

dr hab. inż. Leszek J. Chmielewski, prof. SGGW
Instytut Informatyki Technicznej
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego
ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Recenzja rozprawy doktorskiej

autor rozprawy:

mgr inż. Piotr Nowakowski

Instytut Informatyki, Politechnika Warszawska

tytuł rozprawy:

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

Recenzja została przygotowana w odpowiedzi na powołanie na recenzenta przez Radę Naukową Dyscypliny Informatyka Techniczna i Telekomunikacja Politechniki Warszawskiej, w drodze uchwały z dnia 17 stycznia 2023 r., w związku z przewodem doktorskim Pana mgr inż. Piotra Nowakowskiego, prowadzonym w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Promotorem rozprawy jest prof. dr hab. inż. Przemysław Rokita.

1 Zawartość rozprawy

1.1 Omówienie ogólne

Recenzowana praca dotyczy zaawansowanych algorytmów proceduralnej generacji geometrii na karcie graficznej na potrzeby wizualizacji pól wektorowych. Głównym motywem pracy jest wykorzystanie technologii shaderów siatki, zaimplementowanych w najnowszych modelach kart graficznych, w taki sposób, aby wszystkie dane były przechowywane w pamięci karty, oraz aby wszystkie istotne obliczenia były wykonywane przez procesory karty. Dane są dość liczne, a wizualizacja, często dynamiczna, stawia wysokie wymagania dla sprzętu. Technologia shaderów i jej wykorzystanie nie jest jak dotąd szerzej przebadana i opisana, stąd potrzeba wykonania tego w niniejszej pracy.

Liczba danych w przypadku punktów zapisanych jako wektory w przestrzeni trójwymiarowej jest proporcjonalna do trzeciej potęgi rozdzielczości liniowej obiektu. Jedną z wad współczesnych kart graficznych jest stosunkowo mała przepustowość magistrali danych między główną pamięcią wideo a rdzeniami, względem wydajności rdzeni. Doktorant wnioskuje stąd, że rozwiązaniem pozwalającym zachować dużą wydajność jest zastępowanie zwiększania liczb danych wykonywaniem bardziej wymagających obliczeniowo równoległych algorytmów proceduralnej generacji danych, na licznych rdzeniach karty graficznej. Wprawdzie algorytmy były testowane głównie na zbiorze danych o polu magnetycznym detektora ALICE, to jednak są one ogólne i można je stosować do innych danych.

Praca składa się z ośmiu rozdziałów, bibliografii i trzech dodatków.

Pierwszy rozdział zawiera wprowadzenie i sformułowano w nim cele i plan pracy.

W rozdziale drugim opisano eksperyment ALICE, w tym Wielki Zderzacz Hadronów, jego detektory, strukturę repozytoriów danych, serwery, przepływa danych między procesami zbierania



danych (część *Online* projektu O^2) i analiz (część *Offline* projektu O^2), oprogramowanie O^2 , oraz skomplikowany model pola magnetycznego w detektorze i metodę rekonstrukcji trajektorii cząstek. Trzymano się zasady opisywania głównie tego, co konieczne dla zrozumienia dalszych części pracy.

Rozdział trzeci jest poświęcony opisowi potoków graficznych, w tym korzystającego z shaderów siatki). Wyróżniono ich programowalne etapy, gdzie można stosować proceduralne algorytmy generacji geometrii, co stworzyło podstawę do badań opisanych w rozprawie. Podano też przykłady zastosowań, na podstawie literatury.

Rozdział czwarty zawiera opis czterech grup metod wizualizacji pól: bezpośrednich, teksturalnych, opartych na cechach pola, oraz geometrycznych. Według najlepszej wiedzy Doktoranta, żadna z nich nie była dotąd implementowana za pomocą shaderów siatki.

