

Kraków, 22 października 2019 roku

Dr hab. Paweł Węgrzyn

Zakład Technologii Gier

Zespół Zakładów Informatyki Stosowanej

Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej

Uniwersytet Jagielloński

## Recenzja rozprawy doktorskiej dla Uniwersytetu Zielonogórskiego w Zielonej Górze

Tytuł rozprawy:

Modelowanie geometryczne terenu w oparciu o wybrane algorytmy systemu cząstek.

Autor rozprawy: mgr inż. Korneliusz Warszawski

- 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)?**

Praca naukowa dotyczy modelowania ukształtowania terenu na potrzeby symulacji komputerowych działających w czasie rzeczywistym lub zbliżonym do czasu rzeczywistego. Doktorant stawia tezę pracy, cytując: „Zastosowanie algorytmów bazujących na systemach cząstek w graficznym modelowaniu ukształtowania terenu, opartego o strukturę twardości, pozwala na uzyskanie w czasie zbliżonym do rzeczywistego obiektów o sferycznej oraz asferycznej topologii.”

Zagadnieniem naukowym rozpatrywanym w pracy jest opracowanie wydajnego algorytmu generowania ukształtowania terenu bazującego na algorytmie uskokowym Poissona (Poisson faulting), ale zmodyfikowanego poprzez modelowanie terenu mapą wysokości lub mapą wolumetryczną z dodatkową warstwą informacji o twardości materiału składowego oraz wprowadzenie mechanizmu erozyjnego opartego na systemie cząstek (particles system).

Pozycja naukowa i techniczna doktoranta w obszarze badań związanych z tematyką pracy zaznaczona jest 26 publikacjami. Pięć z tych publikacji znajduje się w Web od Science, łączna liczba cytowań 5, indeks Hirscha 2. W Google Scholar indeksowanych jest 16 pozycji, ale nie ma wskaźników autora. Research Gate podaje 16 pozycji autora, liczba cytowań wynosi 16, zainteresowanie 877 wejść.

Zgodnie z wykazem czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych wraz z przypisaną liczbą punktów według Załącznika do komunikatu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 31 lipca 2019 r., doktorant posiada 1 publikację wartości 100-pkt, 3 publikacje 70-pkt (w tym dwie konferencyjne), dwie publikacje 20-pkt. Udziały doktoranta w dwóch najwyższych punktowanych publikacjach w czasopismach naukowych wynoszą odpowiednio 20 % i 60 % (zgodnie z przesłanymi mi deklaracjami autora i współautorów). Doktorant posiada kilka publikacji w uznanych czasopismach deweloperów gier wideo.

## **2. Określenie trafności wyboru i oryginalności problemu badawczego podjętego w rozprawie.**

Rozwój sprzętu komputerowego (coraz wydajniejszych procesorów i jednostek pamięci oraz znacznie lepiej swoją budową przystosowanych do dedykowanych obliczeń, dotyczy to zwłaszcza kart graficznych, na co słusznie zwraca uwagę Doktorant) umożliwia zaawansowane modelowanie obiektów, postaci i otoczenia na potrzeby symulacji w czasie rzeczywistym lub zbliżonym do rzeczywistego. Modelowanie ukształtowania terenu na użytek takich symulacji jest jednym z ważniejszych i popularniejszych zagadnień w tym obszarze. Dlatego tematykę badań uważam za istotną, której z pewnością nie można uznać za li tylko obszar metod i trików grafiki komputerowej.

