



dr hab. inż. Adam Wojciechowski, prof. uczelni
Instytut Informatyki
Wydział Fizyki Technicznej, Informatyki i Matematyki Stosowanej
Politechnika Łódzka
Al. Politechniki 8, 93-590 Łódź

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

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

Autor rozprawy: mgr inż. Piotr Nowakowski

Promotor rozprawy: prof. dr hab. inż. Przemysław Rokita

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

Pan mgr inż. Piotr Nowakowski w ramach rozprawy doktorskiej poruszył problem efektywnej wizualizacji pól wektorowych bazując na architekturze współczesnych kart graficznych dla wybranych form geometrycznej reprezentacji danych. W szczególności poruszył aspekty wizualizacji pola magnetycznego detektora ALICE w Wielkim Zderzaczu Hadronów ośrodka naukowo-badawczego CERN. W tym kontekście Doktorant określił precyzyjnie cele pracy obejmujące:

- opracowanie oraz implementację skutecznej metody przechowywania oraz ewaluacji danych o polu wektorowym na karcie graficznej;
- opracowanie oraz implementację metody propagacji trajektorii cząstek na karcie graficznej;
- opracowanie oraz implementację algorytmów wizualizacji pól wektorowych z wykorzystaniem potoku *shaderów* siatki (ang. *mesh shader*);
- integracja wizualizacji pola magnetycznego z oprogramowaniem ALICE O².

Cele badań, postawione w rozprawie doktorskiej, zostały sformułowane w sposób jasny i zrozumiały. Podniesione problemy są ważne i aktualne oraz nowatorskie w dziedzinie problemu, gdyż odwołują się do bardzo współczesnych i dynamicznie zmieniających się funkcjonalności programowalnego potoku renderingu dostępnych na współczesnych kartach graficznych. Tym samym same cele zostały ujęte prawidłowo i konsekwentnie wypełniają oczekiwania środowiska naukowego zajmującego się interaktywną wizualizacją złożonych pól wektorowych. Są ambitne oraz zgodne z aktualnymi wyzwaniami w dziedzinie nauk inżynierjno-technicznych, w dyscyplinie Informatyka Techniczna i Telekomunikacja.

Czy w rozprawie przeprowadzono w sposób właściwy analizę źródeł (w tym literatury światowej i stanu zagadnień w przemyśle) świadczący o dostatecznej wiedzy autora? Czy wnioski z przeglądu źródeł sformułowano w sposób jasny i przekonujący?

Rozprawa doktorska, ze względu na technologiczne uwarunkowanie badań, ma w naturalny sposób ograniczony zbiór konkurencyjnych rozwiązań referencyjnych. Pomimo faktu, że wizualizacja pól wektorowych stanowi przedmiot badań w wielu obszarach nauki i techniki to interaktywna oraz

efektywna wizualizacja dużych zbiorów danych, opisujących pola wektorowe, stanowi wciąż wyzwanie dla świata nauki. Tylko nieliczne pakiety oprogramowania, stosując różne uproszczenia, są w stanie spełniać w ograniczonym zakresie oczekiwania naukowców. Problem niemniej jednak jest ważny i aktualny.

Doktorant rozpoczął część przeglądową od opisanego środowiska detektorów Wielkiego Zderzacza Hadronów, zjawisk towarzyszących fizyce wysokich energii oraz aspektów śledzenia trajektorii ruchu cząstek posiadających ładunek elektryczny. Bardzo istotnym elementem analizy jest sposób zbierania ogromnych ilości danych z eksperymentów fizycznych i ich przetwarzanie oraz analizowanie (m.in. ewaluacja, rekonstrukcja trajektorii cząstek) z użyciem dedykowanego oprogramowania O² stosowanego w ośrodku CERN.

Ważny element analizy problemu stanowi przegląd rozwiązań referencyjnych wykorzystywanych do wizualizacji pól wektorowych w literaturze, w tym grupy metod bezpośrednich, opartych o teksturę, opartych o własności pola, czy metody geometryczne. Rozwiązania koncentrują się głównie na sposobie wizualizacji, jednak algorytmy przetwarzania danych, niezbędne do zbudowania odpowiedniej reprezentacji, są dość tradycyjne i realizowane przez algorytmy wykonywane na procesorze głównym komputera.

