GYMNÁZIUM JÍROVCOVA 8

MATURITNÍ PRÁCE

Programování grafické aplikace v C++

René Čakan

vedoucí práce: Dr. rer. nat. Michal Kočer

V Českých Budějovicích 6. února 2026 **2025/2026**

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

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 řídících 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 střídmou 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. [25, 23, 15, 32, 34]

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, 18, 25, 23]

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, 25, 47]

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

```c
#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>

int compare(const void *a, const void *b)
{
    return (*(int *)a - *(int *)b);
}

int main(void)
{
    int sizeOfArray;
    scanf("%d", &sizeOfArray);
    int *array = malloc(sizeOfArray *sizeof(int));

    for(int i = 0; i < sizeOfArray; ++i)
        scanf("%d", &array[i]);

    qsort(array, sizeOfArray, sizeof(int), compare);

    for(int i = 0; i < sizeOfArray; ++i)
        printf("%d\n", array[i]);

    free(array);
    return 0;
}
```

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 objektově. 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++. [46, 45]

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 objektově orientovaný a sloužil primárně k vytváření simulací. Stroustupovi přišlo objektově orientované programování velmi užitečné, ale Simula 67 byl příliš pomalý pro větší projekty. Rozhodl se vytvořit nadmnožinu jazyka C, která by umožňovala objektově 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 objektově orientovaného programováni. 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. [45, 44, 3, 51]

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. [46, 16, 43]

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

```cpp
#include <iostream>
#include <vector>
#include <algorithm>

int main()
{
    int sizeOfArray;
    std::cin >> sizeOfArray;
    std::vector<int> arr(sizeOfArray);

    for(int i = 0; i < sizeOfArray; ++i)
        std::cin >> arr[i];

    std::sort(arr.begin(), arr.end());

    for(int i : arr)
        std::cout << i << '\n';

    return 0;
}
```