Dostrzegam również oryginalność problemu badawczego podjętego w rozprawie, ale inaczej to oceniam w stosunku do samooceny w pracy doktorskiej. Komentarz Doktoranta na stronie 40, że „modele ukształtowania terenu przeznaczone do użytkowania w środowiskach wirtualnych najczęściej biorą pod uwagę jedynie informację o geometrii” nie jest najtrafniejszy. Każdy model ukształtowania terenu zakładający jakkolwiek ewolucję musi zawierać „parametry fizyczne”. Ten oczywisty wniosek wynika z prostej analizy wymiarowej – wielkości geometryczne są wyrażone w potęgach jednostek długości, skoro mają być zadane formułami zależnymi od czasu muszą pojawić się pewne stałe lub zmienne o innych wymiarach niż potęgi jednostek długości. Każdy model wprowadzający określone reguły dynamiki zmian geometrii terenu definiuje pewien model fizyczny, nawet jeśli jawnie nie odnosi się do struktury wewnętrznej terenu, jego składu materiałowego czy odporności na deformacje. Sugerowany w rozprawie podział podejść do modelowania dynamiki zmian ukształtowania terenu w dłuższej skali czasowej (na przykład modelowanie procesów erozyjnych) na „geometryczne” i „fizyczne” jest złudny. Paradoksalnie, przyjmując chwilowo argumenty Doktoranta za takim podziałem, jego podejście należałoby zaklasyfikować do podejścia „geometrycznego”, a nie „fizycznego”. Punktem wyjścia w rozprawie jest założenie, że długoczasowe procesy erozyjne ukształtowania terenu można modelować używając zmiennych odnoszących się do geometrii kształtu obrysu terenu (mapy wysokości) lub geometrii ułożenia wokseli. Notabene, takie założenie jest wspólne dla większości prac dotyczących symulacji czasu rzeczywistego wszelkich obiektów rozciągłych. Podejścia fizyczne opierają się na konstrukcji funkcji stanu i równania ewolucji. Podsumowując, oryginalność pomysłu Doktoranta jest znacznie skromniejsza – na bazie powszechnie stosowanego do generowania terenów na mapach wysokościowych i wolumetrycznych podejścia proceduralnego proponuje trochę inny algorytm propagowania erozji.

## **3. Ocena poprawności i kompletności celów oraz hipotez badawczych.**

W celu weryfikacji postawionej tezy pracy, przedmiotem prowadzonych badań było opracowanie modelu terenu oraz algorytmu generowania sztucznych terenów, który z jednej strony daje zadawalający efekt wizualny ze względu na produkowanie sztucznych struktur geologicznych, a z drugiej strony jest wystarczająco wydajny aby działać w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Hipotezą badawczą

jest więc możliwość pogodzenia jakości z wydajnością. Doktorant słusznie podzielił powyższy ogólny cel badawczy na cele szczegółowe:

- zaprojektowanie odpowiedniej reprezentacji danych dla przyjętego modelu terenu,
- opracowanie odpowiednich algorytmów realizujących proces generowania w czasie zbliżonym do rzeczywistego,
- optymalizacja algorytmów dla sprzętu klasy powszechnie używanych komputerów,
- implementacja metod w wybranym języku programowania oraz opracowanie biblioteki prototypowej,
- przeprowadzenie eksperymentów oraz analiza uzyskanych wyników pod kątem spełnienia wymogów stawianych systemom graficznym czasu rzeczywistego dedykowanym dla sprzętu klasy powszechnie używanych komputerów.

Hipoteza badawcza i cele szczegółowe badań zostały poprawnie zdefiniowane.

#### **4. Ocena znajomości metodologii badań oraz przyjętych i zastosowanych metod badawczych**

Doktorant starał się podać precyzyjne definicje kluczowych pojęć z zakresu tematycznego dotyczącego pracy. Mimo pewnych nieścisłości i mankamentów konstruowanych definicji, uznaję te starania za dowód erudycji i staranności autora. Doktorant posiada wiedzę z zakresu modelowania terenu i technik generowania terenu właściwych dla aplikacji typu gry wideo, symulatory, gry poważne, czyli dla aplikacji czasu rzeczywistego z trójwymiarową wizualizacją dedykowanych dla sprzętu użytkowego. Doktorant nie wykazał się znajomością metodologii specjalistycznego modelowania geologicznego, dlatego sugestie zastosowania wyników jego badań w tym obszarze uważam za nie poparte obiektywnymi argumentami (choć nie można tego wykluczyć).

#### **5. 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?**

Doktorant w stopniu dostatecznym zapoznał się z podstawową literaturą dotyczącą bardzo wydajnego generowania niepowtarzalnych i urozmaiconych ukształtowań terenu.

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

Autor wybrał modele terenu i techniki generowania terenu właściwe dla aplikacji typu gry wideo, symulatory, gry poważne. Zaprojektował odpowiednią reprezentację danych dla modelu terenu z uwzględnieniem informacji o lokalnej twardości (rozumianej jako odporność na poddawanie sztucznego terenu sztucznym procesom erozji). Zaprojektował, zaimplementował i przetestował algorytmy realizujące proces generowania terenu na bazie opracowanego modelu w czasie zbliżonym do rzeczywistego. Dokonał optymalizacji algorytmów dla sprzętu klasy powszechnie używanych komputerów z wykorzystaniem technologii CUDA. Wykonał przykładowe symulacje oraz przeanalizował wyniki pod kątem wydajności oraz wymiarów fraktalnych.

