1.1 Wprowadzenie

Wiele dziedzin z zakresu akustyki, a w szczególnosci akustyka pomieszczen, wymaga analizy pola akustycznego. Zdefiniowanie pojecia czasu poglosu przez Wallace Clement Sabine'a i ustalenie empirycznego wzoru rozpoczęło erę akustyki architektonicznej i rozwój metod analizy pola akustycznego. Wzór Sabine'a [W.C. Sabine: Collected Papers on Acoustics. Harvard University Press, 1922.] oraz jego kolejne przeksztalcenia nie uwzglednialy wielu zjawisk akustycznych. Zarówno wzory empiryczne, jak i metody statystyczne, uwzglednialy jedynie niektóre parametry pola akustycznego i czesto wprowadzaly duzy blad w odniesieniu do rzeczywistych wartosci. Analityczne rozwiazanie równania falowego, lub wykorzystanie metody elementów skonczonych bylo zbyt kosztowne, lub niemozliwe. Jednymi z proszych metod analizy pola akustycznego byly metody geometryczne. W 19xx roku L. Cremer w publikacji „Geometrische Raumakustik” [2] przedstawia geometryczna interpretację fali akustycznej. Praca ukazuje mechanizm odbicia fali od powierzchni plaskiej i stanowi wprowadzenie do geometrycznych metod analizy pola.

Powstale metody numeryczne stosowane byly w wielu dziedzinach analizy pól wektorowych. Rozwój technologii komputerowej doprowadził do optymalizacji i opłacalnego wykorzystania tych metod. Poczatkowo, ze względu na małe zapotrzebowanie na adaptacje akustyczne, metody analizy pola akustycznego nie byly znacznie rozwijane. W tym czasie szybko rozwijajacą się dziedziną stała się grafika komputerowa. Próby wygenerowania realistycznych obrazów przy uzyciu technologii cyfrowych wymagaly zamodelowania zjawiska rozchodzenia sie swiatla. W 1968 Arhtur Appel w swojej publikacji [2] zamodelowal punktowe zródlo swiatla jako nieskonczony zbiór pólprostych, odbijajacych sie od powierzchni plaskich pod takim samym kątem jak kąt padania. Powyższa metoda promieniowa (ang. Ray Tracing) zaczęła być wykorzystywana do renderowania grafiki trójwymiarowej. Poprzez podobieństwo rozchodzenia się fali dźwiękowej do świetlnej, w publikacji "Journal of Sound and Vibration [...] przedstawiono wykorzystanie tej metody do obliczenia czasu pogłosu pomieszczenia. Metodę promieniową zauważono jako opłacalną i zaczęto ją modyfikować co doprowadziło do powstania kolejnych metod geometrycznych. Jedną z osób, które przyczyniły się do rozwoju metod geometrycznych był W. Straszewicz. W swojej pracy [4] wykorzystuje podstawy metody źródeł pozornych (ang. Image-Source). W 1979 J. Allen i D. Berkley implementują metodę źródeł pozornych przy użyciu technik cyfrowych [5]. Wysokie zapotrzebowanie na grafikę komputerową, rozwój gier komputerowych i niski koszt obliczeniowy doprowadził do rozwoju powyższych metod symulacji fali. Należy jednak pamiętać, że metody geometryczne często nie uwzględniają wielu zjawisk falowych, co wymusza uzupełnianie je o inne metody numeryczne.