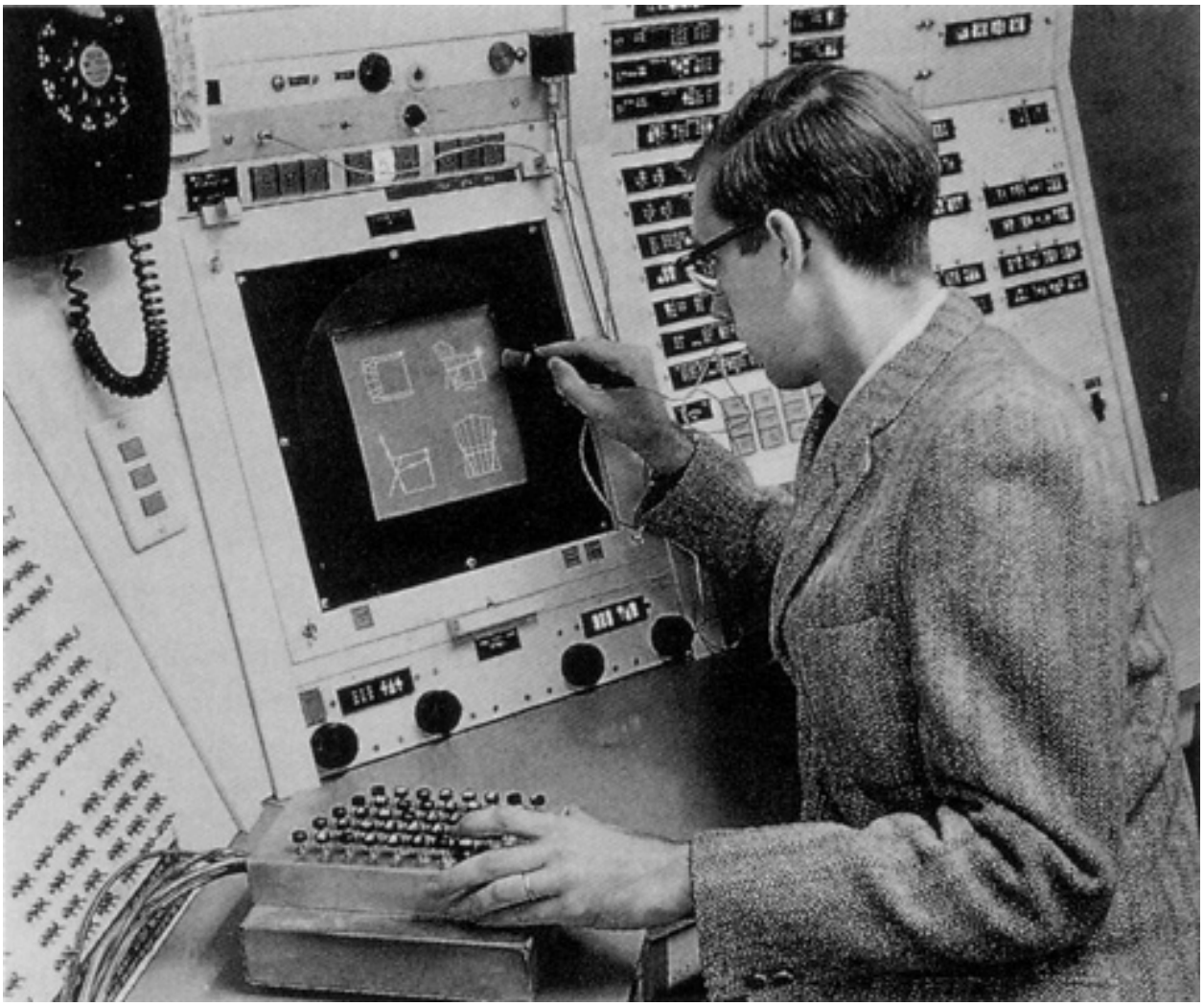
Zdrojový kód 1.3: sort_n_numbers.cpp

2 Počitačová grafika

2.1 Historie počítačové grafiky

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. [38, 33]

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 jádrami, 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 tranzisto-



Obrázek 2.1: Skatchpad Ivana Sutherlanda [22]

rový. 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 mazaní, zoomování či ukládání. Tím vznikl první počítač s interaktivní počítačovou grafikou. [38, 13, 27, 1, 22]

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. [38, 28, 31]

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, Painterś 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 techink je Phong shading, kterou vytvořil Bui Tuong Phong v roce 1974. Por 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 mýt nějaké výstupky čí 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 počítaní světla místa s vrcholekm udělají světlejší a místa s prohlubní tmavější, což dodává efekt hrbolatého povrchu na uplně rovném polygonu. [49, 30, 29, 10, 17]

V 80. letech za 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 schope 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, címž se vyrendrovaná věc zdá realističtější. Dalším důležitým algoritmem je radiosity algororithm. Tento lgoritmus počítá světlo polygonu součtem světla kolik vyzařuje a kolik světla přijmá od ostatních polygonů. Narodíl ale od starších algoritmu všechny polygony také nějaké světlo odrážejí, což je dáno povrchem polygonu. Toto odražené světlo se také počítá do celkového osvícení 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, 26, 40, 36, 7]

V průběhu 90. let se významě vylepšovaly domácí počítače, které dokázali spustit i složitější programy a hry. 3D grafika se stala populárnější a vznikal 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 přílič 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 strory. 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, kterych bylo vice a ukazovaly se podle toho pod jakým úhlem se hráč na příšeru koukal. První plně 3D hra bula 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 projektyly a nepřátele. [5, 14, 11, 21, 19]

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

Společně s vývojem počítačové grafiky začaly vznikat i první videohry. Hra Spacewar! byla jedna z prvních, která se rozšířila po laboratoř9ch 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 lodě. [42, 6, 48]

2.2 Grafické karty

2.2.1 CPU vs. GPU

Tradičně běžela většina apklikací sekvenčně, které běží na procesorech, které mají centrální výpočetní jednotku a provádí instrukce jednu po druhé CPU. V průběhu 20. století se výkon CPU významě zlepšoval až na bilion operací za sekundu, čímž se mohli zlepšévat grafické aplikace a využívat náročnější funkce. Na přelomu tisíceletí 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 složíté výpočti, 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. [24]

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 architektuře. CPU má jednotky až desítky jader a umí dělat jeden krok extrémě rychle kvůli sekvenčnímu zapojení. Velká část čipu je určena pro cachi, tedý malu pamět, kam se ukládají data která budou pravděpodobně v budoucnisti 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 jednodužší, takže velmi pomalu reaguje na události a po dokončení operaí se většinou data vrací zpět do virtual random access memory VRAM, což je díky velké propustnosti i pro velmi velký objem dat rychlé. [24]