Piąty rozdział zawiera opis technik i algorytmów, dzięki którym można pokonać trudność polegającą na zbyt powolnym dostępie do danych przez shadery. Są to metody Obiektu Bufora Pamięci Shadera (*Shader Storage Buffer Object*) lub po prostu bufora, tekstury 3D, rzadkiej tekstury 3D, oraz reimplementacji modelu pola w języku GLSL (z tablicą segmentów i bez niej, czyli z mniejszą pamięcią). Metody zostały przetestowane dla danych o stopniowo zmieniającym rozmiarze, od umiarkowanie trudnych, testowych do trudnych, zbliżonych do rzeczywistych. Testowano dwie karty graficzne.

Szesty rozdział to opis metody wizualizacji trajektorii cząstek, zwykle pokazywanych za pomocą GPU, ale teraz same wyliczenia trajektorii są realizowane także na GPU, są napisane w języku GLSL. Do renderowania wykorzystano kolejno metody opisane w poprzednim rozdziale.

W rozdziale siódmym opisano zagadnienie wizualizacji pól wektorowych za pomocą shaderów siatki. Realizuje to stworzone przez Doktoranta aplikacja *FieldView* oraz oprogramowanie zostało włączone do oprogramowania O^2 . Wizualizacji dokonuje się za pomocą linii, wstążek, tub oraz podziałów powierzchni, przy czym ostatnia metoda jest autorską metodą Doktoranta, nie tylko w zakresie wykorzystania shaderów (jak wszystkie metody), ale również w zakresie koncepcji.

W rozdziale ósmym podsumowano pracę i zrekapitulowano te elementy, które można uważać za najważniejsze osiągnięcia Doktoranta. Podano również listę oryginalnych osiągnięć doktoranta i wskazano możliwe kierunki dalszych prac.

Bibliografia kończąca rozprawę zawiera 152 pozycje, większość pochodzi z ostatnich lat. Obejmuje osiem repozytoriów GitGub i dwa repozytoria *arXiv*. Doktorant jest współautorem 21 cytowanych prac, w tym pierwszym autorem 14 z nich (oraz własnej pracy magisterskiej).

Dodatki to opis programu *FieldView*, podsumowanie dorobku naukowego i podziękowania od zespołu ALICE.

1.2 Cele pracy

Cele pracy zostały sformułowane we Wprowadzeniu:

- *Opracowanie oraz implementacja skutecznej metody przechowywania oraz ewaluacji danych o polu wektorowym na karcie graficznej* [11] (na przykładzie modelu pola magnetycznego detektora ALICE), jako kroku niezbędnego do wykorzystania tego modelu do wizualizacji w ramach dalszych rozważań.
- *Opracowanie oraz implementacja metody propagacji trajektorii cząstek na karcie graficznej*, jako formy wizualizacji efektu oddziaływania pola wektorowego [12] (tj. przedstawienia tra-



jektorii lotu cząstek wykrytych przez detektor oraz jej zakrzywienia w efekcie oddziaływania pola magnetycznego) na przykładzie detektora ALICE.

- *Opracowanie oraz implementacja algorytmów wizualizacji pól wektorowych z wykorzystaniem potoku shaderów siatki [13], gdzie model pola ALICE został wykorzystany jako jeden z przykładów demonstrujących efekt działania stworzonych metod.*
- *Integracja wizualizacji pola magnetycznego z oprogramowaniem ALICE O², jako wkład Doktoranta w kontynuację badań prowadzonych przez CERN.*

Pierwsze trzy cele zostały potwierdzone publikacjami. Czwarty ma charakter techniczny, a został potwierdzony Podziękowaniem od Kolaboracji ALICE. Teza nie została sformułowana, ale nie jest to obecnie wymagane. natomiast Autor zamieścił w dysertacji rozdział pt. *Wkład w rozwój dyscypliny*, co przypomina już kryteria, jakie powinna spełniać druga rozprawa doktorska.

2 Omówienie treści i wyników rozprawy

2.1 Uwagi pozytywne

Ważność celów pracy Wizualizacja pól, a tym bardziej wizualizacja pól wielowymiarowych i zmiennych, jest potrzebna. Ocena wizualna zjawisk, szczególnie nowych zjawisk, ma miejsce przed budowaniem modeli zjawisk i stawianiem hipotez statystycznych. Swobodna interakcja z danymi jest tu fundamentalna. Metody rozwinięte w pracy są tu bardzo pomocne.