**7. 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?**

Zagadnienie bardzo wydajnego generowania niepowtarzalnych wzorców terenu jest dobrze obecne w artykułach naukowych, literaturze technicznej oraz czasopismach twórców oprogramowania. Samodzielny i oryginalny dorobek Doktoranta w tym obszarze to dwie pomniejsze, ale ciekawe modyfikacje znanych modeli i opartych na tych modelach algorytmów. Pierwszą modyfikacją jest wykonanie kopii mapy geometrycznej, czyli mapy wysokości lub mapy wokselowej. Kopia służy do przechowywania informacji o lokalnej twardości materiału tworzącego teren. Drugą modyfikacją jest generowanie struktur fraktalnych (erozja terenu) poprzez mechanizm emitera cząstek znany w grafice komputerowej. Mapa lokalnej twardości terenu ma wpływ na przebieg procesu erozji. Do interesujących wyników pracy należy uzyskanie takich struktur terenu jak mesy oraz kaldery.

**8. Wyodrębnienie i ocena naukowo-technicznej warstwy z obszaru informatyki technicznej i telekomunikacji**

Praca doktorska mieści się w obszarze informatyki technicznej. Opracowane zostały autorskie modele reprezentacji danych dla terenu. Zaprojektowano autorskie algorytmy generacji terenu oparte na emiterach cząstek oraz uwzględniające różną twardość składowych terenu. Implementacja algorytmów odbyła się na sprzęcie klasy użytkowej z wykorzystaniem technologii CUDA wspierającej wydajne obliczenia na procesorach kart graficznych. Projekt i implementacja algorytmów została wykonana pod kątem optymalizacji działania systemu w czasie zbliżonym do czasu rzeczywistego.

**9. Ocena poprawności struktury rozprawy (kolejność rozdziałów, proporcje między poszczególnymi rozdziałami, kompletność tez, obecność założeń metodologicznych pracy w tym metod, technik i narzędzi badawczych itp.) . Ocena formalnej strony rozprawy (poprawność redakcyjna - językowa, opanowanie techniki pisania, sporządzania przypisów, tabel, wykresów, bibliografii itp.) .**

Praca doktorska składa się ze streszczenia w języku polskim i angielskim (dobrze napisane abstrakty, właściwie oddające zawartość pracy), spisu treści (przejrzysty i kompletny), spisu rysunków (praca zawiera łącznie 64 ilustracje, w większości autorskie), spisu tabel (10 tabel), spisu definicji (19 definicji), spisu przykładów (4 przykłady), listy używanych skrótów, wykazu używanej notacji, krótkiego przeglądu treści rozprawy, wprowadzenia, czterech rozdziałów, bibliografii tematyki i oddzielnie bibliografii autora oraz indeksu (około 80 odnośników). Do pracy Doktorant dołączył kody źródłowe, zarówno aplikacji (Microsoft Visual Studio), jak i dysertacji (LaTeX). Na krążku znajdują się również pliki instalacyjne aplikacji oraz dziewięć wyrenderowanych obrazków uzyskanych krajobrazów terenu.

Wprowadzenie dyplomant poświęcił przedstawieniu spektakularnego rozwoju szeroko pojmowanej grafiki komputerowej (karty graficzne, biblioteki graficzne, systemy rzeczywistości wirtualnej /VR/, poszerzonej /AR/ i mieszanej /VR/). Nie jest to właściwe wprowadzenie do tej pracy, która dotyczy sztucznego generowania terenu na potrzeby grafiki komputerowej czasu rzeczywistego. Większość poruszonych wątków nie wiąże się bezpośrednio z pracą. Natomiast zabrakło uzasadnienia dlaczego wydajne generatory terenu są pożądane (konteksty: gry wideo, symulatory, gry poważne /serious games/, uczenie maszynowe). W modelowaniu światów na potrzeby grafiki czasu rzeczywistego coraz mniejszy jest udział pomysłowych modelarzy, grafików i animatorów, a coraz większy projektantów

algorytmiki i fizyki, którzy coraz mocniej inspirowują się modelami teoretycznymi oraz symulacjami off-line. Takich przykładów można podać wiele (modelowanie oświetlenia, modelowanie ciał elastycznych, modelowanie zachowań układów złożonych /complex systems/), a Doktorant powinien przynajmniej przedstawić przykłady związane z modelowaniem terenu.