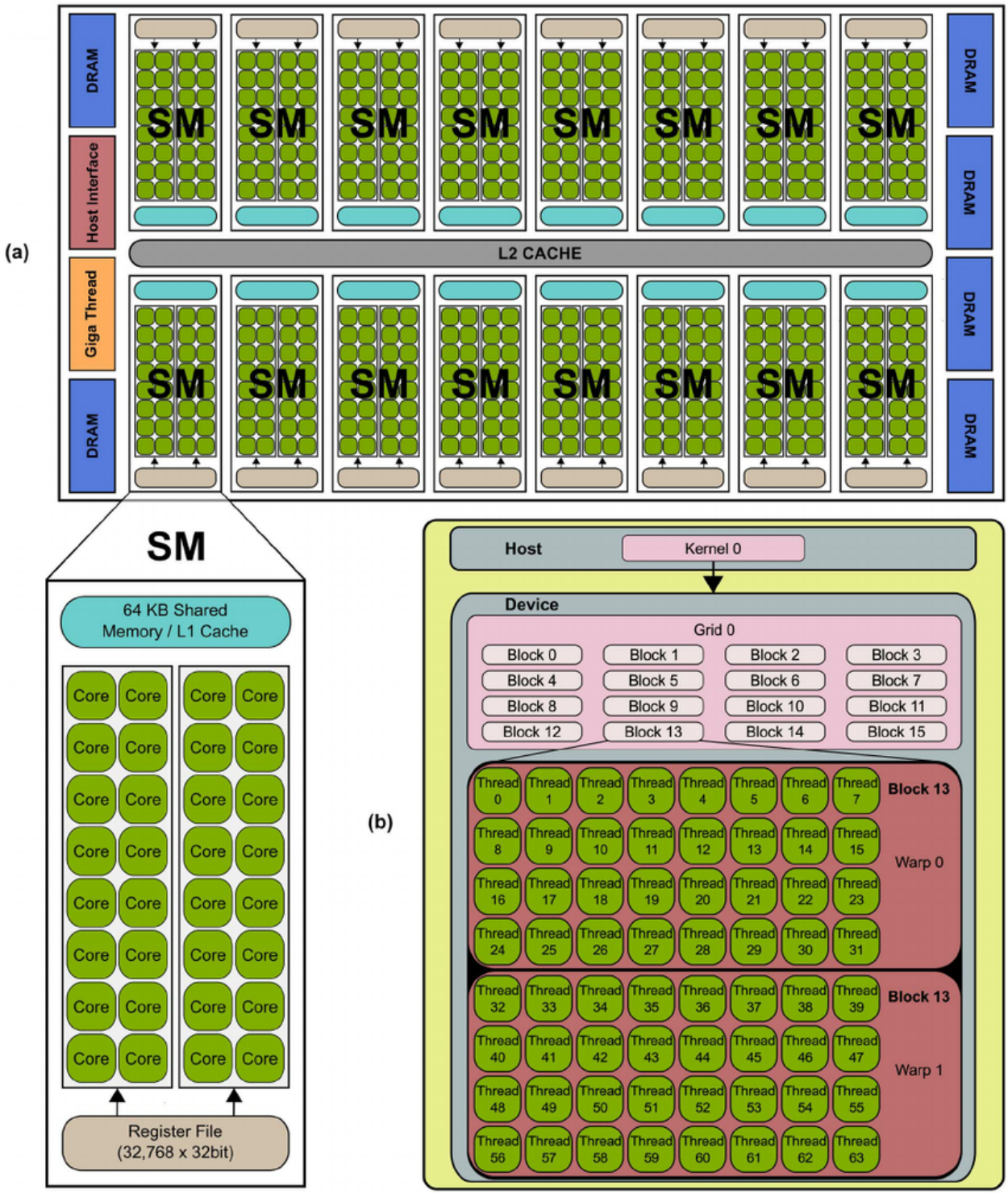
Do roku 2007 se GPU pouzival prevazne pro renderovani, ale v roce 2007 prisla NVIDIA s programovacim modelem pro paralelni vypocty CUDA. Tento model umoznuje psat programy, ktere bezi na GPU a vyuzivaji CPU na prenost dat a rizeni techto programu. Diky

tomu mohli zacit vznikat aplikace, ktere normalne bezi na CPU, ale pri potrebe narocnejsich pocetnich operaci mohly bezet na GPU, a tim zvysit vykon. Pro ucel vysvetleni programovacich modelu pro paralelni vypocty budu vyuzivat model CUDA, pricemz existuji i jine podobne modely jako OpenCL nebo SYCL. [24]