Dobry przegląd literatury Praca jest dobrze udokumentowana literaturowo. Literatura jest nie tylko zebrana i wzmiankowana, ale także wystarczająco jasno napisano, co istotnego dla problemów opisywanych w rozprawie zawierają kolejne pozycje. Bibliografia kończąca rozprawę zawiera 152 pozycje, większość pochodzi z ostatnich lat. Obejmuje osiem repozytoriów GitHub i dwa repozytoria *arXiv*. Doktorant jest współautorem 21 cytowanych prac, w tym pierwszym autorem 14 z nich (oraz własnej pracy magisterskiej).

Publikacje i projekty Autora Prace na których opiera się dysertacja doktorska opublikowano w *Computer Physics Communications* (140 pkt), w pracach *29th International Conference On Ultra Relativistic Nucleus-Nucleus Collisions, 2022* (bez punktów), oraz zgłoszono do *Computer Physics Communications* (140 pkt) oraz *SoftwareX* (200 pkt).

Doktorant ma razem około 140 publikacji, indeks Hirscha wg. WoS: 12 (521 cytowań), wg. Scholar: 25 (1776 cytowań) (dane z systemu Omega Psir PW), oraz wg. Scopus: 23 (1747 cytowań) (dane ze Scopus, mogą zawierać kilka prac nadmiarowych).

Doktorant uczestniczył w trzech projektach krajowych jako konstruktor, oraz przede wszystkim jako samodzielny fizyk – uczestnik grantu *ALICE Masterclass* fundowanego przez *Mat-FizChem*. Projekt dotyczył popularyzacji nauki, działań CERN i Eksperymentu ALICE. Jak rozumiem, Doktorant wykorzystał okazję i rozszerzył swoją działalność na zakres naukowy, co zostało mocno docenione przez Zespół ALICE.



Czasy wykonania – opis ogólny Wszystkie badane czasy w scenariuszu *eval* są mniejsze, niż 10 ms, i jak się wydaje, rosną dość powoli wraz ze wzrostem liczby. W scenariuszu *fieldline* czasy metod GLSL są dłuższe, niż w implementacji na głównym procesorze, ale nadal można wybrać metodę szybszą – jednak kosztem większych błędów. Większość opisanych metod osiąga liczby klatek na sekundę przekraczające wymagania wizualizacji dynamicznej (w opisanych zastosowaniach). To z kolei umożliwia oprogramowanie dodatkowo innych procesów, z dynamicznie zmiennymi danymi zgodnie z ewolucją pól.

Przechowywanie i dostęp do danych Doktorant opracował cztery sposoby przechowywania danych o polu, zapewniające szybki dostęp do nich przez shadery. Przetestował je na danych o różnych rozmiarach, pod względem dokładności, i szybkości działania i wykorzystania pamięci. Poparto publikacją [11].

Obliczanie trajektorii cząstek na karcie graficznej Doktorant umieścił obliczenia trajektorii cząstek (dowolnych) wraz z wizualizacją w shaderach geometrii. Koncepcję przetestowano. Poparto publikacjami [12,14].

Cztery metody wizualizacji pól Doktorant opracował sposoby wizualizacji pól wektorowych za pomocą znanych metod: linii pola, wstążek, tub, oraz metody autorskiej – powierzchni, korzystając z powyżej opisanych metod w procesorach GPU – shaderach. te metody zostały zaimplementowane w ramach programu *FieldView*. Poparto publikacją [13].

Wdrożenie w projekcie ALICE Rozwinięte przez Doktoranta metody wizualizacji pola zostały wdrożone w projekcie ALICE, zarówno w ogólnym narzędziu Event Display, jak i w bibliotekach oprogramowania projektu O². Poparte listami z podziękowaniami.

Czysty kod Doktorant zamieszcza w pracy kod swoich metod. Jest on zwięzły, a przy tym czysty i czytelny. Jest uzupełniony czytelnymi diagramami. Oczywiście, tylko taki kod nadaje się do poważnych projektów i do publicznego udostępniania. Jeśli jednak doktorant robi to dobrze, to czemu tego nie zauważyć?

