AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Katedra Informatyki

PROJEKT INŻYNIERSKI

IMPLEMENTACJA METODY SPH NA PROCESORY GRAFICZNE

DAWID ROMANOWSKI, WOJCIECH CZARNY

OPIEKUN:
dr hab. inż. Krzysztof Boryczko, prof. nadzw. AGH

Kraków 2014

OŚWIADCZENIE AUTORA PRACY

OŚWIADCZAM, ŚWIADOMY(-A) ODPOWIEDZIALNOŚCI KARNEJ ZA POŚWIADCZENIE NIEPRAWDY, ŻE NINIEJSZY PROJEKT WYKONAŁEM(-AM) OSOBIŚCIE I SAMODZIELNIE W ZAKRESIE OPISANYM W DALSZEJ CZĘŚCI DOKUMENTU I ŻE NIE KORZYSTAŁEM(-AM) ZE ŹRÓDEŁ INNYCH NIŻ WYMIENIONE W DALSZEJ CZĘŚCI DOKUMENTU.

. . . . . .

PODPIS

Spis treści

1. OpenCL

1.1. Wprowadzenie

OpenCL jest technologią, która umożliwia programistom heterogeniczne przetwarzanie danych poprzez uruchamianie programów na wielu różnych rodzajach urządzeń (nie tylko na klasycznych CPU). Wykorzystanie urządzeń o odmiennych architekturach może powodować olbrzymią poprawę w wydajności szerokiej gamy aplikacji ze względu na lepsze dostosowanie sprzętu do rozważanego problemu.

OpenCL jest obecnie głównym standardem w heterogenicznym przetwarzaniu - umożliwia przetwarzanie danych na dowolnej platformie dla której producent zaimplementował API. Jest także główną konkurencją biblioteki CUDA w GPGPU.

GPGPU (ang. General-Purpouse computing on Graphics Processor Units) to technika cechująca się wykorzystaniem GPU, które przeważnie zajmują się obliczeniami związanymi z grafiką komputerową, do dowolnych innych obliczeń. Technika ta znajduje zastosowanie głównie w obliczeniach równoległych ze względu na wykorzystanie w nowoczesnych kartach graficznych architektury SIMD (Single Instruction Multiple Data) i modelu wykonywania SIMT (Single Instruction Multiple Threads). GPU są obecnie zdolne wykonywać nawet tysiące wątków jednocześnie co sprawia, że znacząco lepiej radzą sobie z algorytmami równoległymi niż przeciętne CPU.

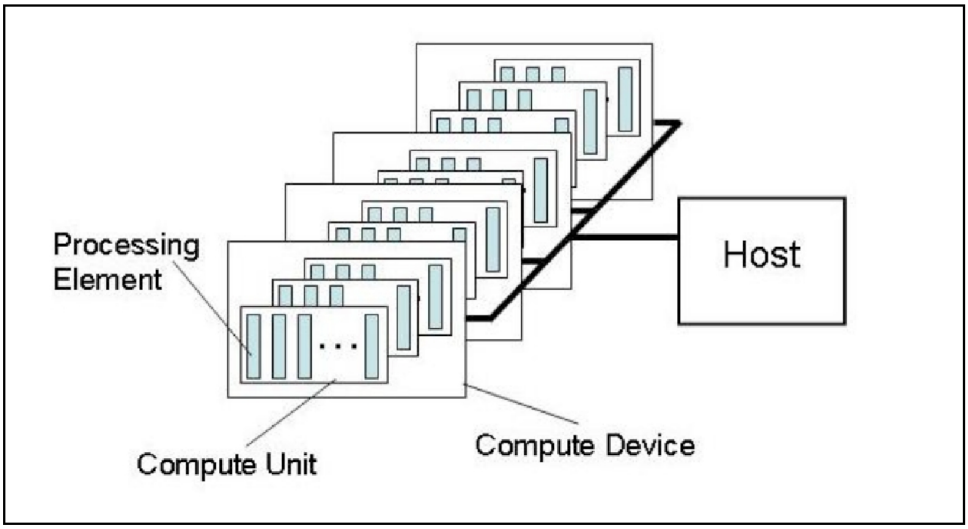
Kluczowymi cechami OpenCL zdefiniowanymi w standardzie są:

- Model urządzenia
- Model wykonywania
- Model pamięci
- Model programowania

1.2. Model urządzenia

W przetwarzaniu heterogenicznym kluczową cechą w projektowaniu algorytmów jest wiedza na temat architektury urządzenia docelowego. Wiedza ta umożliwia nam odpowiednie dobieranie algorytmów w zależności od możliwości sprzętowych platformy. OpenCL definiuje abstrakcję urządzenia składającą się z hosta podłączonego do jednego lub więcej urządzeń typu CPU, GPU czy DSP.

Każde urządzenie OpenCL składa się z jednego lub więcej elementów obliczeniowych (ang. compute unit), które się dalej dzielą na elementy przetwarzające (ang. processing unit). Obliczenia na urządzeniu są wykonywane przez elementy przetwarzające dla elementów roboczych (ang. work item) będących częścią modelu wykonywania. Ten prosty model znakomicie się mapuje na większość dostępnych na rynku urządzeń.