2.2.2 Architektura a paměťová hierarchie GPU

GPU s podporou CUDA je organizovano do pole paralelnich streamovacich multiprocesoru SM. Kazdy SM se sklada z nekolika streamovacich procesoru SP, ktere jsou zakladni vypocetni jednotkou, na ktere probihaji aritmeticke operace. Dalsi soucasti jsou ridici jednotky, ktere nacitaji instrukce pro dany SM. Ridici jednotky taky obsahuji malou cache na instrukce, aby se pro ne meuselo porad sahat do RAM. Dale je unvintr SM warp scheduler, ktery ridi ktere zkupiny vlaken budou v kazdem cyklu pouzity. [24]

Vetsina grafickych karet ma svoji vlastni dynamic random access memory DRAM, ktere se rika globalni pamet. V grafickych kartach je specificky typ DRAM zvany VRAM. Tato pamet ma jednotky az desitky gigabytu. Dochazi v ni k vymene dat mezi host memory. Rychla vymena dat mezi host memory a VRAM je zarucena velkou propustnosti, ktera je zpusobena nacitanim dat blokove namisto sekvencne a take posilanim vetsiho objemu dat najednou. VRAM je zdilena mezi vsemy SM, ale pristup k ni je relativne pomaly. Dalsi pameti je shared memory, ktera ma vetsinou desitky kilobajtu. Tuto pamet ma kazdy SM, a kazdy SP si do ni muze sahat. V kazdem SM se takze vyskytuje L1 cache, ktera slouzi k uchovavani dat, ze ktercyh se nedavno cetlo nebo byla zmenena. Dale existuje L2 cache, ktera je vetsi nez L1 cache, a je jedna pro vsechny SM. Pouziva se pro uchovavani dat nedavno ziskana nebo poslana do VRAM. Cast VRAM je take urcena pro dva jine typy pameti a to texture a constant memory. Obe pameti maji k sobe prirazenou svoji cache a jsou read-only. Tim ze jsou read-only, muzeme casto pouzivane hodnoty uchovavat v cachi bez obavy z toho, ze by se dana promena mohla v prubehu zmenit. Nejmensi, ale take nejrychlejsi casti pamety jsou register files. Tato pamet primo komunikuje s SP a ukladaji se do ni docasne promene a mezivypocty. [24, 8, 50]



Obrázek 2.2: Typická architektura NVIDIA GPU [35]

2.2.3 Paralelismus

Paralelismus je vypocetni technika, ktera umoznuje vykonavani vice operaci najednou. Paralelismus se da rozdelit do dvou kategorii. Prvni z nich je ulohovy paralelismus. Tento typ nasleduje Multiple Insturctions, Multiple Data (MIMD) model. Tento model rozdeli ruzne

ulohy mezi vice vlaken nebo i jader. Tento model se vyuziva, pokud na sobe nejsou ulohy zavisle. Pokud by se napriklad chtela vypocitat suma arraye, muze kazde vlakno pocitat jednu polovinu a dva vysledky secist. MIMD se vyuziva v simulacich nebo na webovych aplikacich. [24, 9]

Druhou metodou je data paralelismus, ktery je definovan Single Instruction, Multiple Data (SIMD) modelem. Tento model aplikuje jedno ulohu pro velke mnozstvi dat a vyuziva se v GPU. Pouziva ne napriklad pri nasobeni matic, kde se dana matice da rozdelit na mensi casti nebo pri vykreslovani, kdy se jeden shader aplikuje pro kazdy pixel. V grafickych kartach se jednotliva vlakna sdruzuji do warpu, ty dale do bloku, ktere planuje SM. Do kazdeho warpu jsou nactene stejne instrukce a postupne se se mu dodavaji data, na kterych dane instrukce provadi. Diky tomu lze i velke mnozstvi dat zpracovat velmi rychle, protoze se dodavaji s velkou propustnosti a instrukce na nich jsou provadeny soucasne na velkem mnozstvi warpu. [24, 9]

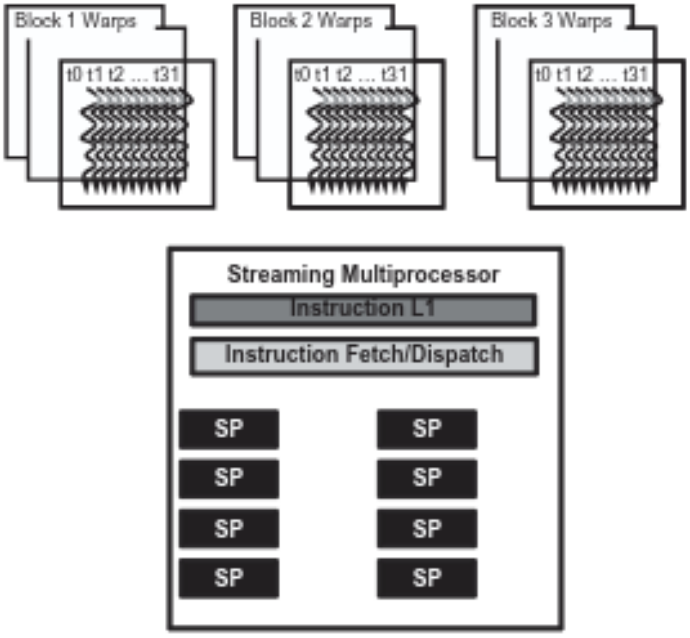


FIGURE 3.13

Blocks are partitioned into warps for thread scheduling.

