

dr hab. inż. Radosław Mantiuk, prof. ZUT
Wydział Informatyki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

Recenzja rozprawy doktorskiej wykonana dla Rady Naukowej Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej

Tytuł rozprawy:

Zaawansowane algorytmy proceduralnej generacji geometrii na karcie graficznej na potrzeby wizualizacji pól wektorowych

Autor rozprawy:

Mgr inż. Piotr Nowakowski

1. Jakie zagadnienie naukowe jest rozpatrzone w pracy (teza rozprawy) i czy zostało ono dostatecznie jasno sformułowane przez autora? Jaki charakter ma rozprawa (teoretyczny, doświadczalny, inny)?

Tematem rozprawy jest zagadnienie wizualizacji trójwymiarowych pól wektorowych, tzn. pól, w których do każdego punktu przestrzeni trójwymiarowej przypisany jest wektor danych. Wizualizacja takich pól w czasie rzeczywistym dla przypadków gęstego próbkowania dużych przestrzeni wymaga znacznych mocy obliczeniowych komputera. Autor rozprawy proponuje rozwiązać ten problem poprzez wykonywanie wizualizacji z efektywnym wykorzystaniem procesora GPU na karcie graficznej. W ramach pracy prezentowana jest szczegółowa analiza możliwości oferowanych przez współczesne systemy graficzne, które mogą zostać wykorzystane do reprezentacji danych pól wektorowych oraz do proceduralnego wspomaganie procesu wizualizacji.

Autor rozprawy motywuje zajęcie się opisywanym problemem potrzebą usprawnienia wizualizacji pola magnetycznego detektora ALICE będącego elementem akceleratorów cząstek w CERN. Doktorant brał czynny udział w pracach związanych z działaniem detektora, w szczególności jest współautorem oprogramowania O2 służącego do analizy danych uzyskiwanych z akceleratora.

W pracy nie znalazłem jednoznacznie zdefiniowanej tezy badawczej. Wymienione zostały natomiast cele rozprawy:

- Opracowanie i implementacja przechowywania oraz ewaluacji danych o polu wektorowym na karcie graficznej.
- Opracowanie i implementacja metody propagacji trajektorii cząstek na karcie graficznej.
- Opracowanie i implementacja algorytmów wizualizacji pól wektorowych z wykorzystaniem potoku shaderów siatki.
- Integracja wizualizacji pola magnetycznego z oprogramowaniem ALICE O2.

Określone przez Autora cele mają charakter implementacyjny, jednak do wykonania implementacji w każdym przypadku wymagana była analiza rozwiązań technicznych dostarczanych przez system graficzny oraz dostosowanie algorytmów do specyficznej implementacji na wspomnianym systemie. Dlatego uważam, że opisywane w pracy rozwiązania mają charakter naukowy oraz będą służyć do rozwiązywania problemów naukowych jako element oprogramowania O2.

Rozprawa ma charakter analityczno-eksperymentalny, ponieważ jej Autor musiał dostosować reprezentację modelu pola magnetycznego detektora do możliwości analizy i wizualizacji tego modelu w systemie graficznym. Następnie wykonał szereg implementacji potwierdzając w eksperymentach ich skuteczność. Poszczególne rozwiązania poddane zostały analizie pod kątem dokładności i szybkości obliczeń.

2. Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł / w tym literatury światowej, stanu wiedzy i zastosowań w przemyśle / świadczący o dostatecznej wiedzy autora. Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

W rozprawie prezentowany jest przegląd literatury na temat wizualizacji pól wektorowych, a dokładniej na temat wizualizacji przepływów (ang. *flow visualization*) (Rozdz. 4). Autor dzieli techniki na bezpośrednie, oparte o teksturę, oparte o własności pola oraz geometryczne. Analizuje dodatnie i ujemne cechy każdej z tych metod umiejscawiają proponowane w pracy techniki w metodach geometrycznych. Jednoznaczne stwierdzenie, że cytowane zostały wszystkie najważniejsze artykuły z tej dziedziny, wymagałoby od recenzenta bezpośredniego zajmowania się tematyką wizualizacji przepływów. Jednak sposób przedstawienia przeglądu literatury świadczą o dostatecznej znajomości tej tematyki przez Autora. O ile samo zagadnienie wizualizacji przepływów nie jest bezpośrednio tematyką najnowszych artykułów, to w literaturze pojawiają się przykłady wykorzystania wizualizacji do konkretnych rozwiązań co świadczy o aktualności tego tematu.