Reasumując przegląd jest dobrze osadzony w dziedzinie problemu badań, chociaż nie zawiera zbyt wielu szczegółów metod przetwarzania i wizualizacji danych pola wektorowego. Trudność rozwiązywanego problemu wczytywania i wizualizacji danych byłaby bardziej czytelna gdyby już na etapie analizy rozwiązań referencyjnych pojawiły się szczegóły (koncepty) konkretnych algorytmów reprezentacji danych, czy wizualizacji, stosowane np. w profesjonalnym narzędziu O². Ciekawym uzupełnieniem mogłaby być też analiza wspieranych sprzętowo metod przetwarzania i wizualizacji dużych zbiorów danych, nie opisujących stricte pól wektorowych (np. chmur punktów, czy złożonych siatek wielokątowych powstających podczas interaktywnego cyfrowego rzeźbienia). Bez szczegółowego kontekstu, intuicyjnie przewidywalne jest, że rozwiązania wspierane obliczeniami równoległymi na karcie graficznej powinny być bardziej wydajne od obliczeń na procesorze głównym. Nie umniejsza to rangi problemu, gdyż umiejętność wykorzystania dostępnej technologii kart graficznych i tworzenie dedykowanych architektur kart graficznych algorytmów w rozwiązywaniu współczesnych problemów jest istotnym wyzwaniem dla świata nauki.

Ostatecznie, nie ma jednak wątpliwości, że podejście Doktoranta do rozwiązywanych problemów jest nowatorskie, między innymi z racji na wykorzystanie zaawansowanej technologii sprzętowej (zaawansowana karta graficzna wspierana nowoczesnym, programowalnym potokiem renderingu zamiast procesora głównego), dla której implementowane są algorytmy. Nie ogranicza to uniwersalności zaproponowanego rozwiązania, gdyż wizualizacje dużych zbiorów danych, w tym pól wektorowych, są zagadnieniem szeroko badanym i wciąż niedoskonałym.

Czy tematyka rozprawy jest aktualna lub dostatecznie ważna?

Tematyka rozprawy jest aktualna i ważna. Obecnie funkcjonujące systemy wizualizacji pól wektorowych mają szerokie zastosowanie analityczno-diagnostyczne, ale możliwość wizualizacji pól wektorowych w czasie rzeczywistym, co badał Doktorant, jest co najmniej oczekiwane przez różne środowiska naukowo-przemysłowe oraz otwiera nowe możliwości analizowania szeregu złożonych zjawisk. Badania mają również duże znaczenie przemysłowe.

Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienie, czy użył właściwej do tego metody i czy przyjęte założenia są uzasadnione?

Postawione zagadnienie badawcze, polegające na interaktywnej, najlepiej odświeżanej w czasie rzeczywistym, wizualizacji pola wektorowego wymagało rozwiązania szeregu problemów cząstkowych, które zostały dobrze i logicznie zidentyfikowane. Doktorant każdym z podstawowych etapów problemu, takich jak przygotowanie, wczytanie, przetwarzanie i wyświetlanie danych pól wektorowych, zajął się systematycznie i weryfikował różne warianty rozwiązań, w tym także koncepcje opracowane przez siebie. Za każdym razem eksperymentom towarzyszyła analiza ilościowa i jakościowa, która doprowadzała do jednoznacznych wniosków i pozwalała wybrać najlepsze z testowanych rozwiązań.

Pierwszym wyzwaniem był dostęp do próbek pola wektorowego i ich reprezentacja z poziomu karty graficznej. W tym kontekście zostały przetestowane rozwiązania bazujące na metodzie stałego pola, buforze *Shader Storage*, teksturze 3D w wersji pełnej i rzadkiej oraz implementacji modelu pola w języku GLSL. Testy polegały na weryfikacji wydajności kodu algorytmów w dwóch scenariuszach oraz odpowiadających im błędów średniokwadratowych odwzorowania pola – wierności uzyskanych wektorów pola na karcie graficznej w stosunku do implementacji w oprogramowaniu O^2 . W zależności od scenariusza przeprowadzone testy poszukujące kompromisu pomiędzy zużyciem pamięci, wydajnością, a poziomem dokładności odwzorowania pola, pozwoliły na wskazanie odpowiedniego (kompromisowego) rozwiązania.

