

Politechnika Warszawska
Wydział Elektroniki i Technik Informatycznych

DZIEKAN I RADA WYDZIAŁU ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH
POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

zawiadamiają o

PUBLICZNEJ OBRONIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr. inż. Jakuba Domaradzkiego

która odbędzie się w trybie zdalnym dniu 22 czerwca 2020 r. o godzinie 11.00

Tytuł rozprawy doktorskiej:

“Destruction of Sparse-Voxel-Octree Objects Using Dynamic Fracture Patterns”

promotor: dr hab. inż. Tomasz Martyn Politechnika Warszawska Wydział
Elektroniki i Technik Informatycznych

recenzenci: dr hab. inż. Przemysław Kiciak Wydział Matematyki, Informatyki i
Mechaniki Uniwersytet Warszawski

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

Na stronie internetowej wydziału www.elka.pw.edu.pl/Wydzial/Rada-Wydzialu/Harmonogram-obron-doktorskich-streszczenia-i-recenzje znajdują się streszczenie rozprawy oraz recenzje, jak również dostęp do tekstu rozprawy umieszczonej w Bazie Wiedzy Politechniki Warszawskiej.

Sposób uczestniczenia w publicznej obronie:

Join Zoom Meeting

<https://us02web.zoom.us/j/86213347608?pwd=YnBsTWNQTnR2YVNVb0EzK1dTZlVsdz09>

Dziekan



prof. dr hab. inż. Krzysztof Zaremba

Rozprawa doktorska

Mgr inż. Jakub Konrad Domaradzki

Destruction of Sparse-Voxel-Octree objects using dynamic fracture patterns

Promotor:
dr hab. Tomasz Martyn

Streszczenie

Celem pracy było zbadanie czy reprezentacja modelu w postaci rzadkiego drzewa wokselowego przyniesie korzyści w kontekście jego destrukcji. Stworzono więc algorytmy destrukcji wykorzystujące technikę wzorców pęknięć, która jest podejściem czysto geometrycznym i powinna uwydatnić zalety i wady zastosowanej reprezentacji obiektów. W rezultacie powstało rozwiązanie, które nie tylko działa w czasie rzeczywistym, ale także rozszerza podstawowe wykorzystanie techniki wzorców pęknięć dzięki zmianie reprezentacji wzorca pęknięć i użycia proceduralnych technik generowania powierzchni. Zabieg ten umożliwił konstruowanie wzorca pęknięć w momencie pojawienia się niszczącego zdarzenia i uzyskanie unikalnych rezultatów. Ponadto, pomimo wykorzystania wzorca pęknięć w postaci diagramu Woronoja, udało się wygenerować w procesie destrukcji fragmenty geometrii

o wklęsłym kształcie, których powierzchnia została znacznie wzbogacona o detale. Wszystkie obiekty na scenie traktowane były jako bryły sztywne i w celu symulacji ich ruchu stworzono algorytm wykrywania kolizji operujący bezpośrednio na nowej reprezentacji obiektów.

Słowa kluczowe: dynamiczne wzorce pęknięć, diagram Woronoja, rzadkie drzewa wokselowe

dr hab. Przemysław Kiciak
Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki
Uniwersytet Warszawski
ul. Banacha 2
02-097 Warszawa

Warszawa, 12 listopada 2019

Recenzja rozprawy doktorskiej
dla Rady Wydziału Elektroniki i Technik Informatycznych
Politechniki Warszawskiej

Autor rozprawy: **Jakub Konrad Domaradzki**
Tytuł rozprawy: **Destruction of Sparse-Voxel-Octree Objects Using Dynamic Fracture Patterns**

Tematem przedstawionej pracy jest zastosowanie struktury danych — drzewa ósemkowego — do modelowania i symulacji pęknięć obiektów (ciał stałych) na potrzeby grafiki komputerowej, ze szczególnym uwzględnieniem obliczeń w czasie rzeczywistym w grach komputerowych. Praca ma charakter badawczy. Znana struktura danych, tj. drzewo ósemkowe o budowie dostosowanej adaptacyjnie do kształtu reprezentowanego obiektu, będąca podstawą wielu algorytmów geometrii obliczeniowej i grafiki komputerowej, znalazła w tej pracy niebanalne zastosowanie.