3. Czy autor rozwiązał postawione zagadnienia, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Głównymi osiągnięciami prezentowanymi w rozprawie są: znalezienie efektywnego sposobu reprezentacji na karcie graficznej danych modelu pola magnetycznego detektora ALICE (Rozdz.5), opracowanie i implementacja techniki wizualizacji ruchu cząstek w polu magnetycznym (Rozdz.6) oraz opracowanie i implementacja techniki wizualizacji pola wektorowego (w tym pola magnetycznego detektora) (Rozdz.7).

Model pola magnetycznego detektora ALICE zakłada podział przestrzeni detektora na niejednorodne podprzestrzenie. W każdym z tych obszarów wartość pola aproksymowana jest za pomocą wielomianów Czebyszewa o indywidualnych parametrach. Wizualizacja pola w danym punkcie w przestrzeni wymaga wyszukania podprzestrzeni i wykonania obliczeń charakterystycznych dla tej podprzestrzeni. Problemem jest duży rozmiar danych, a co za tym idzie znaczne nakłady obliczeniowe na przeszukiwanie tej złożonej struktury danych.

W rozprawie testowane są trzy techniki reprezentacji danych o polu: z użyciem *Shader Storage Buffer Object (SSBO)*, z użyciem tekstury 3D (w tym tekstury rzadkiej) reprezentujących dyskretne wartości pola oraz z wykorzystaniem shadera przeszukującego strukturę modelu pola i obliczającego wartości pola na podstawie skojarzonych z daną podprzestrzenią współczynników wielomianu. Autor zaprezentował błędy dokładności wyznaczania wartości pola magnetycznego każdej z technik wynikające, w przypadku dwóch pierwszych technik, z dyskretyzacji danych wejściowych, natomiast w przypadku ostatnie najprawdopodobniej z mniejszej precyzji obliczania wielomianów w shaderze. Przeanalizowany został również czas obliczania wartości pola magnetycznego wykazujący wzrost logarytmiczny wraz z liczbą obliczanych punktów. W przypadku obliczania pola w porównywanym oprogramowaniu O2 wspomniany wzrost czasu obliczeń jest znacząco większy.

Proszę o odniesienie się w czasie obrony do poniższych kwestii:

- W rozprawie nie mogłem znaleźć informacji na temat czasu potrzebnego na transfer danych do pamięci karty. Zestawienie tego czasu z przyspieszeniem obliczeń uzyskiwanym na karcie pozwoliłoby na określenie od jakiej liczby próbek proponowane rozwiązania są szybsze od oryginalnej implementacji na CPU.
- Autor stosuje pomiary czasu oparte na zegarze systemowym CPU co ma uzasadnienie w przypadku porównywania implementacji O2 z implementacjami na karcie. Dokładniejsza byłaby jednak analiza wykonana na GPU (np. za pomocą narzędzia *NVIDIA Nsight*). Moim zdaniem szczególnie istotna jest liczba i struktura odwołań do pamięci w czasie wykonywania algorytmów na karcie. Proszę o wykazanie co jest powodem różnic w czasach obliczania pola w trzech opisywanych technikach (SSBO, tekstury i implementacja przeszukiwania w shaderze). W jakim stopniu na te różnice wpływa stopień zrównoleglenia, liczba cykli wykonywania wątku i liczba dostępow do pamięci? Jaka jest struktura odwołań do pamięci podręcznej?