Rysunek 1: Model urządzenia

1.3. Model wykonywania

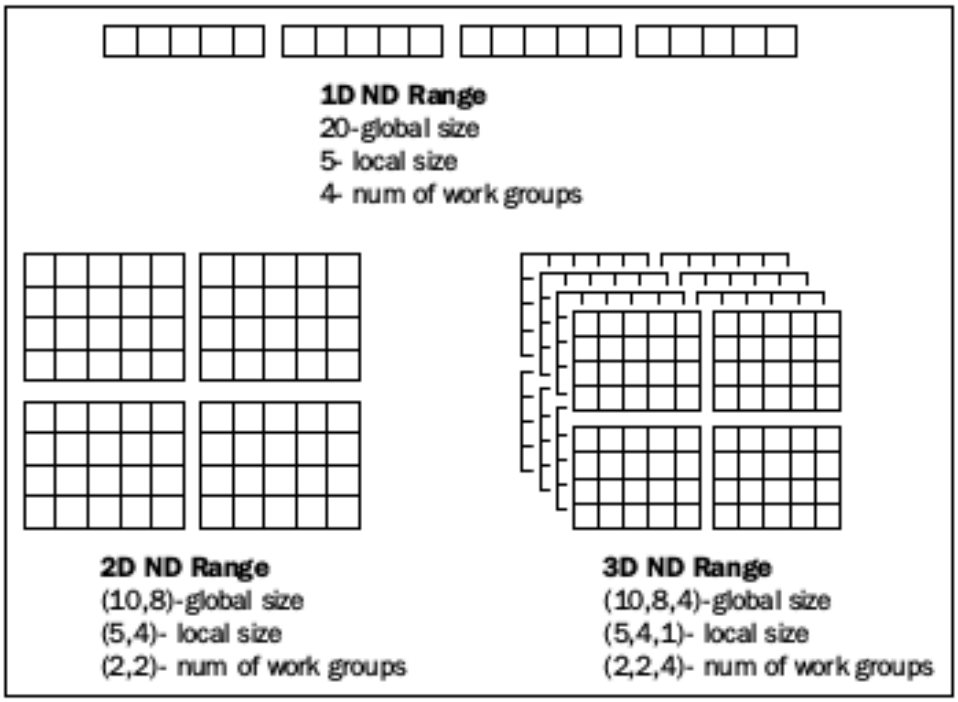
1.3.1. Zadania hosta

Kluczowymi częściami modelu wykonywania OpenCL są aplikacja kliencka (uruchamiana na hoście) oraz jądra (ang. kernels), które sąuruchamiane na docelowym urządzeniu wspierającym OpenCL. Głównymi zadaniami hosta są:

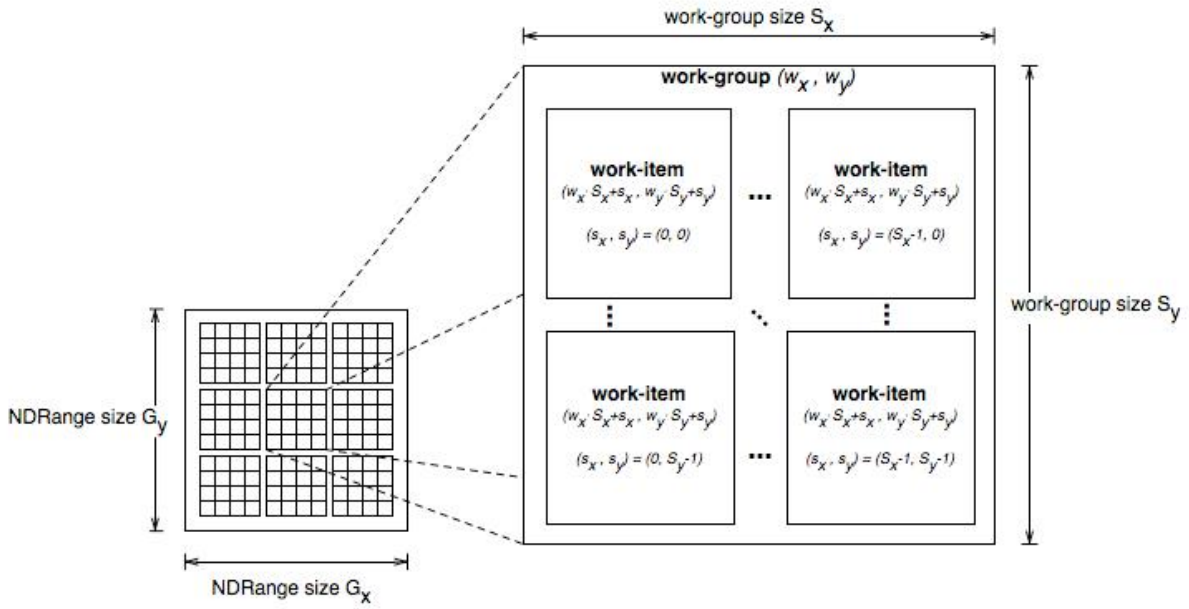
- komunikacja z urządzeniem OpenCL
- pytanie o dostępne zasoby i cechy urządzenia
- tworzenie kontekstu (ang. context) (składającego się m.in. z konkretnego urządzenia (na przykład GPU) na konkretnej platformie (na przykład AMD oraz kolejki wykonywania (and. command queue))
- budowanie jąder i zarządzanie ich uruchamianiem