Obrázek 2.3: Rozělení vláken do warpu v SM [24]

2.3 Grafická zobrazovací pipeline

Hlavni funkci graficke zobrazovaci pipeline je vyrenderovat dvourozmerny obraz z trojrozmernych objektu, pozice virtualni kamery, zdroju svetla atd., ktery je schopen byt zobrazen na napriklad monitoru. Pipeline se sklada z nekolika fazi. Tyto faze probihaji paralelne v ramci jednotlivych fazi, tedy jedna faze probiha pro vice dat najednou, tak i mezi jednotlivymi fazemi, takze pro pruchodu jednoho bloku dat jednou fazi prechazi do dalsi faze, i kdyz pro jina data jeste predchozi faze nemusi byt ukoncena. Hlavni ctyri faze jsou aplikacni faze, geometricke zpracovani, rasterizace a zpracovani pixelu. [2]

Aplikacni faze je rizena samotnou aplikaci a je vetsinou implementovana jako software bezici na CPU. Tato faze nema zadne podprvky, a proto muze bezet paralelne na ruznych jadrech. V teto casti se zpracovavaji vztupy od uzivatele, ktere napriklad pozmenuji matici k posunuti, otoceni nebo zmeny velkikosti ruznych objektu. V teto casti take dochazi detekce kolizi, akceleracni algoritmy, fyzikalni simulace a dalsi vypocty, ktere pripravuji data pro dalsi scenu. [2]

Dalsi casti pipeliny je geometricke zpracovani. Ta jo zodpovedna za vetsinu operaci pro kazdy trojuhelniky a vrcholy, ktere tvori objetky. Rozdeluje se na ctyri podfaze, vertex shading, projekce, clipping a screen mapping. Vertex shading vypocitava pozici vrcholu a pripravuje jeho data jako barvy a textury. Objekt je transformovan z modeloveho prostoru do svetovych souradnic, tedy souradnic relevantni pro vsechny objekty ve scene. Dale se to transformuje do kameroveho prosotru, ve kterym je kamera v bode nula. Pote dochazi k projekce, kdy dochazi k transformaci z kameroveho prostoru do clip spacu, aby bylo mozne provezt clipping. Clipping urcuje, jaky objekt se budou renderovat. Pokud by napriklad cely objekt byl mimo zorne pole sceny, neni renderovan, aby zbytecne nezatezoval GPU. Posledni casti je mapovani na obrazovku, ktera prevede souradnice z clip spacu do souradnic obrazovky, pripravene pro rasterrizaci. Soucasti vertex shadingu jsou take volitelne faze vertex zpracovani. Tessellation generuje vhodne trojuhelniky pro zakrivene povrchy, aby vypadali realisticneji. Geometry shader umoznuje podle potreby vytvaret nove vrcholy z existujicich trojuhelniku nebo bodu, coz se pouziva napriklad u malych castic, aby byli lepe videt na obrazovce, takze se z nej udela napriklad maly ctverec. Posledni volitelna faze je stream output, ktera umoznuje namisto poslani vrcholu do dalsi faze ulozit vrcholy do bufferu, na kterych CPU muze delat dalsi vypocty ci simulace. [2]

Nasledujici faze je restarizace, jejiz ucel je nalezt vsechny pixely uvnitr vykreslovaneho trojuhelniku. Restarizace se deli na pripravu trojuhelniku a pruchod trojuhelnikem. Pri priprave se vypocitavaji diferencialy, rovnice hran a jina podobna data, ktera jsou vyuzivana k zjistovani zda dany pixel lezi uvnitr trojuhelniku. Pri pruchodu se zjistuje, zda stred pixelu lezi uvnitr trojuhelniku a pokud ano, vytvori se pro dany pixel fragment. Vlastnosti, jako barva, hloubka atd. jednotlivych fragmentu se ziskavaji interpolaci mezi vrcholy daneho trojuhelniku a nasledne se ukladaji do specificych bufferu. Vysledne fragmenty jsou nasledne predany do faze pixeloveho zpracovani. [2]