1.2 Cel i zakres pracy

Celem pracy jest wykorzystanie heterogenicznych systemów obliczeniowych do implementacji metody źródeł pozornych z użyciem środowiska openCL. Metoda źródeł pozornych jest obecnie wykorzystywana w popularnych programach do symulacji akustycznych [6] [7]. W przypadku tych programów stanowi ona uzupełnienie innych metod i pozwala na wyznaczenie źródeł pozornych niskich rzędów. Jako niezależna metoda, przy niewydajnych obliczeniach, nie jest w stanie dokładnie odwzorować badanego środowiska akustycznego. Obliczenia przy użyciu tej metody dla źródeł pozornych wysokich rzędów są czasochłonne. Problem ten można rozwiązać zrównoleglając obliczenia przy użyciu kart graficznych. Początkowo wykorzystano ten pomysł w publikacji [[8] Z.-h. Fu and J.-w. Li, “GPU-based image method for room impulse response calculation,” Multimedia Tools and Applications, pp. 1–17, 2016.] która wykorzystuje wspierające karty graficzne NVIDIA środowisku CUDA. Kolejną implementacją metody źródeł pozornych w środowisku kart graficznych jest aplikacja Wayverb [ ... ] przeznaczona dla systemów typu macOS. Głównym założeniem poniższej pracy jest optymalizacja czasu obliczeń dla danej metody. Kolejnym założeniem jest implementacja tej metody w postaci otwartego kodu. W tym celu użyto środowiska OpenCL opartego na licencji open source []. Aplikacja została wykonana na systemy z rodziny Windows ze względu na popularność tego środowiska. Przy tych założeniach aplikacja może stanowić bazę do wykorzystania metody źródeł pozornych w innych aplikacjach. Implementacja jako dane wejściowe ma przyjmować współrzędne przestrzenne punktu źródła dźwięku i punktu odbioru, tablicę powierzchni odbijających wraz z ich współczynnikami pochłaniania dźwięku oraz rząd obliczanych źródeł pozornych. Dane wyjściowe zostaną uzyskane w postaci siatki źródeł pozornych wraz z informacją o ilości pochłoniętej podczas odbić energii dla każdego źródła pozornego.

2 Opis metody źródeł pozornych

2.1 Wprowadzenie

Metoda źródeł pozornych jest jedną z metod często wykorzystywanych w akustyce architektonicznej i cyfrowym przetwarzaniu sygnałów. Przy użyciu tej metody możemy wygenerować odpowiedź impulsową pomieszczenia, zbadać dyfuzyjność pola, prześledzić ścieżkę propagacji dźwięku. Ze względu na liczne uproszczenia, w metodzie jest uwzględniane wiele zjawisk falowych. W jej najprostszej implementacji pomijane są takie zjawiska jak dyfrakcja, interferencja czy rozproszenie fali. W wielu przypadkach, aby ta metoda była skuteczna, należy przeprowadzić złożone obliczenia, lub wykorzystać ją równolegle wraz z innymi metodami numerycznymi.

2.2 Główne założenia metody

W przypadku metod geometrycznych falę dźwiękową modelujemy jako prosty obiekt przestrzenny. W metodzie źródeł pozornych, punktowe źródło zastępujemy nieskończonym zbiorem półprostych. Każdy taki promień dźwiękowy reprezentuje pewną część składową fali i jej kierunek propagacji. Każda składowa odbija się od powierzchni zgodnie z prawem Snella, a przy odbiciu zostaje pochłonięta część jej energii proporcjonalna to współczynnika pochłaniania dźwięku dla danego materiału. Kolejnym założeniem jest, że powierzchnie odbijające są powierzchniami płaskimi, a w polu występują jedno punktowe źródło i jeden punkt odbioru. W przypadku większej ilości punktów obserwacji, lub większej ilości źródeł należałoby skorzystać z szerszych metod jakimi są metoda obrazów pozornych i metoda pozornych obrazów punktu obserwacji. Przy powyższych założeniach, każdą ścieżkę propagacji promienia dźwiękowego można zastąpić pozornym źródłem. Źródło pozorne dla danej składowej fali powstaje w wyniku odbicia lustrzanego punktu źródła względem powierzchni odbijającej tą składową. W przypadku większej ilości odbić, punkt źródła należy odbić lustrzanie względem każdej kolejnej powierzchni odbijającej. Zbiór wyznaczonych w ten sposób źródeł nazywamy siatką źródeł pozornych, która reprezentuje warunki akustyczne analizowanego pomieszczenia dla ściśle określonych punktów źródła i odbioru. Siatka źródeł pozornych może być podstawą do wyznaczenia echogramu i czasu pogłosu pomieszczenia. Ze względu na dużą złożoność obliczeniową metody, często uzyskiwane są wyniki, które nie wystarczają do analizy pola akustycznego. W tym wypadku stosuje się połączenie kilku metod numerycznych. [7] [8] [9] [10]

2.3 Wyznaczanie siatki źródeł pozornych

W celu wyznaczenia siatki źródeł pozornych N-tego rzędu zdefiniujmy punkt źródła dźwięku S, punkt odbioru oraz K-liczny zbiór powierzchni odbijających P. (rysunek z modelem pomieszczenia).