Kolejnym wyzwaniem była efektywna wizualizacja trajektorii ruchu cząstek w polu magnetycznym. Doktorant zaproponował autorskie rozwiązanie bazujące na funkcjonalności *shadera* geometrii, który pozwala na przekazanie do karty graficznej jedynie kilku parametrów fizycznych, na podstawie których bezpośrednio na karcie obliczane są kolejne punkty poszukiwanej trajektorii. Podobnie jak w poprzednim etapie badań, weryfikacji poddano wydajność algorytmu oraz dopasowanie trajektorii przy podejściach bazujących na metodzie stałego pola, teksturze i metodzie GLSL. Najszybsze okazało się zastosowanie stałego modelu pola i obiektu bufora *Shader Storage*, które dla kilku tysięcy trajektorii zrealizowało zadanie w niespełna kilka milisekund – wielkości różniły się w zależności od stosowanego sprzętu. Wierność odwzorowania trajektorii była niemalże identyczna z propagatorem działającym na CPU w ramach oprogramowania O^2 .

Ostatnim z kluczowych zagadnień będących przedmiotem badań Doktoranta była wizualizacja pól wektorowych z wykorzystaniem *shaderów* siatki. Doktorant zaproponował cztery podstawowe metody wizualizacji: linie, wstążki, tuby oraz powierzchnie. Każda z metod testowana była dla czterech wariantów implementacji. Wydajność metody testowana była dla różnej (sięgającej 10000) liczby elementów graficznych. Dla każdego z wariantów, mieszczącego się w granicach czytelności (interpretowalności wizualnej), częstotliwość odświeżania sięgała 200 klatek na sekundę (dla rozważanej konfiguracji sprzętowej).

Istotnym atutem zaproponowanych rozwiązań i uznaniem ich jakości (wydajności) było włączenie algorytmów wizualizacji pól wektorowych do oprogramowania O^2 , które jest poważnym i uznanym narzędziem stosowanym przez społeczność międzynarodową do wizualizacji pola magnetycznego detektora ALICE w ośrodku naukowo-badawczym CERN.

Reasumując przedstawione algorytmy są ciekawe, mają duży potencjał i zostały docenione nie tylko przez środowisko badawcze skupione wokół ośrodka naukowo-badawczego Wielkiego Zderzacza Hadronów, ale również przez gremia redakcyjne renomowanych czasopism naukowych. Doktorant może poszczycić się dwoma opublikowanymi pracami naukowymi, w tym jedną ze współzyczynikiem IF

oraz dwoma złożonymi pracami do czasopism z bardzo wysokim współczynnikiem wpływu, które są w procesie recenzji i w momencie sporządzania niniejszej recenzji prawie zostały przyjęte do druku.

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?

Oryginalność rozprawy doktorskiej leży w opracowaniu nowych, oryginalnych algorytmów wizualizacji pól wektorowych zapewniających wysoką wydajność i wierność odzwierciedlenia pola. W szczególności najważniejszymi, moim zdaniem, osiągnięciami są:

- opracowanie czterech sposobów na przechowywanie oraz na dostęp do danych o polu wektorowym na karcie graficznej;
- opracowanie metody obliczania trajektorii cząstek oraz jej wizualizacja na karcie graficznej w oparciu o *shader* geometrii;
- opracowanie sposobów wizualizacji pól wektorowych za pomocą linii pola, wstążek, tub i powierzchni w oparciu o nowy potok graficzny wykorzystujący *shader* siatki;
- wdrożenie wizualizacji pola magnetycznego detektora ALICE jako części *Event Display*, trójwymiarowej aplikacji służącej do graficznej inspekcji jakości zbieranych przez detektor danych.

Wymienione osiągnięcia stanowią oryginalny wkład Doktoranta w rozwój Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja. Wartością dodaną jest również autorskie środowisko narzędziowe *FieldView*, którego wartość została poddana ocenie redakcji czasopisma *SoftwareX* i na podstawie niedawnych doniesień zostało przez nią docenione. Z racji na wykorzystanie w pracy nowej, słabo eksploatowanej naukowo, architektury programowalnego potoku renderingu, poziom techniki zaproponowanego rozwiązania jest niezaprzeczalnym novum pracy o istotnym zasięgu i przydatności.

Czy autor wykazał umiejętność poprawnego i przekonującego przedstawienia uzyskanych przez siebie wyników (zwięzłość, jasność, poprawność redakcyjna rozprawy)?