W rozdziale pierwszym Doktorant wprowadza pojęcia z grafiki komputerowej, modeli cząstek oraz geometrii fraktalnej, potrzebne aby zdefiniować problem badawczy. Definiowaniu i omawianiu tych pojęć towarzyszy pewien chaos dotyczący terminologii, ale nie w stopniu uniemożliwiającym zrozumienie przedstawionego problemu badawczego. Rozdział drugi poświęcony jest prezentacji zaproponowanego modelu generacji terenu wraz z modelowaniem struktur erozyjnych. Doktorant przedstawił struktury danych i algorytmy. Prezentacja jest zrozumiała (poza mniej ważnymi szczegółami). Wiele fragmentów w rozdziale drugim jest niepotrzebnie rozbudowanych. W rozdziale trzecim Doktorant bardzo przejrzyście i w uporządkowany sposób przedstawił wyniki swojej pracy. W czwartym rozdziale przedstawił wnioski, możliwości praktycznego zastosowania oraz kierunki dalszego rozwoju badań. Uważam informacje zawarte w czwartym rozdziale pracy za wyczerpujące.

W dodatku A opisano stanowisko testowe (podano wszystkie potrzebne informacje), w dodatku B przedstawiono kilka wybranych wizualizacji dla różnych modeli i materiałów (bardzo starannie przygotowane oraz opisane rysunki). Pozostałe dodatki zawierają informacje dotyczące otrzymanych nagród i grantów, praw autorskich do wykorzystanych materiałów i zawartości dołączonego do pracy nośnika danych.

#### **10. Jakie są słabe strony rozprawy i jej główne wady?**

##### **Znaczące słabe strony i wady rozprawy:**

Najpoważniejszą wadą tej pracy doktorskiej jest kamuflowanie faktu, że rozprawa dotyczy proceduralnego modelowania graficznego. Prezentowane metody trudno nawet zaliczyć do inspirowanych fizyką lub geologią.

W streszczeniu rozprawy Doktorant zapowiada „metodę symulowania efektów długotrwałego oddziaływania sił erozyjnych na daną formację geologiczną”. W podsumowaniu rozdziału 1, autor stwierdza, że przedstawił „aktualny stan wiedzy na temat modelowania syntetycznych struktur geologicznych oraz przegląd najważniejszych wg autora metod z tej tematyki”. Nie jest to prawda, autor przedstawił tylko pewne uniwersalne techniki reprezentowania informacji przestrzennej (height maps, voxel maps, layered data representation) oraz oparte na tych technikach proste modele generowania i erozji terenu. Nie sięgnął ani do literatury modelowania geologicznego (geologic modeling), ani do znanych narzędzi informatycznych (np. program Move firmy Midland Valley). W podsumowaniu rozdziału 2, autor nawiązuje do symulacji fizyki inspirowanymi hydrologią i geologią. W podsumowaniu rozdziału 3, autor stwierdza, że opracował „nowy model numeryczny dla formacji geologicznych”.

Autor nie zadeklarował jednoznacznie, że rozprawa dotyczy proceduralnego modelowania w grafice komputerowej. Zamiast tego wielokrotnie wprowadza czytelnika w błąd sugerując inny lub szerszy zakres tematyczny pracy. Miałem duże wątpliwości jak potraktować ten fakt nierzetelności naukowej. Postanowiłem przyjąć wersję, że Doktorant chciał w ten sposób podnieść rangę naukową swoich badań. Zupełnie niepotrzebnie, modelowanie 3D, animacja 3D i gry wideo są ważnymi obszarami badań naukowych, bardzo silnie reprezentowanymi w czołowych ośrodkach naukowych (np. Stanford, MIT,

Princeton). W Polsce również (przykładowo na Uniwersytecie Jagiellońskim są aż dwie jednostki: Zakład Technologii Gier i Zakład Projektowania i Grafiki Komputerowej, ponadto jest kierunek studiów Informatyka Gier Komputerowych).