Rysowando

Do znalezienia wszystkich źródeł pozornych N-tego rzędu należy wygenerować wszystkie K^N wariacje z powtórzeniami zbioru P. Na wstępie możemy pominąć wariacje, w których ta sama powierzchnia jest przynajmniej dwoma kolejnymi elementami ciągu ponieważ promień dźwiękowy nie może dwukrotnie z rzędu odbić się od tej samej powierzchni. Każda wariacja reprezentuje jeden promień dźwiękowy, który odbija się kolejno od każdej powierzchni w wariacji. Aby znaleźć źródło pozorne dla danego promienia dźwiękowego należy odbić punkt źródła symetrycznie względem każdej z płaszczyzn w wariacji. (znów rysunek kilku odbić).

rysowando

Dla uzyskanego punktu należy zweryfikować czy promień dźwiękowy jest w stanie dotrzeć od punktu źródła do punktu odbiornika w danym układzie geometrycznym. W tym celu należy prześledzić ścieżkę promienia dźwiękowego wstecz – zaczynając od punktu obserwacji. Początkowy kierunek promienia znajduje się wyznaczając wektor rozpięty od punktu źródła pozornego do punktu obserwacji. Prosta przechodząca przez te punkty powinna przecinać ostatnią powierzchnie z wariacji, a kąt pomiędzy wektorem wyznaczającym kierunek ścieżki promienia dźwiękowego, a wektorem normalnym płaszczyzny, na której leży powierzchnia odbijająca powinien być mniejszy niż 90 stopni. Odcinek łączący punkt obserwacji z punktem przecięcia powyższej prostej z powierzchnią odbijającą stanowi fragment ścieżki promienia dźwiękowego. Kolejny kolejny fragment ścieżki promienia dźwiękowego wyznacza się odbijając symetrycznie poprzedni odcinek względem kolejnej powierzchni odbijającej. Z każdym krokiem należy sprawdzić czy odcinek ścieżki promienia dźwiękowego przecina płaszczyzny względem których się odbija. Jeśli uda się prześledzić ścieżkę promienia dźwiękowego od punktu obserwacji do punktu źródła można sprawdzany punkt uznać za źródło pozorne i uwzględnić w siatce źródeł pozornych.

2.4 Uwzględnienie współczynnika pochłaniania

W akustyce architektonicznej przy symulacji warunków akustycznych w pomieszczeniu istotne jest uwzględnienie współczynnika pochłaniania dźwięku. (wzór 1)

Wzór 1

Definiując dla każdej powierzchni odbijającej współczynnik pochłaniania alpha\_i, gdzie i jest indeksem powierzchni, możemy dla każdej z nich wyznaczyć współczynnik odbicia R\_i. Mnożąc przez siebie współczynniki odbić fali dla kolejnych powierzchni i dzieląc przez energię źródła otrzymujemy energię źródła pozornego odpowiadającego odbiciom od powyższych powierzchni (wzór 2)

Wzór 2

2.5 Przykładowe użycie metody

Przyjmując prostopadłościenne pomieszczenie z umieszczonym punktowym źródłem dźwięku i punktem obserwacji (rysunek x ) wyznaczamy siatkę źródeł pozornych ( rysunek y). Dla przejrzystości rysunku siatka została wyznaczona dla maksymalnie trzeciego odbicia.

Rysunek x

Rysunek y

Położenia źródeł pozornych w siatce daje informację o kierunkach promieni dźwiękowych dochodzących do punktu obserwacji. Uwzględniając straty energii pochłoniętej przez odbicia oraz starty energii związanej z rozchodzeniem się fali kulistej możemy wyznaczyć ilość energii i czas w jakim dotrze ona do punktu obserwacji dla każdego źródła pozornego. Zależność energii dochodzącej do punktu odbioru od czasu przedstawiona jest na poniższym echogramie ( echogram).

Echogram

Uzyskany echogram, lub jego część mogą być użyte do obliczenia wskaźników C50, C80, D50. Poprzez całkowanie wsteczne echogramu można uzyskać krzywą zaniku energii dźwięku w pomieszczeniu (rysunek milion).