2.2 Uwagi dyskusyjne i krytyczne

2.2.1 Uwagi merytoryczne

Moje uwagi merytoryczne są bardzo nieliczne i należy je traktować raczej jako okazję do dyskusji niż krytykę.

Rozwój oprogramowania a rozwój sprzętu Pojawia się taka dość już stara myśl, że zamiast pracować nad przyspieszeniem oprogramowania wystarczy poczekać na szybszy sprzęt. Ta myśl miała większy sens, gdy szybkości sprzętu wzrastały lawinowo, zgodnie z prawem Moore'a. Teraz rozważa się śmierć prawa Moore'a, więc może moja uwaga ma sens. Jednak, Doktorant sam zauważył, że jedna z metod jest niepotrzebna w profesjonalnych i bardzo drogich kartach graficznych ze szczególnie dużą pamięcią. Mimo wszystko, co kiedyś było elitarne, wkrótce staje się powszechne, i mamy obecnie całkiem silne procesory, w tym graficzne, w telefonach i tabletach. Oczywiście, jeśli dziś czegoś potrzebujemy, to musimy to wykonać na tym sprzęcie, który



mamy, więc warto pracować nad szybkimi metodami, a będą one jeszcze szybsze gdy sprzęt zostanie rozwinięty. Poza tym, jest kwestia powszechności dostępu. Chętnie usłyszałbym komentarz Doktoranta uwzględniający jego wiedzę o trendach w konkretnych konstrukcjach.

Wspólne wykresy błędów, czasu i pamięci Prawdopodobnie udałooby się pokazać wszystkie parametry metod: dokładność, pamięć, szybkość, dla danych o różnych rozmiarach, na jednym wykresie. Jeśli to byłoby nieczytelne, to można by spróbować zrobić takie wykresy dla grup metod, albo umieścić opowiadające sobie wykresy na jednej grafice, widocznej od razu na jednej stronie. Ta druga metoda bywa nazywana *małymi wielokrotnościami* (ang. *small multiples*; ma on). Małe wielokrotności są pomocne, gdy pokazujemy dane w kilku aspektach, jest wiele zmian, a musimy się ograniczyć do płaszczyzny papieru. Mają one sporą literaturę. Choć Doktorant jest biegły w wizualizacji złożonych zjawisk, to mógłby zastosować także metodę odpowiednią dla zjawisk prostszych.

2.2.2 Drobne uwagi redakcyjne i techniczne

Uwagi te dotyczą spraw redakcyjnych, które są merytorycznie nieistotne i nie wpływają na ocenę pracy. Zamieszczam je do wiadomości Autora. Omawiam je w kolejności stron.

W całym tekście Wiele mało istotnych błędów, jak *oparty o coś, ilość* zamiast *liczba* (stosujemy w kontekście naukowym i technicznym dla rzeczowników policzalnych), zdania rozdzielone przecinkiem zamiast kropki (w wyliczeniu), samotne wiersze na końcu strony pod rysunkiem, rozdział zaczynający się od rysunku, słowo *milisekundy* zamiast *ms*, itp.

S. 46¹⁻⁴, pierwsze zdania rozdziału 5: W drugim i trzecim zdaniu jest mowa o usuwaniu problemu. natomiast w pierwszym problemu nie pokazano, tylko stwierdzono: *Funkcjonowanie algorytmów wizualizacji na karcie graficznej uwarunkowane jest możliwością dostępu do danych o polu wektorowym z poziomu kodu shaderów*. Znając wstęp do pracy można sobie przypomnieć, że ten dostęp nie jest wystarczająco szybki, i to jest problem. Należałoby tutaj, w tym ważnym rozdziale, napisać to wprost.

S. 51, Rys. 5.2: Brak informacji co oznacza kolor czerwony. Jest ona ważna, a pojawia się dopiero przy następnym rysunku.