Przedstawione w pracy wyniki zostały uzyskane w zgodnym z prawidłami sztuki procesie eksperymentalnym. Opracowane i testowane algorytmy uzyskały większą od referencyjnej wydajność, co nie jest do końca zaskoczeniem, ale uzyskały przy tym odpowiednią wierność odwzorowania pola wektorowego znaną z literatury przedmiotu. Uzyskanie wydajniejszego i porównywalnego jakościowo rozwiązania problemu naukowego jest dowodem na osiągnięcie znaczących wyników w dziedzinie problemu.

Sama praca została zredagowana starannie, kolejność rozdziałów jest logiczna, praca zawiera odpowiednie spisy, odwołania i odsyłacze do literatury. Zawiera bardzo nieliczne błędy interpunkcyjne i literowe. Warta podkreślenia jest obecność w pracy licznych schematów i pseudokodów, które pozwalają lepiej zrozumieć dość złożone zagadnienia algorytmiczne.

Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?

Rozprawa doktorska opisuje i wyjaśnia mechanizmy tworzenia wydajnych algorytmów wizualizacji pól wektorowych w sposób klarowny i spójny. Praca moim zdaniem nie zawiera istotnych błędów ani uchybień, ale porusza dość obszerne zagadnienie, które przywołuje wątpliwości natury dyskusyjnej i polemicznej, które warto przedyskutować:

- czy w świetle dynamicznie rozwijanej od dłuższego czasu architektury programowalnego potoku renderingu i towarzyszącej mu warstwy sprzętowej, żaden z dostępnych na rynku pakietów

oprogramowanie nie wspiera sprzętowo wczytywania i przetwarzania dużych zbiorów danych (niekoniecznie pól wektorowych) w kontekście wizualizacji? Jakie są istotne różnice w wizualizacji dużych zbiorów danych względem podejścia Doktoranta?

- czy *shader* geometrii gorzej nadaje się do wizualizacji pól wektorowych niż *shader* siatki?

- jakie są realne szanse na obliczanie propagacji trajektorii cząstek w polu magnetycznym za pomocą *compute shadera*, który pozwala na efektywną realizację obliczeń ogólnego przeznaczenia na karcie graficznej?

- jakie są oczekiwane (minimalne) kryteria wydajności (mierzone np. liczbą klatek/sek.) i dokładności odwzorowania pola (mierzone np. w centymetrach), które determinują nowe praktyczne zastosowania opracowanych metod dla detektora ALICE? Jakie wymagania funkcjonalne względem algorytmów do wizualizacji pól magnetycznych narzuca środowisko skupione wokół detektora ALICE?

Konkluzja

Uważam, że cele rozprawy doktorskiej zostały zrealizowane. Autor przedstawił w rozprawie ciekawe i oryginalne pomysły na algorytmy przekazywania złożonych danych do karty graficznej, generujące na ich podstawie proceduralną geometrię oraz efektywnie wizualizujące dane pól wektorowych. Uzyskane przez Doktoranta wyniki uważam za istotne i wartościowe. Tym samym rozprawa prezentuje niezaprzeczalną wartość teoretyczną i praktyczną w wybranym obszarze Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja oraz potwierdza umiejętność samodzielnego i rzetelnego prowadzenia przez Doktoranta pracy naukowej.

Stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska Pana mgra Piotra Nowakowskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim, przez obowiązującą ustawę, z wyraźnym nadmiarem zasługującym na wyróżnienie. Stwierdzenie moje uzasadniam faktem zredagowania przez Doktoranta czterech bardzo dobrych prac naukowych (ściśle z zakresu doktoratu), z których przed złożeniem rozprawy doktorskiej opublikowano dwie, ale dwie kolejne, z pewnością niedługo, uzupełnią formalną listę dokonań. Kolejnym argumentem jest fakt wysokiej użyteczności praktycznej badań potwierdzony wdrożeniem opracowanego rozwiązania (algorytmów) do zaawansowanego oprogramowania O², wykorzystywanego w ośrodku CERN oraz popularyzacji badań, którą Doktorant zrealizował udostępniając społeczności naukowej środowisko *Field View*.

Tym samym wnoszę o dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony i do dalszych etapów postępowania doktorskiego.

Adam Wojciechowski