Praca składa się z siedmiu rozdziałów, spisu publikacji Autora i bibliografii; dodatkiem jest płyta CD z plikami źródłowymi zrealizowanego w ramach pracy oprogramowania i z przykładowymi filmami wideo otrzymanymi przy jego użyciu.

Pierwszy rozdział pracy jest wstępem, w którym Autor jasno sformułował postawiony cel — opracowanie algorytmów symulacji pęknięcia obiektów — a także uzasadnił dokonany wybór struktury danych, na której algorytmy te zostały oparte. Przedstawiona we wstępie dyskusja uzasadnia, dlaczego alternatywna dla drzewa ósemkowego reprezentacja obiektów w postaci siatek trójkątów jest bardziej kłopotliwa, gdy pęknięcie obiektu wiąże się z podziałem trójkątów stanowiących model tego obiektu. Wstęp zawiera także przegląd literatury, na której tle Autor zaprezentował swoje rozwiązanie.

Rozdział drugi zawiera opis struktury danych drzewa ósemkowego i sposobów jego użycia do rozwiązywania w pracy problemów, jakimi są podzielenie obiektu na części oraz wykrywanie kolizji między przemieszczającymi się względem siebie częściami obiektu. Jest tu też bardziej szczegółowa dyskusja rozwiązań przedstawionych w literaturze,

W rozdziale trzecim jest opisany algorytm generowania wzorców pęknięć na podstawie podziału przestrzeni trójwymiarowej na regiony Woronoja. Zastosowanie regionów Woronoja ma tę zaletę, że przemieszczenie ziaren Woronoja względem obiektu zmienia podział obiektu na fragmenty, co umożliwia łatwe wprowadzenie „losowości” pęknięć obiektu, pożądanej w grach komputerowych, które powinny odzwierciedlać losowy i niepowtarzalny proces rozbijania rzeczywistych obiektów. Dwa aspekty problemu zwracają uwagę: fragmenty pękniętego obiektu są przecięciami tego obiektu z regionami Woronoja, które są zbio-

rami wypukłymi, ale ponieważ obiekt nie musi być wypukły, powstałe fragmenty mogą być niespójne. Wymaga to dodatkowego podzielenia takich fragmentów na spójne kawałki. Elementem algorytmu generowania pęknięć jest procedura wykrywania takich kawałków, reprezentowanych przez odpowiednie zbiory wokseli drzewa ósemkowego. Ponadto ograniczenie wzorca pęknięć do wypukłych regionów Woronoja można ominąć, „sklejając” wybrane regiony Woronoja.

Czwarty rozdział jest poświęcony wykrywaniu kolizji przemieszczających się względem siebie fragmentów pękniętego obiektu i symulacji ich ruchu pod wpływem sił odpychających. Również w tym zastosowaniu drzewa ósemkowe sprawdzają się jako struktura danych umożliwiające sprawne wykrywanie miejsc kolizji i określanie sił. Modelowanie sił między stykającymi się fragmentami obiektów w oparciu o dokładne zasady mechaniki, w tym uwzględnienie sił tarcia, jest bardzo trudne. Dlatego proponowane w pracy rozwiązanie jest oparte na podstawach empirycznych, zrealizowany algorytm jest wystarczająco szybki i daje efekty o dostatecznym stopniu realizmu na potrzeby gier komputerowych.