1.3.2. Uruchamianie jąder

Uruchamianie jąder polega na wywołaniu odpowiedniej funkcji po stronie hosta, która kolejkuje jądro w kolejce wykonywania. Przy wywoływaniu funkcji należy wyspecyfikować jak pogrupowane w grupy robocze (ang. work group) będą jądra przy wykonywaniu, poprzez zdefiniowane N-wymiarowego zakresu (ang. NDRange), gdzie N jest nie mniejsze niż 1 i nie większe niż 3. Każdemy jądru przy instancjowaniu przypisane zostaje N indeksów. Instancja jądra jest nazywana elementem roboczym (ang. work item). Każda instancja jądra jest świadoma takich swoich parametrów jak globalny identyfikator, lokalny identyfikator czy identyfikator grupy lokalnej.



(a) NDRange - przykłady



(b) NDRange - numeracja

Rysunek 2: NDRange

1.3.3. Kontekst OpenCL

Kontekst definiuje całe środowisko środowisko OpenCL czyli urządzenie, obiekty programów, jądra, obiekty pamięciowe (ang. memory objects), kolejkę wykonywania etc. Może być powiązany z jednym lub wieloma urządzeniami, ale jądra może być kolejkowany tylko jeśli odpowiada mu ten sam kontekst co danej kolejce. Tworzenie kontekstu polega na odpytaniu systemu o dostępne instalacje OpenCL w celu uzyskania listy platform (odpowiadających często producentom urządzeń dostępnych w komputerze). Następnie na wybranej platformie inicjalizujemy OpenCL po czym przypisujemy urządzenia do kontekstu i tworzymy na urządzeniach kolejki wykonywania.

1.3.4. Kolejka wykonywania

Kolejka wykonywania jest obiektem na którym komendy OpenCL są kolejkowane w celu bycia wykonanym przez urządzenie. Mogą to być komendy, które kolejkują pewną ilość jąder, ale też komendy do odczytywania danych z urządzenia czy do synchronizacji poprzez zaczekanie na zakończenie wykonywania pewnych jąder.

1.4. Model pamięci

Model pamięci w OpenCL definiuje cztery rodzaje pamięci. Do każdego z nich elementy robocze mogą uzyskać dostęp podczas wykonywania jądra.

Pamięć globalna
Na każdym urządzeniu jest to najobszerniejszy rodzaj pamięci. Każdy element roboczy w każdej grupie roboczej ma dostęp do pamięci globalnej. Słowo kluczowe __global definiuje ten region. W porównaniu do pozostałych rodzajów pamięci dostęp do pamięci globalnej bywa kosztowny.

Pamięć stała
Jest to region pamięci w urządzeniu OpenCL, który jest inicjalizowany przez hosta i jest niezmienny przez cały czas wykonywania się jądra. Słowo kluczowe __constant definiuje ten region.

Pamięć lokalna
Każdy element roboczy w grupie roboczej może używać pamięci lokalnej. Pamięć ta jest widoczna tylko w ramach danej grupy roboczej więc zapisy do pamięci przez element roboczy nie będą widoczne w innych grupach roboczych niż jego własna. Wynika to z tego, że każdy element roboczy działa na pojedynczej jednostce obliczeniowej, na której jest przechowywana ta pamięć. Słowo kluczowe __local definiuje ten region.

Pamięć prywatna
Jest to domyślny rodzaj pamięci przy tworzeniu dowolnej lokalnej zmiennej w jądrze. Zmienne te nie są widoczne w żadnych innych elementach roboczych.

1.5. Model programowania

Aby umożliwić wieloplatformowość każde urządzenie wspierające OpenCL powinno być zgodne z standardem OpenCL C. Jest to język bazowany na standardzie C99 w składni. Posiada on duże ilości udogodnień w zakresie arytmetyki wektorowej i macierzowej jak również duże ilości wbudowanych funkcji matematycznych.

Przykładowe jądro napisane w OpenCL C wygląda nasępująco:

```
__kernel void example_kernel(,
        float f,
        __local float* l_Array,
        __global float* g_Array)
{
        int i = get_global_id(0);
        g_Array[i] = i;
}
```

Widać tu znaczne podobieństwo do klasycznego C. Słowo kluczowe __kernel oznacza, że funkcja jest jądrem, które może zostać uruchomione przez hosta. Słowa kluczowe __local i __global mówią nam o tym do jakiego rodzaju pamięci odwołują się zmienne l_Array i g_Array.