Drugą słabą stroną rozprawy jest brak badań dotyczących ewaluacji generowanych wzorców terenu. Doktorant zbadał uzyskiwane wymiary fraktalne oraz pokazał, że można uzyskać formacje takie jak mesy, kaldery. To za mało. Należało poszukać cech charakterystycznych generowanych przykładów (np. asymetrie, artefakty, powtarzające się pewne elementy, brak pewnych elementów, korelacje pewnych cech). Jednym z poważnych mankamentów tego typu algorytmów proceduralnych jest niska kontrolowalność produkowanych terenów. Ponadto, w literaturze sformułowano szereg kryteriów akceptowalności generowanego sztucznego odwzorowania terenu. Należało przeanalizować otrzymane rezultaty pod kątem chociaż niektórych z tych kryteriów.

Trzecią poważną wadą rozprawy jest brak interpretacji wprowadzonego pojęcia twardości budulców terenu. Mam wrażenie, że autor pracy uległ autosugestii, że jest to skala Mohsa. Skala Mohsa oddaje odporność na zarysowania, nie bardzo rozumiem co to ma wspólnego z procesami erozyjnymi terenu. Ponadto jest definiowana tylko dla minerałów, a struktura terenu składa się nie tylko z minerałów. Doktorant powinien zbadać znaczenie swojej "twardości". Wykonał zresztą liczne symulacje dla różnych wartości parametrów, ale niestety nie zebrał wniosków prowadzących do interpretacji "twardości". Oczywiście, wyjaśnienie typu "twardość jest odpornością na działanie sił erozyjnych" traktuję jako kamuflaż. Rzetelna interpretacja powinna odnosić się do wpływu "twardości" na cechy generowanego terenu lub animację jego zmiany. Można też spróbować podać sposób pomiaru/oszacowania "twardości" bezpośrednio na wirtualnym terenie.

#### **Pozostałe usterki i błędy w rozprawie:**

Dyplomant podał szereg definicji kluczowych terminów naukowych użytych w pracy (scena, samopodobieństwo, fraktal, numeryczny model terenu, długotrwały proces geologiczny, siła erozyjna, sferyczna i asferyczna topologia terenu, cząstka elementarna, emiter cząstek, okno emisji cząstek, kolekcje emiterów i cząstek, systemy cząstek, krawędź uskoku, deformacje geometryczne, twardość struktury terenu, mapa i wolumen twardości). Jest to wysiłek zasługujący na pochwałę, jednakże nie ustrzegł się błędów. Po części związane to jest z faktem, że te pojęcia nie zawsze są precyzyjnie i tak samo definiowane w literaturze. W różnych kontekstach przyjmują inne znaczenia. Doktorant próbował nadać im precyzyjne znaczenie w kontekście jego pracy, ale nie wszystkie podane propozycje są akceptowalne dla mnie.

Scena (definicja 1.1) jest terminem wieloznacznym. W kontekście gier komputerowych najczęściej oznacza kontener obiektów (tzw. graf sceny) mających wpływ na przebieg renderowania obrazu albo wspólną bazę (tzw. układ sceny albo świata) do której transformujemy wszystkie modele, a w kontekście produkcji filmowej scena określa jednostkę akcji w ustalonej lokacji składającą się z ujęć. Doktorant proponuje utożsamić scenę z pewną zwartą podprzestrzenią Euklidesową i przypisać do niej kamerę, źródła światła i obiekty graficzne (czyli graf sceny). To zła definicja. Czym jest ta zwarta podprzestrzeń? Tego Doktorant niestety nie wyjaśnia, można domyślać się, że ograniczonym obszarem pojawiania się i przemieszczania obiektów graficznych. Jeżeli tak, to wyklucza to tzw. światy otwarte, bardzo popularne w wielu grach wideo. W tej definicji pomieszano różne struktury formalne, czyli geometrię i graf sceny. Oczywiście, można wprowadzić ograniczony obszar akcji, ale wtedy taki konstrukt należy przypisać do

grafu sceny, a nie odwrotnie. Jeszcze mała uwaga do tej definicji – „syntetyczne, sztuczne” to nie są synonimy słowa „wirtualne”.

W literaturze są różne definicje potoku graficznego (*graphics pipeline*), ze względu na zależność od sprzętu i oprogramowania, ale żadna nie traktuje modelowania jako części potoku graficznego. Natomiast tak można zrozumieć Rysunek 1.1 z podpisem oraz pierwsze zdanie paragrafu 1.1.1. Modelowanie nie jest częścią potoku graficznego. Potok graficzny to przejście od gotowych już modeli do dwuwymiarowego obrazu na ekranie, czyli to co Doktorant nazywa „generowaniem obrazu” (paragraf 1.1.4). W literaturze, terminy „graphics pipeline” oraz „rendering pipeline” są synonimami.