Rysunek milion

Na jej podstawie można wyznaczyć czas pogłosu pomieszczenia. W porównaniu do metody źródeł pozornych, w metodzie promieniowej, ze względu na mniejszą złożoność obliczeń, uzyskuje się dłuższe echogramy. Zaletą metody źródeł pozornych jest uzyskiwanie dokładnych ścieżek promieni dźwiękowych, a nie jak w przypadku metody promieniowej, ścieżek trafiających jedynie w okolice punktu obserwacji. Ze względu na zalety obu tych metod często stosuje się je w połączeniu [coś tam].

3. Przetwarzanie heterogeniczne

3.1 Wprowadzenie

Lata 50-te XX wieku były przełomowym okresem w dziedzinie elektronicznego przetwarzania danych. Opracowana w 1945 roku Architekura von Neumana […] pozwoliła na uruchomienie pierwszych komputerów ogólnego przeznaczenia. Mimo, że Architektura Harwardzka […] została opracowana 6 lat wcześniej, Architektura von Neumana była łatwiejsza w implementacji przez przechowywanie danych wraz z programem na jednej wspólnej pamięci. Pierwszym komputerem opartym na pomyśle Neumana, który wykonywał instrukcje zapisane w fizycznej pamięci był powstały w 1948 roku Small-Scale Experimental Machine. Był on bazą do rozwijania kolejnych urządzeń i tak w 1949 roku powstał EDSAC (akronim od ang. Electronic Delay Storage Automatic Calculator). Był to pierwszy komputer wykorzystywany w praktyce do obliczeń naukowych. EDSAC rozbudowany był o dodatkowe układy peryferyjne. W celu odczytu danych zastosowano w nim dalekopis – aparat drukujący dane w postaci alfanumerycznej. Skonstruowanie komputerów zerowej, pierwszej i drugiej generacji znacznie rozwinęło moc obliczeniową tych urządzeń. W dalszym ciągu jednak stosowano niewygodne formy prezentacji danych – wyświetlacze złożone z szeregu lamp, perforowane karty. W 1975 roku w jednym z pierwszych komputerów osobistych IBM 5100 zastosowano kineskopowy wyświetlacz, który mógł wyświetlać 16 linii po 64 znaków. 6 lat później w kolejnym modelu IBM 5150 wprowadzono możliwość instalacji kart rozszerzeń ISA. Zastosowano w nim pierwszą kartę graficzną Monochrome Display Adapter (MDA). Rozpoczęło to rozwój peryferyjnych układów komputera, które stały się niezależnymi platformami z własnym procesorem i pamięcią. Początkowo karty graficzne były w stanie wyświetlać jedynie znaki alfanumeryczne przechowywane w pamięci karty. Kolejne generacje kart pozwalały na rysowanie obrazów przy użyciu pojedynczych pikseli, a nowoczesne układy graficzne pozwalały na akcelerację 2D i 3D korzystając z wbudowanych funkcji do generowania obrazu. W najnowszych procesorach grafiki umożliwiono użytkownikowi zaprogramowanie je w dowolny sposób. Charakterystyka obliczeń przy przetwarzaniu obrazów wymusiła architekturę procesorów graficznych w postaci dużej ilości jednakowych jednostek ALU (ang. Arithmetic Logic Units), potrafiących wykonać równolegle wiele prostych operacji.

Rysuneczek architektury GPGPU

Taka budowa kart graficznych pozwoliła na wykorzystanie ich nie tylko do obliczeń związanych z generowaniem grafiki ale także innych obliczeń przetwarzania danych co doprowadziło do powstania kart ogólnego przeznaczenia (GPGPU).