W rozdziale piątym uwaga jest poświęcona pękaniu obiektów cienkościennych ze szczególnym uwzględnieniem naczyń ceramicznych. Wzorec pęknięć wygenerowany za pomocą regionów Woronoja (przy użyciu opisanego w rozdz. 3 algorytmu nazwanego BFA, *Basic Fracture Algorithm*) może być zmodyfikowany przez wprowadzenie algorytmu EFA (*Enhanced Fracture Algorithm*), którego celem jest wprowadzenie dodatkowych modyfikacji pęknięć dla poprawienia efektu wizualnego. Powierzchnia pęknięcia ceramiki jest figurą fraktalową, zatem płaska powierzchnia pęknięcia będąca częścią wspólnego brzegu regionów Woronoja wygląda niezbyt realistycznie. W proponowanym w pracy rozwiązaniu algorytm BFA przetwarza wierzchołki drzewa ósemkowego od korzenia do pewnego ustalonego poziomu, poniżej którego jest używany algorytm EFA, korzystający z trójwymiarowej funkcji szumu w celu dodatkowego zniekształcenia pęknięć. Dodatkowo, część materiału podczas pęknięcia ceramiki może zamienić się w pył i wysypać się spomiędzy fragmentów. Przedstawione w podrozdz. 5.6 rozwiązanie umożliwi usunięcie „materiału” w otoczeniu pęknięcia w celu zasymulowania takich ubytków przy użyciu znanego algorytmu maszerujących sześcianów (*marching cubes*).

Podobne rozwiązanie zostało opisane w rozdziale szóstym dla „pełnych” brył. Trudność w tym przypadku polega na tym, że powierzchnie pęknięć są duże, co wymaga wprowadzenia dużej liczby dodatkowych wokseli do reprezentowania fragmentów tych powierzchni. Przekłada się to na większą złożoność obliczeniową algorytmu, zarówno czasową, jak i pamięciową. Również efekty uzyskane przy użyciu algorytmu dostosowanego do obiektów cienkościennych nie były zadowalające, zatem Autor zaproponował inny algorytm EFA, lepiej dostosowany do tego przypadku. Algorytm ten klasyfikuje wierzchołki sześciennych kostek (wierzchołków drzewa ósemkowego), „wiążąc je” z poszczególnymi regionami Woronoja na podstawie lokalnie zmodyfikowanej odległości od wierzchołków kostek na niższym poziomie. Dodatkowo istnieje możliwość podziału na fragmenty obiektów poddanych wstępnemu odkształceniu. Fragmenty odkształconego obiektu są poddawane przekształceniu odwrotnemu, wskutek czego odzyskują oryginalny kształt, ale uzyskane w ten sposób powierzchnie pęknięć nie są nienaturalnie płaskie.

Rozdział siódmy jest podsumowaniem wyników osiągniętych w pracy i przedstawia krótko problemy otwarte jako tematy przyszłych badań.

Opisany w p. 3.3.5 algorytm dzielenia fragmentów obiektu otrzymanych z przecięcia obiektu z regionami Woronoja na spójne kawałki polega na znajdowaniu składowych spójnych odpowiednich podgrafów 26-spójnego grafu sąsiedztwa wokseli. Polega to na wprowadzeniu identyfikatorów wokseli, otrzymanych z kodów Mortona zawierających informację o położeniu wokseli, a następnie na iteracyjnym zastępowaniu kodów (będących liczbami całkowitymi) przez większe kody wokseli sąsiednich. Zrealizowany algorytm równoległy jest zoptymalizowany na podstawie opisanych w pracy spostrzeżeń; jedno z nich jest sformułowane jako twierdzenie, podane z formalnym dowodem (jest to jedyne twierdzenie w pracy). Można mieć tu pewne zastrzeżenia, ponieważ teza i dowód twierdzenia są związane bezpośrednio z algorytmem, którego opis w treści pracy jest intuicyjny i raczej nieformalny. Moim zdaniem lepiej byłoby to twierdzenie sformułować tylko przy użyciu pojęć związanych z grafem sąsiedztwa wokseli i jego podgrafami, a opis opartej na twierdzeniu optymalizacji algorytmu umieścić po dowodzie. Podniosłoby to wartość pracy, ponieważ tak sformułowane twierdzenie mogłoby też być podstawą optymalizacji innych algorytmów rozwiązujących podobne zadania.