2. Struktura projektu

2.1. Wstęp

Poniższy słowny opis przedstawia główne cechy i decyzje architektoniczne, nie zagłębiając się w szczegóły dotyczące różnego rodzaju implementacji interfejsów, czy wszystkich klas wykorzystanych w projekcie. Z punkty widzenia dostarczenia funkcjonalności zgodnych z tematem pracy inżynierskiej, duża część napisanego kodu jest nieistotna. Kod ten stanowi pewnego rodzaju próbę włączenia implementacji SPH do projektu zbliżonego architektonicznie do przeciętnej gry komputerowej. Dokładny opis zastosowanej architektury, na której się wzorowaliśmy, można znaleźć w pozycji [2] z bibliografii. Różnice wynikają głównie z zastosowania innych bibliotek do osiągnięcia tych samych celów (WinAPI vs GLFW, OpenGL vs DirectX, Boost.Signals2 vs Fastdelegate etc.), oraz z tego, że w [2] opisany jest dużo bardziej złożony system niż ten zaimplementowany w naszej pracy inżynierskiej.

2.2. Kluczowe elementy stworzonego frameworku

2.2.1. Obsługa OpenGL i okna

Klasa OpenGLSystem zajmuje się inicjalizacją okna oraz dostarczaniem informacji na temat kontekstu OpenGL, które są niezbędne do poprawnej inicjalizacji urządzenia OpenCL. Istnieje bowiem możliwość, że system OpenCL zostałby zainicjalizowany na urządzeniu innym niż OpenGL przez co niemożliwa byłaby komunikacja z wykorzystaniem OpenCL
OpenGL interop.

Klasa Window oraz klasa InputManager stanowią wrapper na funkcjonalności biblioteki GLFW. Umożliwiają one inicjalizację okna oraz obsługę zdarzeń wywołanych przez użytkownika takich jak naciśnięcie klawisza czy ruch myszką.

2.2.2. Obsługa OpenCL

Klasa OpenCLSystem stanowi lekki wrapper na wszystkie konieczne funkcje OpenCL takie jak:

- Wykrywanie urządzenia, na którym jest zainicjalizowany OpenGL
- Tworzenie kontekstu OpenCL
- Czytanie i budowanie jąder OpenCL

W kodzie funkcjie OpenCL przeważnie są wywoływane bezpośrednio, jako że API OpenCL jest klasycznym API w języku C, które przechowuje wewnętrznie swój własny stan.

2.2.3. Obsługa zdarzeń

Klasa EventManager wraz z interfejsem IEventData oraz typem wyliczeniowym EventType stanowią trzon systemu zdarzeń w stworzonym frameworku. Ideą tego systemu jest to, że każda klasa może się zarejestrować na odbiór pewnego rodzaju eventów oraz sama wysłać event do systemu. Klasa EventManager jest przez to globalna dla całej aplikacji. W każdej klatce zdarzenia, które wystąpiły są wysyłane do opowiednich odbiorców.

Dzięki tej klasie osiągamy inwersję zależności (dependency inversion). Poszczególne obiekty systemu nie muszę wiedzieć o żadnych innych obiektach. Chcąc poinformować, że zaszło jakieś zdarzenie lub chcąc wysłać jakąś wiadomość do systemu jedyne co obiekty muszą posiadać to referencję do EventManager'a. To on zajmuje się dystrybucją wiadomości do zainteresowanych odbiorców.

2.2.4. Model actorów złożonych z komponentów

W każdej grze istnieje koncepja aktorów (zwanych czasami obiektami gry (and. game object)), które mogą wykonywać jakieś akcje w czasie, posiadają logikę rysowania, przechowują swój stan i położenie. Klasyczne podejście do budowy tego typu obiektów - wszystko w jednej klasie - łamie SRP (Single Responsibility Principle). Postanowiliśmy więc wykorzystać model zwany CBSE (Component-Based Software Engineering) do reprezentacji aktorów.

Każdy aktor składa się z wielu komponentów definujących takie rzeczy jak logikę, sposób rysowania, przemieszczenie w przestrzeni. Mogą też istnieć specyficzne komponenty takie jak komponent kamery. Jako, że każdy komponent zajmuje się swoją własną dziedziną nie jest łamane SRP i system staje się znacząco bardziej skalowalny.

Przykładem zastosowania tego modelu są klasy WaterLogicComponent, WaterModelComponent oraz WaterRenderComponent - każda z nich zajmuje się dostarczeniem jednej funkcjonalności. WaterLogiComponent zawiera logikę OpenCL, która porusza modelem płynu zdefiniowanym i zainicjalizowanym w WaterModelComponent. WaterRenderComponent natomiast

komunikuje się z WaterModelComponent w celu wyświetlenia modelu cieczy na ekranie. Łatwym byłoby stworzenie innego sposoby renderowania czy innego zachowania cieczy (co było wykonywane w pierwszych iteracjach) i polegałoby tylko na podmianie tych, raczej lekkich, komponentów.