Teksturowanie (paragraf 1.1.3) to nie tylko mieszanie kolorów (tzw. *blending*), ale także mapowanie wypukłości i przesunięć (*bump mapping*, *displacement mapping*, *normal mapping*, *parallax mapping*), mapy emisyjne i inne techniki.

Cieniowanie (*shading*) (paragraf 1.1.3) – „symulowanie głębi modeli trójwymiarowych poprzez różne poziomy ciemności” niezgrabne i nieczytelne (aczkolwiek spotykane w literaturze), terminem tym obejmuje się technikę obliczania parametrów światła rozproszonego na materiałach pokrywających powierzchnie obiektów trójwymiarowych

W paragrafie 1.2, Doktorant pomieszał mechanizm wyświetlania klatek (mierzony liczbą klatek na sekundę, *fps*) z mechanizmem odświeżania ekranu (mierzonym częstotliwością aktualizacji obrazu, *Hz*). Używa tylko jednostek *Hz*. Po to właśnie używa się *fps* i *Hz* żeby nie mieszać pojęć. Liczba wyświetlanych klatek na sekundę odnosi się albo do źródła obrazu (np. karta graficzna), albo do widza (ile widzi różnych klatek). Częstotliwość aktualizacji obrazu odnosi się do wyświetlacza. Dlatego nie można pisać, że „15 *Hz* pozwala na uzyskanie animacji interaktywnych”, tylko „15 *fps* pozwala na uzyskanie animacji interaktywnych”. Podobnie zamiast „25 i 50 *Hz* dla systemu PAL” powinno być „25 *fps* i 50 *Hz* dla systemu PAL”, itd. Ponadto, stwierdzenie, że „15 *Hz* umożliwia wygodną edycję sceny” jest już zupełnie niezrozumiałe.

Definicja samopodobieństwa (1.2) – można znaleźć w literaturze bardziej precyzyjną definicję. Zamiast „wizualnego podobieństwa fragmentów względem całości” można odwołać się do homeomorfizmów i systemów funkcji iterowanych (*IFS*).

Rysunek 1.3 nie jest właściwy – brak podkreślenia nieskończonej iteracyjności (która wcale nie jest taka naturalna).

Na stronie 15 zdanie „wymiar samopodobieństwa można odnieść tylko i wyłącznie do zbiorów fraktalnych” jest nieprawdziwe. Można odnieść też do zbiorów, które nie są fraktalami (np. linia, kwadrat, sześciąt) i wtedy pokrywa się on z wymiarem topologicznym.

Definicja 1.3 jest definicją fraktala. Wedle mojego stanu wiedzy, nikomu nie udało się jeszcze podać zadawalającej definicji fraktala. Nie zrobił tego nawet Mandelbrot, twierdząc, że jest na to za wcześnie i trzeba lepiej zrozumieć te struktury. Doktorant przytacza natomiast wstępną i próbną definicję, którą Mandelbrot zaproponował w 1982 roku: fraktalem jest twór dla którego wymiar Hausdorffa-Besicovitcha jest silnie większy od wymiaru topologicznego. Definicja ta nie obejmuje wszystkich interesujących i znanych przykładów. W szczególności funkcji Cantora (tzw. „diabelskich schodów”), która nie jest fraktalem zgodnie z podaną definicją, a większość badaczy zalicza ją do fraktali (tak też uważał sam Mandelbrot). Doktorant dodaje jeszcze w definicji warunek samopodobieństwa (*self-*

similarity), który to warunek jeszcze bardziej zawęża definicję odrzucając dobrze już rozpoznaną, ciekawą i przydatną rodzinę fraktali anizotropowo samopodobnych (self-affinity).

Definicja numerycznego modelu terenu 1.4, podobnie jak definicja sceny, jest niefortunną próbą fuzji ciągłej struktury geometrycznej z dyskretną strukturą danych. Stwierdzenie, że elementy pewnego podzbioru przestrzeni Euklidesowej (tym razem już nie zwartego, ale tylko ograniczonego – dlaczego? domknięcie tego obszaru, czyli brzeg, ma nie należeć do modelu?) przechowują pewne dane o strukturze geologicznej jest dalekie od precyzji i matematycznej poprawności. Wniosek, który Doktorant wyciąga z tej definicji na stronie 19, że „zgodnie z definicją możemy powiedzieć, że numeryczny, fraktalny model terenu bazuje na odpowiednio dobranej strukturze danych oraz algorytmie fraktalnym, który ją interpoluje” jest niezrozumiały, ponieważ w definicji 1.4 nie ma mowy o fraktalach.