Praca jest napisana w języku angielskim; są w niej drobne błędy językowe, które jednak nie mają wpływu na łatwość zrozumienia tekstu. Podział pracy na rozdziały i jej opracowanie redakcyjne są bez zarzutu. Uwagę zwracają liczne, starannie wykonane ilustracje, które istotnie ułatwiają lekturę pracy. Pewien niedosyt pozostawia pominięcie w p. 3.2 opisu algorytmu klasyfikacji wierzchołków kostek (będących wierzchołkami drzewa ósemkowego) do regionów Woronoja; z treści pracy nie wynika, czy obliczane są odległości każdego wierzchołka od wszystkich ziaren, czy też zbiór sprawdzanych ziaren jest ograniczony do ziaren zawartych w kostkach większych (wierzchołków poziomu o 1 wyższego w drzewie) i ziaren regionów zawierających wierzchołki tych większych kostek. Ewentualna optymalizacja algorytmu klasyfikacji może nie mieć znaczenia dla niewielkiej (rzędu kilkunastu–kilkudziesięciu) liczby ziaren.

Część wyników opisanych w pracy była przedstawiona we wcześniejszych publikacjach Autora. Spis literatury obejmuje 58 pozycji; we wszystkich rozdziałach pracy Autor przeprowadził dyskusję opisanych w tej literaturze rozwiązań i oparł swoje rozwiązania na analizie zalet i wad algorytmów przedstawionych w cytowanych publikacjach. W mojej opinii dobór źródeł i sposób ich wykorzystania w pracy należy ocenić jako wzorowy.

Oryginalnym, w mojej opinii bardzo wartościowym dorobkiem Autora są przedstawione w pracy algorytmy — działające na nowoczesnym sprzęcie, tzn. na kartach graficznych wyposażonych w wiele procesorów, których duża moc obliczeniowa, biorąca się z równoległości obliczeń, nie jest łatwa do opanowania. Algorytmy te zostały zaimplementowane w języku CUDA, którego większość konstrukcji pochodzi z języka C, ale który w porównaniu z C ma wiele ograniczeń narzuconych przez sprzęt. Niezależnie od tych ograniczeń równoleglenie algorytmu wymaga wyodrębnienia podzadań, które można rozwiązywać niezależnie. Ma to na celu unikanie konfliktów w dostępie do pamięci i zapewnienie „lokalności” obliczeń. Struktura danych drzewa ósemkowego jest pod tym względem bardzo dobrze do-

pasowana do przetwarzania przez procesory karty graficznej. Zatem jeśli nawet część ograniczeń języka programowania zostanie w przyszłości usunięta (i na przykład będzie dopuszczalne rekurencyjne wywoływanie procedur, lub wymagania jednolitości obliczeń wątków realizowanych przez działające równoległe procesory staną się mniej rygorystyczne), to opisane w pracy algorytmy, moim zdaniem, nie zestarzeją się. Stąd wynika duża przydatność zaprezentowanych w pracy wyników w naukach technicznych — w grafice komputerowej, nie ograniczonej tylko do zastosowań w grach.

Podsumowując, uważam, że rozprawa spełnia ustawowe i zwyczajowe wymagania stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do dalszych etapów postępowania w przewodzie doktorskim.

Przemysław Kiciak

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

KWESTIONARIUSZ - RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ DLA WYDZIAŁU
ELEKTRONIKI I TECHNIK INFORMACYJNYCH POLITECHNIKI WARSZAWSKIEJ

Tytuł rozprawy:

Destruction of Sparse-Voxel-Octree objects using dynamic fracture patterns

Autor rozprawy:

mgr inż. Jakub Konrad Domaradzki

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)?

Tematyka rozprawy dotyczy problemu podziału wirtualnych obiektów geometrycznych na fragmenty, które powstają np. na skutek rozbicia obiektu na części. Celem algorytmów symulujących taki podział jest uzyskanie niejednorodnych fragmentów, których kształt i wielkość będą zmieniały się w zależności od charakterystyki obiektu i punktu uderzenia. Wskazane jest duże zróżnicowanie sposobu podziału, aby było ono jak najwierniejsze zjawisku rozbijania fizycznych obiektów.