S. 58₁₄ i następne: Po słowie pisanym pochyłą czcionką, jeśli kończy się ono literą wysoką, a następne słowo zaczyna się od litery również wysokiej, powstaje wrażenie, że słowa te są za blisko siebie. Porównajmy: „eval błąd”, „eval błąd”. W drugim przypadku użyto specjalnej, bardzo krótkiej spacji \ / na końcu słowa *eval*. To być może przesadna troska o skład tekstu, przyznaję, ale w profesjonalnej edycji zwraca się uwagę na takie szczegóły, a Doktorant jest profesjonalistą.

S. 60, Rys. 5.4: Jesteśmy domyślni, ale przydałoby się wyjaśnienie akronimów w legendzie rysunków tłumaczące je na nazwy używane w tekście i w tabelach.

S. 62₁₅: Dopiero tu nazwę metody *Shader Storage Buffer Object* przetłumaczono na polski, i to bardzo prosto: metoda bufora. Metodę po raz pierwszy opisano już na str. 47 i tam jej nazwa powinna zostać przetłumaczona.



Bibliografia: Wiele pozycji jest opisanych w niepełny sposób. Na przykład, preprint [13] powinien być opisany jako zgłoszony do *SoftwareX* z preprintem dostępnym w *arXiv*. Pozycja [24] zamiast danych o dostępie w czasopiśmie (DOI) ma tylko adres do *arXiv*, a jest to pozycja o otwartym dostępie. W pozycji [26] i wielu innych pracach konferencyjnych nie ma informacji o konferencji, dla prac mających adres URL, jak np. [29], nie podaje się go, pozycja [32] z pewnością nie ma tytułu w języku polskim, lecz po angielsku *O2 software project for the ALICE experiment at CERN*, itd.

3 Podsumowanie

W rozprawie można wyróżnić istotne elementy oryginalne oraz inne pozytywne aspekty omówione w rozdziale 2.1, zaś uwagi dyskusyjne i krytyczne omówione w rozdziale 2.2 nie umniejszają w istotny sposób wartości pracy.

Cele pracy zostały osiągnięte.

W rozprawie zaprezentowano oryginalne i wartościowe algorytmy proceduralnej generacji geometrii na karcie graficznej, na potrzeby wizualizacji pól wektorowych, oraz metody postępowania dla pełnego wykorzystania procesorów na karcie graficznej. Metody i algorytmy mają zastosowanie ogólnie do pól. Metody te głęboko rozpracowano i przebadano, ozważając także ich możliwe warianty, oraz wskazano ich obszary zastosowań odpowiednio do ich własności stwierdzonych eksperymentalnie.

Wnioski Powyższy opis, uwzględniający uwagi pozytywne jak również uwagi dyskusyjne i krytyczne, uzasadnia moje ostateczne wnioski o następującej treści.

- Recenzowana rozprawa w postaci opracowania pisemnego **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego** w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja. Rozprawa **prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w tej dyscyplinie oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**. Zagadnienie badawcze zostało prawidłowo postawione i skutecznie rozwiązane, a rozwiązanie zostało rzetelnie zweryfikowane. Tym samym rozprawa spełnia wymagania obowiązującego prawa w zakresie rozpraw doktorskich. Rozprawę oceniam pozytywnie i stawiam wniosek o skierowanie jej do dalszych etapów przewodu doktorskiego.
- **Stawiam wniosek o wyróżnienie pracy.** Jako uzasadnienie, podaję następujące okoliczności. Praca dotyczy tematyki bardzo współczesnej, ważnej i potrzebnej. Jest poparta publikacjami wysokiej klasy. Została zrealizowana w jednostce badawczej CERN stawiającej bardzo wysokie wymagania i została doceniona, a jej wyniki zostały włączone do oprogramowania i wdrożone do stałego używania w tej jednostce, głównie jako Event Display. Zostało to potwierdzone dokumentami, przez osoby odpowiedzialne za eksperyment ALICE. W tych dokumentach znajduje się również podziękowanie za wydarzenia popularyzatorskie i dydaktyczne, które poprowadził Doktorant. Będzie on więc mógł z sukcesem kontynuować swoją drogę zawodową jako cenny pracownik badawczo-dydaktyczny. Doktorant dysponuje potencjałem dla uzyskania kolejnych stopni/tytułów naukowych.