W omówieniu algorytmów generowania fraktalnych modeli terenu, Doktorant nie przytacza kluczowych informacji dotyczących złożoności obliczeniowej, złożoności pamięciowej, występowania niepożądanych artefaktów. Nie wspomina o popularnych algorytmach modelujących procesy erozyjne terenu: termicznej erozji (przy zbyt dużej różnicy wysokości między sąsiednimi pikselami mapy następuje „wymiana materiału”), wodnej lub hydraulicznej erozji (oprócz mapy wysokości, tworzymy jeszcze mapy wody i osadów), odwrotnej termicznej erozji („wymiana materiału” następuje poniżej pewnej różnicy wysokości między sąsiednimi pikselami mapy), itp.

W definicji siły erozyjnej 1.6, nie wiadomo co oznacza sumowanie wszystkich zjawisk erozyjnych.

W podrozdziale 1.5 o modelach cząstek Doktorant na użytek swojej dysertacji albo zredefiniował albo źle zdefiniował szereg terminów naukowych, czym wprowadził spory bałagan terminologiczny w pracy. W paragrafie 1.5.1, zdanie „Graficzny model obiektu nie jest reprezentowany zbiorem wielokątów (ang. polygons) czy łatek (ang. patches) lecz budowany jest ze zbioru (chmury, kolekcji) prymitywów (zob. Definicja 1.9), tzw. cząstek elementarnych (ang. primitive particles) [Ree83]” ma być cytatem z pracy Williama Reevesa z 1983 roku. Ale oryginalne zdanie brzmi „an object is represented not by a set of primitive surface elements, such as polygons or patches, that define its boundary, but as clouds of primitive particles that define its volume”. Po pierwsze, chmury partikli nie należy nazywać graficznym modelem obiektu. Jest to model kształtu, ruchu, zderzeń, czyli fizyki (to podkreśla również Reeves), a czasem również sztucznej inteligencji obiektu. Termin „cząstka elementarna” jako tłumaczenie „primitive particle” jest niewłaściwy. Cząstka elementarna (elementary particle) to znany termin z fizyki. Natomiast „primitive particle” należy tutaj tłumaczyć „punktowy prymityw”, bo w takim znaczeniu użył go Reeves w swoim artykule (dla odróżnienia od „primitive surface elements”, na których opierało się modelowanie i renderowanie 40 lat temu). Czyli chodzi o geometryczny prymityw (geometric primitive), elementarny obiekt geometryczny do budowy modeli geometrycznych. Podanej w pracy doktorskiej definicji 1.9 nie można zaakceptować. Z jednej strony, Doktorant proponuje inną nazwę, dla czegoś co już w grafice komputerowej jest dawno zdefiniowane i powszechnie używane – wierzchołka (vertex), czyli punktowego prymitywu z dodatkowymi atrybutami. Z drugiej strony, cząstki elementarne należą głównie do języka fizyki współczesnej, a tam zdecydowanie nie mogą być kojarzone z punktami (ze względu na kwantowe zasady nieoznaczoności cząstki elementarne nie są lokalizowalne, nie są „punktowe”). Nazwa „particle systems” w kontekście modelowania na potrzeby symulacji komputerowych czasu rzeczywistego też nie odnosi się do cząstek elementarnych, tylko do punktów materialnych (point particles) /w żargonie partikli/, czyli abstrakcyjnych obiektów Newtonowskiej mechaniki, nie posiadających kształtu (jak punkty geometryczne), ale obdarzonych masą i innymi



atributami. Podsumowując, „cząstki elementarne” (fizyka), „punkty” (geometria), „punktowe prymitywy” (modelowanie), „wierzchołki” (renderowanie), „punkty materialne” (mechanika) to dobrze zdefiniowane i powszechnie przyjęte terminy naukowe i nie należy ich mylić i mieszać. Doktorant powinien użyć w swojej pracy poprawnej terminologii: geometryczny model obiektu zbudowany jest z punktowych prymitywów, graficzny model obiektu reprezentowany jest wierzchołkami, fizyczny model obiektu jest systemem cząstek.

