determination [citováno 2025-11-15].

56. UNIVERSITY, Cornell. *Memory Types* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: https://cvw.cac.cornell.edu/gpu-architecture/gpu-memory/memory_types. [citováno 2025-12-13].
57. VOLLE, Adam. *C++ computer language* [Online]. 2025. Dostupné také z: <https://www.britannica.com/technology/C-computer-language>. [citováno 2025-10-17].
58. VRIES, Joey de. *Learn OpenGL Learn modern OpenGL graphics programming in a stepbystep fashion*. 1st. Kendall & Welling, 2020. ISBN 9789090332567.

Zkratky

API Application programming interface. 19, 24

CPU Central processing unit. 8–11, 15

CRT Cathode ray tube. 7

DRAM Dynamic random access memory. 12

GLSL OpenGL shading language. 21, 27

GPU Graphics processing unit. 9–11, 13–16, 19, 20, 26, 33

RAM Random access memory. 7, 11

SM Streaming multiprocessor. 11, 12, 14, 33

SP Streaming processor. 11, 12

SSEM Small-Scale Experimental Machine. 7

VAO Vertex array object. 20, 24

VBO Vertex buffer object. 20, 24

VRAM Video random access memory. 11, 12

Seznam obrázků

2.1	Typická architektura NVIDIA GPU [40]	13
2.2	Rozdělení vláken do warpů v SM [29]	14
7.1	AABB collision detection [2]	30

Seznam tabulek

Přílohy

A Fotky z pokusů

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

B Příloha další