Pixelove zpracovani se deli na pixelove stinovani a slucovani. Ve fazi pixeloveho stinovani se provadeji vypocty stinovani jednotlivych pixelu z stinovacich dat. Vysledkem je jeden nebo vice barevnych vystupu. V teto fazi se pouziva hodne specifickych technik, jako napriklad texturovani. Pixelove stinovani je narozdil od ostatnich fazi, ktere jsou dany architekturou GPU, dano programovatelnymy jadry GPU. Pri slucovani dochazi k kombinaci vyztupu pixeloveho stinovani a ulozenych barev v bufferech. V teto fazi se take resi viditelnost, aby se vykreslovalal pro dany pixel fragment s nejmensi hloubkou. [2]

2.4 Transformace

V prubehu renderovani je casto potreba s objekty ruzne pohybovat. Mohli bychom pozmenovat souradnice puvodnich vrcholu a opetovne konfigurovat jejich buffery, ale to je vypocetne naroce. Misto toho se vyuzivaji transformace pomoci matic. Matice jsou obdelnikove pole matematickych vyrazu. Souradnice objektu se ukladaji do 4D vektoru, a transformace do 4x4 matice, ktere se mezi sebou vynasobi.

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

Mezi zakladni operace patri translace, rotace a skalovani. Translace je operace, pri ktere se k puvodnimu vektoru price jiny vektor, cimz se puvodni objekt posune. Potrebujeme translacni hodnoty nasobit slozkou w vektoru, ktera je nastavena na 1, aby neupravila tyto hodnoty.

Proto pouzivame 4D vektor, protoze s 3D vektorem by translace nebyla mozna.

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

Dalsi operaci je skalovani. Pri teto operaci se dane souradnice nasobi konstantou, cimz se muze dany objekt zmensit nebo zvetsit.

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

Posledni dulezita operace je otaceni. Pri teto operaci zavisi na tom, podle jake osy se ma objekt otacet a o kolik radianu se ma otocit.

Rotace podle osy X:

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

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:

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

Pri provadeni transformaci zalezi na poradi. Pokud je pro transformaci jednoho objektu vice matic, pronasobi se matice mezi sebou, a pouziva se vysledna matice. Pri tvoreni takove

matice se ale postupuje v opacnem poradi nasobeni. Pokud by jsme pro vektor V chteli udelat operace a, b a c, tak to lze udelat nasledovne:

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

nebo

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

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

3 OpengGL

3.1 Historie OpenGL

Open GL je povazovano za aplikacni programovaci rozhrani (API), ktera uzivatelum poskytuje sadu funkci, kterou muzeme pouzivat k manipulaci s grafickou karou. Specifikaci pro OpenGL dela spolecnost Khronos Group, ktera urcuje jake funkce existuji a jak se budou chovat. Pote kazda spolecnost implementuje OpenGL API pro svuj druh grafickych karet. [52]

3.2 OpenGL pipeline

Graficka pipeline je velmi podobrna obecne graficke pipeline, kterou jsem popisoval v predchozi kapitole. Uzivatel je schopen kontrolovat programovatelne faze pipeline, tedy vertexovym a fragmentovym shaderem. Casti jako rasterizace jsou nemenne a jsou definovane v API. [52]

3.3 Shadery

3.3.1 Co to je shader

Shader je maly program, ktery bezi na GPU. Tyto programy se spousteji pro konkretni cast graficke pipeline. Shadery premenuji vstupy a prevadeji je na vystupy potrebne pro nasledujici faze. Starsi verze OpenGL meli defaultni shadery, ale v novejsich verzich je uzivatel povinen vytvorit zakladni shadery, aby GPU neco vykreslila. Shadery jsou od sebe izolovane a komunikuji spolu pouze pomoci vstupu a vystupu. Shaderu je vice druhu a dva zakladni jsou vertex a fragment shader. Shadery se kompiluji a linkuji a nasledne ukladaji do pameti GPU jako soucast shader programu. To je objekt ktery je vysledna slinkvovana verze vice

shaderu. Shader programu muze mit uzivatel vice a pro kazdy objekt si muze vybrat jiny, podle toho jake shadery na nej chce pouzit. [52]