Wzory (1.11), (1.12), (1.14) i (1.15) są niezrozumiałe, nie należy używać oznaczenia duże sigma ( $\Sigma$ ) dla czegoś innego niż działanie sumowania.

Definicja okna emisji cząstek (1.11) używa złej terminologii i jest niezrozumiała. Oknem zwykle nazywamy jakiś regularny ograniczony obszar. W definicji (1.11) prawdopodobnie chodzi też o lokalny układ odniesienia związany z emiterym.

Definicja systemu cząstek (1.14) jest na użytek pracy i odbiega od tego, co zwykle używane jest w grafice komputerowej. Zazwyczaj na opis systemu cząstek składa się triada podsystemów emisji cząstek, symulowania ewolucji cząstek i renderowania cząstek.

Definicja krawędzi uskoku (2.1) jest niespójna. Nie wiadomo jaką matematyczną strukturą jest model geometryczny terenu  $H$  (zgodnie z listą notacji i poprzednim rozdziałem jest macierzą geometrii terenu, a na stronie 45 traktowany jest jak zbiór punktów), nie podano czym jest  $H'$ , nie wyjaśniono w jaki sposób funkcja  $f$  wyznacza krawędź uskoku  $F$ . Nie wiadomo też jak narzuca się warunki konsystencji podziału. Na te pytania można dopiero odpowiedzieć na podstawie lektury dalszej części pracy.

Definicja deformacji geometrycznych 2.2 odwołuje się do niejasnej procedury „usuwania elementów struktury modelu wywołanej działaniem algorytmicznym”. Konsekwentnie, definicja twardości struktury terenu 2.3 też jest niedoprecyzowana. „Działanie algorytmiczne” może dotyczyć różnych aspektów, nie tylko generowania terenu, ale również wygładzania uzyskanych wyników, usuwania błędów lub artefaktów czy wymuszania pewnych pożądanых charakterystyk generowanego terenu. Czy twardość terenu jest traktowana jako odporność na wszelkie tego typu działania?

Klasyfikacja materiałowa według wzoru 2.23 wymaga uzasadnienia. Jeżeli zastosować ją do danych z tabelki 2.1, sześć pierwszych materiałów będzie należało do klasy 0, dwa następne do klasy 1, korund do klasy 2 i diament do klasy 9. Będą więc reprezentowane tylko cztery klasy, dlatego taka transformacja liniowa jak we wzorze 2.23 wydaje się prowadzić do mało użytecznej klasyfikacji. Jeżeli ma być stosowana do parametryzacji algorytmów generowania terenu w oparciu o rzeczywistą strukturę geologiczną, wymaga uzasadnienia lub potwierdzenia uzyskanymi rezultatami. W prezentowanej pracy doktorskiej nie znalazłem praktycznego wykorzystania tej klasyfikacji, uważam ten fragment pracy (łącznie z przykładem 2.3) za zbędny i nic nie wnoszący do rozprawy.

Paragraf 2.4 (Struktura danych) jest nazbyt rozbudowany, dotyczy powszechnie znanej praktyki reprezentowania wszelkich danych strukturalnych na potrzeby obliczeń liniowych jako wektorów (patrz przykładowo biblioteki BLAS i LAPACK).

**11. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk technicznych? Ocena stopnia zaawansowania zawartej w rozprawie wiedzy teoretycznej z zakresu**

Niniejsza rozprawa przyczynia się do powiększenia wiedzy i wyeliminowania niepewności technicznej związanych z tworzeniem wysoko wydajnych generatorów terenu na użytek zastosowań takich jak: generowanie terenu w czasie rzeczywistych w grach wideo, symulatorach i grach poważnych, generowanie krajobrazów na potrzeby różnych aplikacji (np. webowych) działających w czasie zbliżonym do rzeczywistego, generowanie wzorców dla systemów sztucznej inteligencji (np. generatywnych sieci przeciwstawnych).

**12. 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 nadmiarem
- e/ wybitnie dobra, zasługująca na wyróżnienie

**Konkluzja**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie ciekawego problemu naukowego. Główne oryginalne autorskie osiągnięcia naukowo-techniczne w pracy dotyczą dyscypliny informatyki technicznej i telekomunikacji. Recenzowana rozprawa doktorska spełnia warunki określone w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14.03.2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65 z 2003r., poz. 595 z późn. zm.). Wnioskuje o jej dopuszczenie do publicznej obrony.

Paweł Węgrzyn