3.2 Heterogeniczne platformy obliczeniowe

Początkowo GPGPU były wykorzystywane do zaawansowanego generowania grafiki. Dążenie do realizmu w grach komputerowych rozwinęło karty graficzne o algorytmy wymagające przetwarzania równoległego, takie jak shading [Rost, Randi J. OpenGL Shading Language. Addison-Wesley Professional. ISBN 0-321-19789-5.] czy ray-tracing [Appel A. (1968) Some techniques for shading machine renderings of solids. AFIPS Conference Proc. 32 pp.37-45]. W celu odciążenia procesora od złożonych obliczeń, na kartach graficznych zaczęto implementować fizykę obiektów – obliczenia związane z mechaniką klasyczną, symulacje zachowania cieczy, zachowania układów ciągłych i inne efekty cząsteczkowe. Dla ułatwienia programistom wykorzystania możliwości GPGPU, NVIDIA w 2007 roku wprowadza platformę CUDA. Jest to środowisko programistyczne i biblioteka umożliwiająca wykorzystanie kart graficznych produkowanych przez firmę NVIDIA. Umożliwia ona pisanie kodu opartego na C/C++ wykonywanego na procesorze karty i mającego bezpośredni dostęp do jej pamięci. Ułatwienie implementacji algorytmów na GPGPU rozwinęło wykorzystywanie tych kart w różnych dziedzinach naukowych – kryptografii, fizyki kwantowej, ekonomii, medycynie. Wykonywanie skomplikowanych obliczeń przy użyciu CUDA stało się powszechne na komputerach domowych, ale było ograniczone przez wymagania sprzętowe. 2 lata po wprowadzeniu CUDA firma Apple Inc wprowadza OpenCL (ang. Open Computing Language). W przeciwieństwie do produktu NVIDA, OpenCL umożliwia pisanie programów na heterogeniczne platformy – układy złożone z różnego rodzaju procesorów. Daje to możliwość pisania aplikacji na komputery z układami większości popularnych producentów, lub dowolne układy złożone z różnych procesorów (m. in. CPU, GPU, DSP, FPGA), oraz zapewnia przenośność programów.

3.3 Środowisko OpenCL

OpenCL jest platformą programistyczną opracowaną w 2009 roku przez Apple Inc, a następnie utrzymywaną przez Khronos Group. Umożliwia programowanie heterogenicznych układów procesorowych w języku opartym na C99 i C++11.

Aplikacja pisana w OpenCL opiera się na jednostkach zwanych platformami. Każda platforma odpowiada za przygotowanie danych do obliczeń i rozdzieleniem zadań. W nowszych standardach kod platformy może być pisany w wielu popularnych jezykach (m. in. Python, Matlab). Każda platforma zawiera kontekst, w którym definiowane są dane wejściowe, kolejka zadań i urządzenia do wykonywania obliczeń. Każde urządzenie zawiera jednostki obliczeniowe (ang. compute units, CU), które składają się z elementów przetwarzania (ang. processing elements, PEs).

Rysunek z architekturą programu OpenCL

Elementy przetwarzania wykonują specjalnie przygotowane funkcje (tzw. kernele) definiowane według standardu OpenCL. W zależności od urządzenia (karta graficzna, procesor itp.), CU i PE reprezentują różne elementy procesora, ale odwołuje się do nich w ten sam sposób. Umożliwia to wykonywanie kernela o jednakowej składni na różnych typach procesorów. Kernele wykonywane są według kolejki zadań i rozdzielone pomiędzy jednostki obliczeniowe mogą być wykonywane równolegle na wielu elementach przetwarzania. Każda kolejka zadań definiuje przestrzeń indeksowania, w której wykonywane są poszczególne kernele. Instancje kernela wywołaną w obrębie jednego indeksu nazywamy wątkiem. Przestrzeń indeksów można podzielić na grupy (ang. work-group), do których należą poszczególne wątki.

OpenCL umożliwia dynamiczny dostęp do pamięci urządzeń. Zdefiniowane są cztery typy pamięci:  
- pamięć globalna – pamięć dostępną przez wszystkie wątki w obrębie jednego kontekstu  
- pamięć stałą – pamięć tylko do odczytu, dostępna globalnie  
- pamięć lokalną – pamięć dostępna w obrębie jednej grupy wątków  
- pamięć prywatną – pamięć dostępna w obrębie jednego wątku  
Przepływ danych między platformą, a urządzeniem może odbyć się poprzez operację kopiowania, lub odwzorowania z pamięci platformy do pamięci urządzenia.

Dużym ograniczeniem wydajności obliczeń jest czas dostępu do pamięci. Pamięć o szerszym dostępie ma wolniejszy czas dostępu, dlatego dla przyspieszenia obliczeń należy wykonywać równolegle obliczenia niezależne od siebie, wykorzystujące pamięć lokalną.