2.2.5. Wykorzystanie C++11

Pisząc kod stosowaliśmy się do idiomu C++ RAII (Resource Acquisition Is Initialization). W całym kodzie słowo kluczowe "deleteńie występuje ponieważ wszystkie zmienne są inicjalizowane w taki sposób, aby kiedy nie są potrzebne same się usuwały. Wykorzystujemy do tego takie dodatki w C++11 jak shared_ptr, unique_ptr czy std::array zamist zwykłych wskaźników i wskaźników na tablice. Korzystamy też z nowowprowadzonych lambd oraz słowa kluczowego auto.

3. Sposób implementacji metody SPH

Nasza implementacja metody SPH składa się z 9 jąder i wykorzystujemy 10 globalnych buforów. Dodatkowo korzystamy z biblioteki clpp, która dostarcza nam optymalnych implementacji sortowań na kartę graficzną algorytmem Radix Sort.

3.1. Wyszukanie sąsiadów cel

Nazwa jądra
find_voxel_neighbours

Dane wejściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
lbf (left bottom front)	float4	1	Wierzchołek definiujący pudło obliczeniowe
rtb (right top back)	float4	1	Wierzchołek definiujący pudło obliczeniowe
h	float	1	Promień wygładzania

Dane wyjściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
voxel_neighbour_map	int	64 · ilość cel	Sąsiedzi dla każdej celi

Dane wywoływania

Ilość jąder	Ilość grup lokalnych	Ilość elementów w grupie lokalnej
Ilość cel	n/d	n/d

Opis

Każdą celę dzielimy na 8 równych części i dla każdej z tych części znajdujemy 8 sąsiadujących cel (w tym obecną). Informacja ta jest potrzebna przy wyszukiwaniu sąsiadów w późniejszej części algorytmu. Kluczowe jest w tym algorytmie uwzględnienie warunkówa brzegowych.

W naszej implementacji wykorzystaliśmy tzw. periodyczne warunki przegowe, które sprawiają że na brzegach wyszukiwanie sąsiadów jest zawijane na drugą stronę pudła obliczeniowego, kiedy za nie wyjdziemy.

3.2. Przypisanie cząstek do cel

Nazwa jądra
hash_particles

Dane wejściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
lbf (left bottom front)	float4	1	Wierzchołek definiujący pudło obliczeniowe
rtb (right top back)	float4	1	Wierzchołek definiujący pudło obliczeniowe
h	float	1	Promień wygładzania
position	float4	ilość cząstek	Pozycje cząstek

Dane wyjściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
voxel_particle	int2	ilość cząstek	Mapa zawierająca przypisania cząstek do cel

Dane wywoływania

Ilość jąder	Ilość grup lokalnych	Ilość elementów w grupie lokalnej
Ilość cząstek	n/d	n/d

Opis

Dla każdej cząstki obliczamy w jakiej celi się znajduje i tę informację zapisujemy s buforze voxel_particle,

3.3. Sortowanie cząstek

3.3.1. Biblioteka clpp

Dane wejściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
voxel_particle	int2	ilość cząstek	Mapa zawierająca przypisania cząstek do cel

Dane wyjściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
voxel_particle	int2	ilość cząstek	Mapa zawierająca posortowane po numerze celi przypisania cząstek do cel

Opis

Wykorzystaliśmy zewnętrzną bibliotekę clpp w celu posortowania danych znajdujących się w buforze voxel_particle po numerze celi (początkowo są posortowane po numerze cząstki).

3.3.2. Dodatkowe operacje po sortowaniu

Nazwa jądra

sort_post_pass

Dane wejściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
velocity	float4	ilość cząstek	Prędkości cząstek
position	float4	ilość cząstek	Pozycje cząstek

Dane wyjściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
sorted_velocity	float4	ilość cząstek	Prędkości cząstek posortowane jak voxel_particle
sorted_position	float4	ilość cząstek	Pozycje cząstek posortowane jak voxel_particle

Dane wywoływania

Ilość jąder	Ilość grup lokalnych	Ilość elementów w grupie lokalnej
Ilość cząstek	n/d	n/d

Opis

Po posortowaniu voxel_particle konieczne jest przepisanie buforu pozycji i buforu prędkości tak, aby były w tej samej kolejności co voxel_particle.

3.4. Indeksowanie cząstek

3.4.1. Funkcja indeksująca

Nazwa jądra

find_index

Dane wejściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
voxel_particle	int2	ilość cząstek	Mapa zawierająca przypisania cząstek do cel
particle_count	int	ilość cząstek	Ilość cząstek

Dane wyjściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
grid_cell_index	int	ilość cel	Indeksy początków danych dla każdej celi w tablicy voxel_particle

Dane wywoływania

Ilość jąder	Ilość grup lokalnych	Ilość elementów w grupie lokalnej
Ilość cel	n/d	n/d

Opis

W dalszej części algorytmu będziemy korzystać z informacji o początku danych dla danej celi w tablicach sorted_position, sorted_velocity i voxel_particle. Znajdujemy je więc w osobnym jądrze i zapisujemy do bufora grid_cell_index.