Drugim osiągnięciem jest opracowanie i implementacja wizualizacji toru ruchu cząstek w polu magnetycznym detektora z wykorzystaniem shadera geometrii. Obliczenie trajektorii ruchu cząstki polega na zastosowaniu modelu analitycznego, w którym oprócz położenia i parametrów cząstki potrzebna jest również informacja o parametrach pola magnetycznego. Autor wykazał, że przygotowana przez niego implementacja oblicza trajektorie 7000 cząstek w czasie kilkunastu milisekund, tzn. wizualizacja tych torów może odbywać się w czasie rzeczywistym. Nie do końca jasna jest dla mnie ocena jakościowa polegająca na porównywaniu dokładności obliczania torów cząstek. Wykazywane są znaczące różnice w trajektorii.

Proszę o odniesienie się w czasie obrony do poniższych kwestii:

- Z jakimi wartościami porównywane są trajektorie ruchu obliczane dla SSBO, tekstur i obliczeń w GLSL (Tab.6.1). Czy wartości referencyjne, tzn. obliczane przez oprogramowanie O2 liczone są tylko dla stałego pola magnetycznego?
- Wartościowa byłaby analiza różnic w czasie obliczeń pomiędzy technikami z SSBO, teksturą i obliczaniem pola magnetycznego w shaderze. Z czego wynikają te różnice prezentowane na Rys.6.1 dla procesora RTX2080Ti? Proponuję wykazać różnicę wykorzystując oprogramowanie Nsight.

Kolejne osiągnięcie prezentowane w rozprawie to opracowanie i implementacja wizualizacji pól wektorowych za pomocą za pomocą shaderów siatki. Autor szczegółowo opisuje implementację opartą na generowaniu linii, „wstążek” (ang. *stripes*), „tub” (ang. *pipes*) oraz podziale powierzchni. Prezentowane wyniki wydajnościowe wykazują bardzo dużą szybkość rysowania pola nawet dla wizualizacji, granicznego zdaniem Autora dla czytelności obrazu, 10000 elementów.

Proszę o odniesienie się w czasie obrony do poniższych kwestii:

- Dlaczego testy wydajnościowe ograniczone zostały do 10000 elementów graficznych? Czy sensowne byłoby zwiększenie tej liczby dla wyświetlacza o większej rozdzielczości?
- Jakie elementy implementacji poszczególnych rozwiązań mają największy wpływ na czas obliczeń?

Doktorant wykazał, że wykorzystanie technologii oferowanych przez współczesne karty graficzne pozwala na wizualizację złożonych trójwymiarowych pól wektorowych w czasie rzeczywistym. Przeanalizował, zaimplementował i zastosował odpowiednie techniki reprezentacji danych pola oraz jego wizualizacji. Większa uwaga mogłaby zostać zwrócona na szczegółową analizę wpływu sposobu implementacji na szybkość wizualizacji.

4. Na czym polega oryginalność rozprawy, co stanowi samodzielny i oryginalny dorobek autora, jaka jest pozycja rozprawy w stosunku do stanu wiedzy czy poziomu techniki reprezentowanych przez literaturę światową?

Oryginalnym rozwiązaniem Doktoranta jest skuteczne dostosowanie algorytmu obliczającego model pola magnetycznego detektora ALICE do wielowątkowej architektury procesora graficznego. Warta uwagi jest również praca związana z wizualizacją pola wektorowego za pomocą podziału powierzchni.

5. Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników / zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy/?

Zwięzłe, ale interesująco napisany jest Rozdz. 2 pracy omawiający budowę akceleratora cząstek oraz detektor ALICE. W rozdziale tym klarownie opisany został model pola magnetycznego detektora oraz analityczny sposób rekonstrukcji trajektorii cząstek. Rozdz. 3 w sposób wystarczający wprowadza pojęcia związane z generowaniem geometrii na karcie graficznej.