3.3.2 Vertex shader

Zakladni ucel vertex shaderu je zpracovavani vrcholu objektu. Do vertex shaderu vztupuji atributy vrcholu, jako barvy nebo 3D souradnice bodu v modelovem prostoru. Vertex shader provadi transformace techto souradnic do svetoveho, kameroveho a nasledne clip prostoru pomoci transformacnich matic. Vztupni data se ukladaji do pameti GPU pomoci Vertex Buffer Objektu . Ten v sobe dokaze ulozit velke mnozstvi dat, diky cemuz jich posilame vice najednou a vyuzivame vysokou propustnost GPU. Kdyz jsou data ulozena v GPU, vertex shader k nim ma primy pristup. [52]

3.3.3 Fragment shader

Ucelem fragment shaderu je vypocitavani barevneho vystupu pro pixely. Barvy se v OpenGL definuji 4D vektorem s floaty od 0.0 do 1.0. Tyto cisla udavaji silu barev cervena, zelena a modra (RGB). Posledni cilso udava alfa hodnotu, tedy jak moc kombinace danych tri barev bude pruhledna. Ve fragment shaderu take dochazi k texturovani a ruznym efektum jako odlesky, stinovani atd. [52]

3.3.4 Buffery a linkování

Vztupni data vertex shaderu se ukladaji do pameti GPU pomoci Vertex Buffer Objektu . Ten v sobe dokaze ulozit velke mnozstvi dat, diky cemuz jich posilame vice najednou a vyuzivame vysokou propustnost GPU. Tyto data jsou pak jednoduse pristupna pro vertex shader, ktery s nimi v GPU pracuje. Nasledne se propojuji vertex attributy. To udava, jak jsou vztupni data linknuta k promennym uvnitr vertex shaderu. Dalsim dulezitym objektem je Vertex Array Object, do ktereho se uklada jak jsou data v VBO usporadana a jak se maji propojit s vertex shadery. [52]

Shadery se kompiluji a linkuji a nasledne ukladaji do pameti GPU jako soucast shader programu. To je objekt ktery je vysledna slinkvovana verze vsech shaderu. Linkovani shaderu propojuje vystupy jednoho shaderu s vstupy druheho. Shader programu muze mit uzivatel vice a pro kazdy objekt si muze vybrat jiny, podle toho jake shadery na nej chce pouzit. [52]

3.3.5 GLSL

Shadery se pisi v programovacim jazyce OpenGL Shading Language , ktery je podobny jazyku C. je specificky navrzen pro praci s grafikou a obsahuje uzite funkce na manipulaci s vektory a maticemi. Pokud jsou na sebe linknute dva shadery, vystupy z prvniho shaderu se prenesou do druheho shaderu. Promene ovsem musi mit identicky typ a velikost. Dalsi duleztiou funkci jsou uniformy, coz jsou globalni promene pro vsechny shadery uvnitr jednoho shader programu. V uniformach se casto uchovavaji matice a dalsi konstanty. [52]

3.4 Textury

Textura je obrazek pouzivany k pridavani detailu k objektu. Pro kazdy vrchol objektu priradime souradnici textury, ktera urcuje jaka cast textury odpovida danemu vrcholu. Souradnice textury se ukladaji do vertex atributu. Textura se pak aplikuje ve fragment shaderu na kazdy fragment objektu, cimz se promitne. Je take mozno mit puvodni barvu objektu s jednou nebo vice texturami na jednom objektu. Nasledne se barvy a textury pomerove mixuji podle nastavenych alpha hodnot. [52]

4 to do

mozna pridat trochu historie compileru u C a CPP

celá část hirstorie 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 Použité knihovny

5.1 GLAD

5.2 GLFW

5.3 stb_image

6 Herní mechaniky

6.1 Generátor čísel

6.2 Generování objektů

6.3 Pohyb hráče

6.4 Detekce kolize

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/%7Ewaynec/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 Standart(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. 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].
9. CSBRANCH. *Types of Parallelism: Data vs. Taks 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].

10. 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].

11. 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].

12. ENGEL, Wolfgang. *The History of the GPU - New Developments*. 1st. Springer International Publishing, 2023. ISBN 9783031140464.

13. 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].

14. FRONT, Wolf. *Development History* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: https://wolfenstein3d.nl/development-history/. [citováno 2025-12-02].

15. GEEKSFORGEEKS. *Features of C* [Online]. 2025. Dostupné také z: https://www.geeksforgeeks.org/c/features-of-c-programming-language/. [citováno 2025-10-12].

16. GEEKSFORGEEKS. *Top 25 C++ Applications inf Real World[2025]* [Online]. 2025. Dostupné také z: https://www.geeksforgeeks.org/blogs/top-applications-of-cpp-in-real-world/. [citováno 2025-10-22].