3.4.2. Dodatkowe operacje po indeksowaniu

Nazwa jądra

index_post_pass

Dane wejściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
grid_cell_index	int	ilość cel	Indeksy początków danych dla każdej celi w tablicy voxel_particle

Dane wyjściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
grid_cell_index	int	ilość cel	Indeksy początków danych dla każdej celi w tablicy voxel_particle

Dane wywoływania

Ilość jąder	Ilość grup lokalnych	Ilość elementów w grupie lokalnej
Ilość cel	n/d	n/d

Opis

Dla niektórych cel po kroku index nie zostaną znalezione poprawne wartości, w przypadku kiedy cela jest pusta. Jądro index_post_pass przepisuje informacje z kolejnej niepustej celi przez co mimo puste cele nie przeszkadzają w algorytmie w dalszych krokach.

3.5. Znajdowanie sąsiadów cząstek

Nazwa jądra

neighbour_map

Dane wejściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
voxel_particle	int2	ilość cząstek	Mapa zawierająca przypisania cząstek do cel
grid_cell_index	int	ilość cel	Indeksy początków danych dla każdej celi w tablicy voxel_particle
sorted_position	float4	ilość cząstek	Pozycje cząstek posortowane jak voxel_particle
voxel_neighbour_map	int	64 · ilość cel	Sąsiedzi dla każdej celi
neighbours_to_find	int	1	Ilość sąsiadów, którą chcemy znaleźć dla każdej cząstki
lbf (left bottom front)	float4	1	Wierzchołek definiujący pudło obliczeniowe
rtb (right top back)	float4	1	Wierzchołek definiujący pudło obliczeniowe
h	float	1	Promień wygładzania

Dane wyjściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
neighbour_map	int	neighbours_to_find · ilość cząstek	Mapa sąsiadów każdej cząstki

Dane wywoływania

Ilość jąder	Ilość grup lokalnych	Ilość elementów w grupie lokalnej
Ilość cząstek	n/d	n/d

Opis

Dla każdej cząstki wyszukujemy pewną, definiowaną w programie, ilość sąsiadów. Są to cząstki z którymi będziemy obliczać interakcje w następnych krokach.

3.6. Obliczenie gęstości i ciśnienia

Nazwa jądra

compute_density_pressure

Dane wejściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
sorted_position	float4	ilość cząstek	Pozycje cząstek posortowane jak voxel_particle
neighbour_map	int	neighbours_to_find · ilość cząstek	Mapa sąsiadów każdej cząstki
neighbours_to_find	int	1	Ilość sąsiadów, którą chcemy znaleźć dla każdej cząstki
m	float	1	Masa cząstki
h	float	1	Promień wygładzania
k	float	1	Stała przed nawiasem w równaniu stanu
ρ_0	float	1	Gęstość w stanie równowagi

Dane wyjściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
density_and_pressure	float2	ilość cząstek	Gęstość i ciśnienie dla każdej cząstki

Dane wywoływania

Ilość jąder	Ilość grup lokalnych	Ilość elementów w grupie lokalnej
Ilość cząstek	Ilość cząstek / ilość sąsiadów	Ilość sąsiadów

Opis

Dla każdej cząstki, korzystając z listy sąsiadów, wzoru na gęstość i równania stanu obliczamy gęstość a następnie ciśnienie.

3.7. Obliczanie przyspieszenia

Nazwa jądra

compute_acceleration

Dane wejściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
sorted_position	float4	ilość cząstek	Pozycje cząstek posortowane jak voxel_particle
sorted_velocity	float4	ilość cząstek	Prędkości cząstek posortowane jak voxel_particle
density_and_pressure	float2	ilość cząstek	Gęstość i ciśnienie dla każdej cząstki
neighbour_map	int	neighbours_to_find · ilość cząstek	Mapa sąsiadów każdej cząstki
g	float	1	Przyspieszenie grawitacyjne
m	float	1	Masa cząstki
h	float	1	Promień wygładzania

Dane wyjściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
acceleration	float4	ilość cząstek	Wektor przyspieszenia dla każdej cząstki

Dane wywoływania

Ilość jąder	Ilość grup lokalnych	Ilość elementów w grupie lokalnej
Ilość cząstek	Ilość cząstek / ilość sąsiadów	Ilość sąsiadów

Opis

Dla każdej cząstki obliczamy przyspieszenie korzystając z wzorów opisanych w dokumentacji użytkownika w sekcji 1.

3.8. Wykonanie kroku czasowego

Nazwa jądra

integrate

Dane wejściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
position	float4	ilość cząstek	Pozycje cząstek
velocity	float4	ilość cząstek	Prędkości cząstek
density_and_pressure	float2	ilość cząstek	Gęstość i ciśnienie dla każdej cząstki
delta_time	float	1	Czas, który minął od poprzedniej klatki symulacji
lbf (left bottom front)	float4	1	Wierzchołek definiujący pudło obliczeniowe
rtb (right top back)	float4	1	Wierzchołek definiujący pudło obliczeniowe

Dane wyjściowe

Nazwa	Typ	Rozmiar	Opis
velocity	float4	ilość cząstek	Prędkości cząstek - zmienione

Dane wywoływania

Ilość jąder	Ilość grup lokalnych	Ilość elementów w grupie lokalnej
Ilość cząstek	n/d	n/d

Opis

Zgodnie z policzonym w poprzednim kroku przyspieszeniem, obliczamy nową prędkość a następnie pozycję każdej z cząstek. Ważnym jest aby nie pozwolić cząstkom uciec z pudła obliczeniowego. Kiedy zachodzi taka sytuacja odbijamy cząstkę od ściany zmieniając jej wektor prędkości i pozycję.