Autor rozprawy sformułowała tezę mówiącą, że (tłumaczenie własne):

- Obiekty reprezentowane za pomocą rzadkiego drzewa ósemkowego nie potrzebują dodatkowych struktur przyspieszających, aby efektywnie implementować ich rozbijanie na części oraz wykrywanie kolizji pomiędzy nimi. Ponadto, ze względu na rozproszony charakter drzewa, wiele operacji można wykonywać dla różnych poziomów szczegółowości balansując pomiędzy dokładnością i wydajnością obliczeń.
- Wykorzystanie diagramów Woronoja do generowania wzorców pęknięć może prowadzić do symulowania zróżnicowanych form pęknięć obliczanych w czasie rzeczywistym bez konieczności przeprowadzania dodatkowych wstępnych obliczeń.
- Proces rozbijania obiektów bazujący na diagramach Woronoja może prowadzić do uzyskania wklęsłych fragmentów obiektów z powierzchniami wzbogaconymi o dodatkowe detale.

Teza sformułowana jest w sposób jasny i dotyczy aktualnego problemu będącego przedmiotem zainteresowania grafiki komputerowej. Rozwiązanie wspomnianego problemu wymaga rozwoju metod naukowych, a w szczególności dostosowania oraz rozwinięcie istniejących algorytmów. Efektywne rozwiązanie problemu rozbijania obiektów na fragmenty i ich dalszego animowania ma duże znaczenie praktyczne, ponieważ problem ten dotyczy szerokiego zakresu aplikacji takich, jak np. gry komputerowe.

Rozprawa ma charakter analityczno-implementacyjny, ponieważ zaproponowany w niej został algorytm rozbijania obiektów na fragmenty oraz algorytm wykrywania kolizji pomiędzy tymi fragmentami. Autor zaprezentował rezultaty działania implementacji algorytmu testując jego działanie na przykładzie kilku charakterystycznych obiektów. Przetestował wydajność oraz jakość działania algorytmu.

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?

Autor rozprawy przedstawił krótki przegląd technik wykorzystujących rzadkie drzewa ósemkowe (ang. sparse voxel octree, SVO) do reprezentacji obiektów w grafice komputerowej.

Wspomniane zostało zastosowanie SVO w renderingu oświetlenia globalnego, metodzie śledzenia promieni, w technice przesłaniania środowiska oraz do animacji obiektów. W Rozdziale 2 omówione zostały podstawowe zagadnienia związane z budową i wizualizacją modeli SVO. Autor przedstawił również ideę kodów Mortona, które wykorzystuje we własnej metodzie tworzenia pęknięć. Drugą część rozdziału zajmuje omówienie technik symulowania pęknięć, które podzielone zostały na metody geometryczne, metody elementów skończonych, modele kohezyjne oraz wykorzystujące grafy systemów sprężynowo-masowych. Opisy poparte zostały odpowiednimi odesłaniami do literatury naukowej. Autor omawia również techniki tworzenia wzorów podziału. Rozdział kończy się zaprezentowaniem techniki wykrywania kolizji pomiędzy obiektami reprezentowanymi za pomocą SVO.

Przegląd literatury wykonany został w sposób należyty, a wnioski z przeglądu sformułowane zostały w sposób jasny i przekonujący.

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

Autor rozprawy opracował oraz zaimplementował algorytmy, które symulują proces rozbijania obiektów na części. Podstawowym założeniem jest reprezentowanie obiektu za pomocą struktury SVO. Jest to ciekawe podejście, które odchodzi od wielokątowej reprezentacji obiektów na rzecz szybszego i prostszego ich przetwarzania w strukturze wokselowej. W szczególności idea ta jest korzystna z punktu widzenia technik syntezy obrazów opartych na śledzeniu promieni. Wzór trójwymiarowych pęknięć tworzony jest z wykorzystaniem diagramów Woronoja, inicjalizowanych za pomocą zbioru punktów. Zmiana położenia tych punktów pozwala na kształtowanie wzoru pęknięć. W trzecim rozdziale pracy prezentowany jest algorytm podziału przestrzeni na wypukłe obszary o gładkich ścianach. Idea tego algorytmu sprowadza się do rozszerzeniu SVO o woksele reprezentujące wewnętrzne ściany podziału. W szczególności Autor uwzględnił możliwość podziału obiektów na niezależne części, tzw. wyspy, wspomagając się podczas analizy ich ciągłości reprezentacją położenia wokseli za pomocą kodów Mortona. Wykrywanie wysp bazuje na metodzie CCL (ang. connected-component labeling), która została zaimplementowana w środowisku CUDA.