17. 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].

18. HARBISON, Samuel P.; STEELE, Guy L. *C, a Reference Manual*. 5th. Prentice-Hall, 2002. ISBN 9780130895929.

19. HICKMAN, Zachary. *Quake Engine Analysis* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: https://zhickman.com/analysisfinal.pdf. [citováno 2025-12-02].

20. HUGHES, John F. et al. *Computer Graphics: Principles and Practice*. 3rd. Addison-Wesley Professional, 2013.

21. JPIOLHO. *[2021 Re-release] How multiplayer works* [Online]. 2021. Dostupné také z: https://steamcommunity.com/sharedfiles/filedetails/?id=2624343184. [citováno 2025-12-02].

22. 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].

23. KERNIGHAN, Brian W.; RITCHIE, Dennis M. *The C Programming Language*. 2nd. Pearson, 1988. ISBN 9780131103627.

24. KIRK, David B.; HWU, Wen-mei W. *Programming Massively Parallel Processors: A Hands-on Approach*. 3rd. Morgan Kaufmann, 2016.

25. KOCHAN, Stephen G. *Programming in C*. 4th. Pearson Education, 2015. ISBN 9780321776419

26. 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].

27. 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].

28. 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].

29. LEE, Sarah. *Mastering Gouraud Shading Techniques* [Online]. 2025. Dostupné také z: https://www.numberanalytics.com/blog/mastering-gouraud-shading-techniques. [citováno 2025-11-15].

30. LOGAN. *Z-Buffer Algorithm* [Online]. 2025. Dostupné také z: https://www.onlycode.in/z-buffer-algorithm/. [citováno 2025-11-15].

31. 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].

32. MORTENSEN, Peter. *What's the difference between a low-level, midlevel and hight-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].

33. 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].

34. 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].

35. 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].

36. OPENGL, Learn. *Theory, BRDF* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: https://learnopengl.com/PBR/Theory. [citováno 2025-11-16].

37. PEDDIE, Jon. *The History of the GPU - Eras and Environment*. 2nd. Springer Nature, 2023. ISBN 9783031135811.

38. PEDDIE, Jon. *The History of the GPU - New Developments*. 1st. Springer International Publishing, 2023. ISBN 9783031140464.

39. PEDDIE, Jon. *The History of the GPU - Steps to invention*. 1st. Springer International Publishing, 2023. ISBN 9783031109676.

40. RHINOCEROS. *What are NURBS* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: https://www.rhino3d.com/features/nurbs/. [citováno 2025-11-16].

41. 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].

42. 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].

43. 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].

44. STROUSTRUP, Bjarne. *Design and Evolution of C++, The*. 1st. Addison-Wesley Professional, 1994. ISBN 9780201543308.

45. STROUSTRUP, Bjarne. *Programming Principles and Practice Using C++*. 2nd. Pearson Education, 2014. ISBN 9780321992789.

46. STROUSTRUP, Bjarne. *The C++ Programming Language*. 4th. Pearson Education, 2013. ISBN 9780321563842.

47. TECH, WsCube. *Top Applications of C programming* [Online]. 2024. Dostupné také z: https://www.wscubetech.com/resources/c-programming/applications. [citováno 2025-10-09].

48. TILLEY, Thomas. *Spacewar! Controllers* [Online]. 2015. Dostupné také z: https://tomtilley.net/projects/spacewar/. [citováno 2025-11-12].

49. TODAY, Everything Explained. *Hidden-surface determination explained* [Online]. [B.r.]. Dostupné také z: https://everything.explained.today/Hidden-surface_determinatio
[citováno 2025-11-15].

50. 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].

51. VOLLE, Adam. *C++ computer language* [Online]. 2025. Dostupné také z: https://www.britannica.com/technology/C-computer-language. [citováno 2025-10-17].

52. VRIES, Joey de. *Learn OpenGL Learn modern OpenGL graphics programming in a stepbystep fashion.* 1st. Kendall & Welling, 2020. ISBN 9789090332567.

Zkratky

CPU Central processing unit. 9, 11, 12, 15

CRT Cathode ray tube. 7

DRAM Dynamic random access memory. 12

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

RAM Random access memory. 7, 11, 12

SM Streaming multiprocessor. 12, 14, 33

SP Streaming processor. 12

SSEM Small-Scale Experimental Machine. 7

VRAM Video random access memory. 11, 12

Seznam obrázků

Seznam tabulek

Přílohy

A Fotky z pokusů

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetuer adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetuer 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