3.9. Podsumowanie

Końcowy przebieg algorytmu wygląda następująco:

find_voxel_neighbours	Znalezienie sąsiadów dla każdej celi
hash_particles	Przypisanie cząstek do cel
clpp_sort	Posortowanie mapowania z czątki na celę aby zamieniło się w mapowanie celi na cząstkę
sort_post_pass	Przepisanie buforów position i velocity by były w kolejności posortowanej
find_index	Znalezienie indeksów w których zaczynają się informacje na temat danych cel
index_post_pass	Poprawa indeksów dla cel, które nie mają cząstek
neighbour_map	Znalezienie sąsiadów dla każdej cząstki
compute_density _pressure	Obliczenie gęstości i ciśnienia
compute_acceleration	Obliczenie przyspieszenia
integrate	Krok czasowy

Do implementacji zostały wykorzystane następujące globalne bufory:

position	float4[ilość cząstek]	Pozycje cząstek - bufor ten jest współdzielony z OpenGL i jest wykorzystywany do wizualizacji cząstek.
velocity	float4[ilość cząstek]	Prędkości cząstek
acceleration	float4[ilość cząstek]	Wektor przyspieszenia dla każdej cząstki
grid_cell_index	int[ilość cel]	Indeksy początków danych dla każdej celi w tablicy voxel_particle
voxel_particle	int2[ilość cząstek]	Mapa zawierająca przypisania cząstek do cel
sorted_position	float4[ilość cząstek]	Pozycje cząstek posortowane jak voxel_particle
sorted_velocity	float4[ilość cząstek]	Prędkości cząstek posortowane jak voxel_particle
density_and_pressure	float2[ilość cząstek]	Gęstość i ciśnienie dla każdej cząstki
neighbour_map	int[neighbours_to_find · ilość cząstek]	Mapa sąsiadów każdej cząstki
voxel_neighbour_map	int[64 · ilość cel]	Sąsiedzi dla każdej celi

4. Sposób implementacji wizualizacji metody SPH

Do implementacji wizualizacji metody SPH wykorzystaliśmy bibliotekę OpenGL. Zdecydowaliśmy się na nią ponieważ alternatywny DirectX nie działałby na systemach unixowych, a zależało nam, aby nasza aplikacja była możliwie wieloplatformowa.

4.1. Podejście naiwne

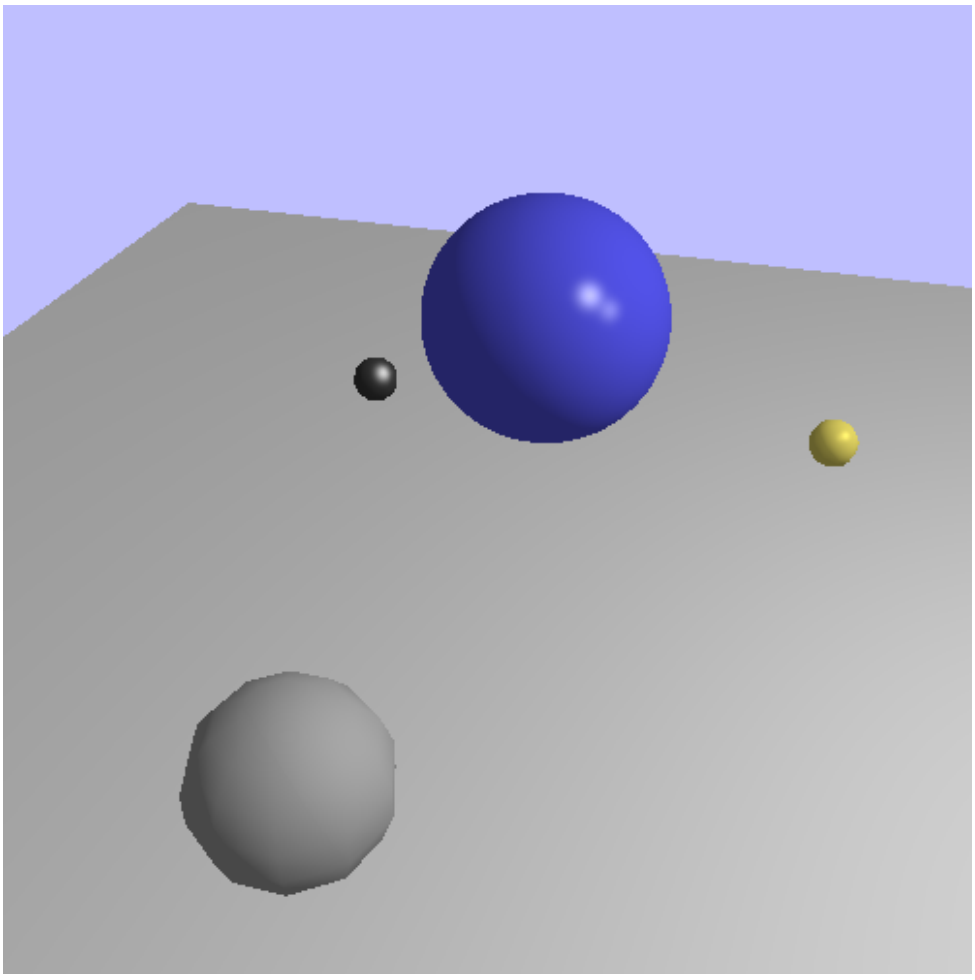
Początkowo, aby renderować ciecz, dla każdej cząstki rysowaliśmy sferę o ustalonym promieniu i środku w punkcie w którym znajdowała się cząstka. Przy małych ilościach cząstek dawało to zadowalające wyniki. Sfery, które rysowaliśmy bywały kanciaste, ale nie sprawiało to większych problemów i symulacja wyglądała zadowalająco.