Główne rozdziały pracy (Rozdz. 5, 6 i 7) nie są łatwe do czytania ze względu na przyjęty sposób

prezentacji implementacji algorytmów oraz wyników ich działania. Moim zdaniem w każdym z tych rozdziałów brakuje wprowadzenia wyjaśniającego istotę działania algorytmów. Kluczowe informacje na temat wykonanych przez Autora prac przeplatane są dużą liczbą szczegółowych danych rozmywających opisywane zagadnienia. Autor opiera opis rozwiązań na załączonych kodach źródłowych shaderów nie dodając jednak komentarzy do operacji wykonywanych w określonych liniach oraz nie odwołując się w tekście pracy do poszczególnych fragmentów kodów. Opis rezultatów powiela liczbowe informacje prezentowane w tabelach i na wykresach, często nie przedstawiając interpretacji wyników.

Autor stosuje własne tłumaczenia angielskich określeń nie podając ich oryginalnego brzmienia (np. wstażki, tuby, itp.). Natrafiłem na kilka określeń spolszczających angielskie nazwy pomimo istnienia ich polskich odpowiedników („konwolucyjny”, „przekalkuluje”, „procesujące”, itp.).

Sposób prezentacji wyników pomimo trudnej formy nie był przeszkodą w zrozumieniu istoty pracy oraz opisywanych w niej rozwiązań.

6. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Elementy badawcze rozprawy koncentrują się na analizie wydajności programowalnych układów graficznych w kontekście przetwarzania dużych zbiorów danych. Podstawą takiej analizy jest porównanie liczby dostępow do pamięci przy jednoczesnym pomiarze stopnia zrównoleglenia i liczby cykli procesora wymaganych przez pojedynczy wątek. Taka analiza pozwala na oszacowanie skuteczności algorytmów niezależnie od konkretnej platformy sprzętowej, na której mają być wykonywane. Autor mógł wykonać taką szczegółową analizę wykorzystania zasobów karty graficznej dla przypadku wizualizacji pola magnetycznego ALICE. Model wspomnianego pola jest interesującym przykładem pola wektorowego o strukturze łączącej dyskretny charakter danych podzielonych na podprzestrzenie z analitycznym obliczaniem ostatecznych wartości za pomocą wielomianów Czebyszewa. W mojej ocenie analiza oparta na pomiarze całkowitego czasu działania algorytmu, pomimo swoich niewątpliwych zalet praktycznych, nie daje pełnego obrazu cech prezentowanych w pracy wariantów rozwiązań.

Ciekawym tematem jest wizualizacja pól wektorowych za pomocą podziału powierzchni. Niestety autor nie rozwinął tego tematu pod kątem oceny skuteczności takiej wizualizacji w rozumieniu analizy danych z detektora. Wspomniany wątek wzmocniłby stronę badawczą rozprawy.

7. Jaka jest przydatność rozprawy do nauk technicznych?

Ważnym rezultatem rozprawy jest implementacja i wdrożenie oprogramowania do wizualizacji pól wektorowych. Wspomniane oprogramowania stało się częścią oprogramowania O2 wykorzystywanego do analizy danych z detektora ALICE akceleratora cząstek w CERN.

8. Do której z następujących kategorii Recenzent zalicza rozprawę:

a/ nie spełniająca wymagań stawianych rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy

b/ wymagająca wprowadzenia poprawek i ponownego recenzowania

c/ spełniająca wymagania

d/ spełniająca wymagania z wyraźnym nadmiarem

e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

Stwierdzam, że Autor wniósł istotny wkład do dyscypliny naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja w zakresie rozwoju algorytmów wizualizacji komputerowej złożonych pól wektorowych.

Uważam, że przedłożona do recenzji rozprawa spełnia wymagania Ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym z 14 marca 2003 roku, Dziennik Ustaw Nr 65, poz. 595 (z późniejszymi zmianami) i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

Radosław Narkiewicz