

**RADA NAUKOWA DYSCYPLINY  
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ**

zaprasza na  
OBRONĘ ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

**mgr. inż. Piotra Nowakowskiego**

która odbędzie się w dniu **13 czerwca 2023 roku**, o godzinie **10:00** w trybie stacjonarnym

Temat rozprawy:

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

Promotor: prof. dr hab. inż. Przemysław Rokita – Politechnika Warszawska

Recenzenci: dr hab. inż. Leszek Chmielewski – Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie

dr hab. inż. Radosław Mantiuk, prof. uczelni – Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

dr hab. inż. Adam Wojciechowski, prof. uczelni – Politechnika Łódzka

Obrona odbędzie się w **Sali Audytorium Centralnego Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych, ul. Nowowiejska 15/19;**

Osoby zainteresowane uczestnictwem w obronie proszone są o zgłoszenie chęci uczestnictwa w formie elektronicznej na adres sekretarza komisji: **dr hab. inż. Tomasz Trzcinski**, prof. uczelni – **email: [tomasz.trzcinski@pw.edu.pl](mailto:tomasz.trzcinski@pw.edu.pl)**, do dnia **12.06.2023 godz. 23:59**.

Z rozprawą doktorską i recenzjami można zapoznać się w Czytelni Biblioteki Głównej Politechniki Warszawskiej, Warszawa, Plac Politechniki 1.

Streszczenie rozprawy doktorskiej i recenzje są zamieszczone na stronie internetowej: <https://bip.pw.edu.pl/Postepowania-w-sprawie-nadania-stopnia-naukowego/Doktoraty/Wszczete-po-30-kwietnia-2019-r/Dyscyplina-informatyka-techniczna-i-telekomunikacja-dziedzina-nauk-inzynieryjno-technicznych/mgr-inz.-Piotr-Nowakowski>

Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny  
Informatyka Techniczna i Telekomunikacja  
Politechniki Warszawskiej  
**dr hab. inż. Jarosław Arabas, prof. uczelni**

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

### Streszczenie.

Wizualizacja pól wektorowych jest szeroko wykorzystywana zarówno w obszarze badań naukowych jak i w zastosowaniach przemysłowych. Jednym z głównych problemów tej tematyki jest duża ilość danych wejściowych, a co za tym idzie, duży koszt obliczeniowy. Z tego powodu obecnym trendem w dziedzinie jest opracowywanie algorytmów wykorzystujących równoległe przetwarzanie danych. Taką możliwość przetwarzania danych oferują najnowsze karty graficzne.

Przeprowadzone badania przedstawione w niniejszej pracy miały na celu opracowanie sposobów przechowywania informacji w pamięci karty graficznej o polu wektorowym oraz przeniesienie na kartę wszystkich istotnych obliczeń potrzebnych do wizualizacji pola. Opracowane techniki wizualizacji zostały oparte o proceduralną generację geometrii. Przedstawione metody generacji proceduralnej wykorzystują technologię shaderów siatki, która została wprowadzona na rynek w najnowszej generacji kart graficznych. Technologia ta nie została jeszcze w dostateczny sposób przebadana ani opisana w dostępnej literaturze naukowej.

**Słowa kluczowe:** grafika komputerowa, pola wektorowe, OpenGL, GLSL

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.

Szósty 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 O<sup>2</sup>, 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 shadera. 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 O<sup>2</sup>. 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 udałoby 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 zmiennych, 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. 46<sup>1-4</sup>, 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. 58<sub>14</sub> i następne:** Po słowie pisany 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 bład”, „eval bład”. 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. 62<sub>15</sub>:** 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.



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 świadczy 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 ostatniej 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*



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 O<sup>2</sup>.

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 wyzwaniem 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 O<sup>2</sup> 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 (konceptje) konkretnych algorytmów reprezentacji danych, czy wizualizacji, stosowane np. w profesjonalnym narzędziu O<sup>2</sup>. 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 architekturze kart graficznych algorytmów w rozwiązywaniu współczesnych problemów jest istotnym wyzwaniem dla świata nauki.

Ostatecznie, nie ma jednak wątpliwości, że podejście Doktoranta do rozwiązywania 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 współczynnikiem 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. Stwierzenie 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 O<sup>2</sup>, 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.