Niestety kiedy przekroczyliśmy 1’000’000 cząstek w symulacji rysowanie sfer stało się głównym wąskim gardłem aplikacji ze względu na dużą ilość trójkątów. Jednym rozwiązaniem tego problemu byłoby zastosowanie algorytmu usuwania niewidocznych przestrzeni (ang. occlusion culling). Zdecydowaliśmy się na inne, prostsze w implementacji rozwiązanie.

4.2. Wykorzystanie bilboardów

Bilboardy to technika polegająca na wykorzystaniu cieniowania geometrycznego (ang. geometry shader) do wygenerowania w trakcie rysowania dodatkowych trójkątów. W naszym przypadku generowaliśmy prostokąt (2 trójkąty) zwrócony zawsze w kierunku kamery.

Następnie w trakcie cieniowania pikseli na tym bilboardzie rysowaliśmy koło. Porównanie efektów techniki naiwnej z techniką wykorzystania bilboardów można zobaczyć w rysunku 3



Rysunek 3: Sfera niebieska i czarna to tak naprawdę koła zwrócone w stronę kamery. Szara i żółta to sfery złożone z trójkątów w przestrzeni

Uzyskany efekt wygląda znakomicie i jako, że sfery składają się tylko z 2 trójkątów, rysowanie symulowanej cieczy przestało być problemem. [ref: http://www.arcsynthesis.org/gltut/illumination/tutorial

5. Opis wykorzystanych zewnętrznych bibliotek

[1]

OpenCL	Szeroki opis znajduje się w sekcji 1.
OpenGL	Jest to specyfikacja otwartego i uniwersalnego API do tworzenia grafiki. Ciekawym resultatem "uniwersalności"bibliotek typu OpenGL i OpenCL jest to, że de facto OpenCL i OpenGL same w sobie są jedynie specyfikacjami API a nie implementacjami. W gestii producentów leży implementacja danego API na dostarczane urządzenie.
CLPP	Jest to ogólnodostępna biblioteka do sortowania z wykorzystaniem OpenCL. Wykorzystaliśmy ją w projekcie ponieważ sortowanie było kluczowym elementem algorytmu, a clpp oferowało wysoce zoptymalizowaną, w stosunku do naszej, implementację radix sorta działająca na GPU.
GLFW	Jest to jedna z najlżejszych wieloplatformowych bibliotek do tworzenia i obsługi okien, dostępnych w C++. W naszym projekcie klasy Window i InputManager są wrapperami na funkcjonalności GLFW. Ma ona tę wadę, że nie umożliwia łatwego wyświetlania tekstu czy prostych obiektów geometrycznych w oknie tak jak konkurencyjne biblioteki SFML, SDL czy FreeGLUT. Niemniej jednak do celów naszej aplikacji była wystarczająca.
Boost.Signals2	Biblioteka boost jest przez wielu uważana za drugi standard C++, oczywiśćie po libstdc++. Boost.Signals2 udostępnia funkcjonalność sygnałów i slotów, zbliżoną na przykład do systemu eventów w językach takich jak C#. Została ona wykorzystana do stworzenia globalnego systemu zdarzeń, dzięki któremu trywialnym stało się pisanie mapowania działań użytkownika na funkcje wewnątrz programu.

Materiały źródłowe

[1] Clpp - opencl data parallel primitives library. https://code.google.com/p/clpp/.

[2] M. McShaffry and D. Graham. *Game Coding Complete*. Cengage Learning PTR, 2012.

[3] A. Munshi and B. Gaster. *OpenCL Programming Guide*. Addison-Wesley Professional, 2011.

[4] Smoothed particle hydrodynamics webinar by AMD. https://www.youtube.com/watch?v=SQPCXzqH610.