Naturalnym uzupełnieniem efektu podziału obiektów na części jest animowanie tych części z uwzględnieniem ich wzajemnego oddziaływania na siebie. W pracy zaproponowany został algorytm wykrywania kolizji pomiędzy częściami podziału. Bazuje on na technice LDI (ang. Layer Depth Images), w której rolę struktury wokseli pełni SVO. Hierarchia SVO jest natomiast wykorzystywana do wykrywania kolizji na różnych poziomach szczegółowości obiektów, co umożliwia balansowanie pomiędzy precyzją wykrywania kolizji i czasem działania algorytmu.

W Rozdziale 5 algorytm podziału obiektów rozszerzony został o możliwość podziału obiektów o cienkich ściankach i pustym wnętrzu. Zastosowano modyfikację, która wprowadza nieregularności do wzoru podziału czyniąc go bardziej naturalnym. Ponadto zastosowana technika umożliwia generowanie pustych przestrzeni pomiędzy powstającymi częściami obiektu. Idea metody sprowadza się do poszukiwania wokseli reprezentujących powierzchnie podziału na różnych poziomach SVO. W ten sposób zakłócany jest regularny kształt diagramów Woronoja. Generowanie pustych przestrzeni w pęknięciach zaimplementowane zostało za pomocą algorytmu Marching Cubes.

W Rozdziale 6 zaproponowana została technika generująca nieregularne wzory na powierzchniach podziału (w pierwotnym algorytmie były one płaskie). Wykorzystano do tego celu algorytm z poprzedniego rozdziału tworzący powierzchnie podziału na różnych poziomach SVO. Algorytm ten jednak stosowany jest wielokrotnie dla danej powierzchni podziału rekurencyjnie modyfikując poziom jej szczegółowości.

Podsumowując stwierdzam, że Autor rozwiązał postawiony problem używając do tego właściwych metod i przyjmując uzasadnione założenia.

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?

Algorytmy zaproponowane w rozprawie doktorskiej przyczyniają się do rozwoju techniki grafiki komputerowej opartych na wokselowej reprezentacji obiektów. Z dużym prawdopodobieństwem można stwierdzić, że najbliższa przyszłość techniki syntezy obrazów związana będzie z algorytmami śledzenia promieni. Reprezentacja SVO bardzo dobrze wpisuje się w ten trend będąc naturalnym sposobem reprezentacji sceny w technice śledzenia promieni.

Autor rozprawy zaproponował szereg rozwiązań, które rozwijają techniki dzielenia obiektów na części. Oparł się na istniejących algorytmach, które zostały jednak umiejętnie użyte do osiągnięcia pożądanego efektu wizualnego. Ciekawym rozwiązaniem jest analiza struktury obiektów dla różnych poziomów SVO, która wprowadza nieregularności w kształcie tworzonych obiektów.

Opracowane techniki wpisują się pozytywnie w obecne badania prowadzone w zakresie symulowania rozbijania obiektów. Prace prowadzone przez autora należy uznać za aktualne i będące obecnie w zakresie zainteresowania środowisk zajmujących się grafiką komputerową czasu rzeczywistego.

Doktorant jest współautorem pięciu publikacji, w tym jednej opublikowanej w czasopiśmie (IF = 0.63). Dwie z tych publikacji, zaprezentowane w ramach konferencji WSCG (CORE B), są bezpośrednio związane z tematyką rozprawy. Osobiście doceniam jakość konferencji WSCG, a przede wszystkim fakt, że jest to konferencja bezpośrednio związana z grafiką komputerową. Biorąc jednak pod uwagę jakość opisywanych w rozprawie rozwiązań, Autor mógł przygotować publikację w czasopiśmie, którego recenzenci jednoznacznie potwierdziliby wartość naukową proponowanych algorytmów.

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

Praca została dobrze napisana w przekonujący sposób opisując proponowane rozwiązania. Doceniam jakość pisowni angielskiej, która w moim odczuciu jest bardzo dobra. Chciałbym również wyróżnić zamieszczone rysunki, które są przemyślane i znacząco ułatwiają zrozumienie treści pracy.

Drobne błędy, które zauważyłem podczas czytania pracy:

- podrozdział 2.1 nie powinien zaczynać się od rysunku (podobnie 3.3.7),
- „... a vertex of the Voronoi diagram).” -> „... a vertex of the Voronoi diagram.,
- brak tytułu pracy doktorskiej na liście referencji (pozycja [8]).

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

Moja główna uwaga związana jest z weryfikacją uzyskiwanych rezultatów, tzn. z oceną wyników działania zaproponowanych algorytmów. W pracy doktorskiej do każdej wersji algorytmu autor prezentuje po cztery przykładowe sceny. O ile te przykłady są wystarczające do wykazania faktu działania implementacji algorytmu, przydałaby się wnikliwsza analiza wpływu parametrów algorytmu na jakość animacji. Jakość rozumiem jako poprawność i estetykę renderingu obiektów powstałych po rozbiciu, ze szczególnym uwzględnieniem wewnętrznych powierzchni oraz wzoru rozbicia. W pracy mogłyby zostać zamieszczone przykładowe powiększenia obiektów ilustrujące jak dobór parametrów decyduje o jakości. Próby takiej analizy w postaci Rys. 5.8 oraz 6.6 są moim zdaniem zbyt ogólnie opisane i nie pozwalają czytelnikowi na powiązanie wartości parametrów z uzyskiwanym efektem graficznym. Rozwiązaniem wyczerpującym temat oceny jakościowej działania algorytmów, byłoby zebranie opinii użytkowników na temat tej jakości w konfrontacji z innymi rozwiązaniami literaturowymi. Sytuacji nie ratują dodane do pracy materiały wideo, które

zarejestrowane zostały w zbyt małej rozdzielczości, aby można było ocenić jakość renderingów. Nie zastosowano również dostatecznie dobrej filtracji redukującej aliasing po czasie.

W przypadku analizy wydajnościowej wskazane byłoby zilustrowanie w postaci wykresów wpływu parametrów na czas renderingu. Struktura SVO pozwala na łatwe obliczenie statystyk dla poszczególnych obiektów (np. objętości obiektu, liczby wokseli brzegowych, itp.). Te statystyki można zestawzić z wydajnością poszczególnych faz algorytmu. Zachęcam Autora do przedstawienia podobnych wyników w czasie obrony i zaproponowanie wytycznych, którymi powinni kierować się implementujący jego algorytmy w rzeczywistych aplikacjach.

7. Jaka jest przydatność rozprawy do nauk technicznych?

Zaproponowana metoda symulowania rozbijania obiektów w oparciu o ich reprezentację w postaci SVO jest aktualnym tematem w zakresie badań prowadzonych w naukach technicznych. Znajduje się w kręgu zainteresowań grafiki komputerowej, a w szczególności technik renderingu w tym renderingu w czasie rzeczywistym.

Nie do końca zgadzam się ze stwierdzeniem Autora, że czasy działania algorytmu na poziomie kilkunastu bądź kilkudziesięciu milisekund (Tabela 3.1) są wystarczające do zastosowania algorytmu w obecnych grach komputerowych. Jednak w perspektywie najbliższych lat, proponowane rozwiązania mogą zyskać praktyczną wartość w technikach śledzących promienie.

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 rozprawy wniósł odpowiedni wkład do dziedziny nauk inżyniersko-technicznych dyscypliny naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja. 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).

Radosław Bentkiewicz