

Szczecin, 22.01.2020r.

STRESZCZENIE ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

Pomiar charakterystyk czułości na kontrast w peryferyjnych obszarach widzenia oraz ich zastosowanie do przyspieszania syntezy obrazów

Autor : mgr inż. Michał Chwesiuk

Promotor : dr hab. inż. Radosław Mantiuk, prof. ZUT

Algorytmy komputerowe syntezy obrazu są kosztowne obliczeniowo i wymagają znacznych mocy obliczeniowych procesorów. W grafice komputerowej czasu rzeczywistego czas na proces syntezy jest ograniczony, co sprawia, że kluczowe staje się zastosowanie technik zmniejszających wymagany nakład obliczeniowy. Jednym ze sposobów przyspieszania syntezy obrazów jest wykorzystanie cech układu wzrokowego człowieka, który wybiórczo interpretuje informację o obserwowanej scenie. Przykładowo można pominąć syntezę tych informacji, które nie będą widziane przez człowieka z uwagi na jego ograniczoną czułość na kontrast.

W pracy zmierzona została czułość na kontrast układu wzrokowego człowieka dla bodźców achromatycznych, chromatycznych i mieszanych dla widzenia centralnego oraz peryferyjnego. Pomiar odbył się przy wykorzystaniu eksperymentu percepcyjnego, w którym obserwatorom przedstawiony został bodziec w postaci wzoru Gabora. Nowatorska metodologia przeprowadzenia eksperymentu polegała na wykorzystaniu eye trackera do zapewnienia poprawności zachowania wymaganych kątów widzenia. Wyniki pomiarów pozwoliły zbudować analityczny model zależności między czułością na kontrast a kątem patrzenia. Rozszerzając obecny stan wiedzy, taki model zaproponowany został dla bodźców chromatycznych. Zmierzone wartości czułości na kontrast zastosowane zostały w aplikacji syntezy obrazów metodą śledzenia promieni. Wykorzystanie selektywnego próbkowania obrazu, w którym częstotliwość próbkowania wirtualnej sceny uzależniona jest od kierunku patrzenia obserwatora, zredukowało liczbę śledzonych promieni i tym samym przyspieszyło syntezę obrazu. Kolejnym wątkiem pracy było eksperymentalne zbadanie opóźnienia układu wzrokowego w identyfikacji informacji wysokoczęstotliwościowej podczas zmiany widzenia z peryferyjnego na centralne. Uzyskane rezultaty pozwalają określić wymaganą szybkość systemów renderingu i wizualizacji obrazów wykorzystujących eye trackery.

Rozprawa doktorska wskazuje na możliwość wykorzystania cechy układu wzrokowego, jaką jest ograniczona czułość na kontrast, do określania granic ulepszania parametrów systemów do renderingu i wyświetlania obrazów.

23.01.2020 Michał Chwesiuk

DOCTORAL THESIS ABSTRACT

Measurement of contrast sensitivity characteristics in peripheral vision and its application in the acceleration of image synthesis

Author : mgr inż. Michał Chwesiuk

Supervisor: dr hab. inż. Radosław Mantiuk, prof. ZUT

Image synthesis computer algorithms are computationally expensive and require the significant computing power of processors. In real-time computer graphics, the time for the synthesis process is limited, which makes it crucial to use techniques that reduce the required computational cost. One of the ways to accelerate the synthesis of images is to use the features of the human visual system, which selectively interprets information about the observed scene. For example, you can skip the synthesis of the information that will not be seen by a human due to its limited sensitivity to contrast.

In this work, the contrast sensitivity of the human visual system was measured for achromatic, chromatic and mixed stimuli for central and peripheral vision. The measurement was made using a perceptual experiment in which the stimulus in the form of the Gabor pattern was presented to the observers. The innovative experiment methodology introduced the usage of an eye tracker to ensure that the required gaze direction was maintained correctly. The measurement results allowed to develop an analytical model describing the relationship between contrast sensitivity and viewing angle. To extend the state of the art such a model was proposed for chromatic stimuli. The measured contrast sensitivity was used in the image synthesis system that uses the ray tracing algorithm. The selective image sampling, in which the sampling frequency of the virtual scene depends on the gaze direction of the observer, reduced the number of traced rays and thus accelerated the image synthesis process. Another topic of the work was the experimental study of visual system latency in identifying high-frequency information during the change of vision from peripheral to central. The obtained results allow determining the required speed of rendering systems and visualization of images using eye trackers.

The doctoral thesis indicates the possibility of using the visual system feature, which is limited contrast sensitivity, to determine the boundaries of improving the parameters of rendering and image display systems.

23.01.2020 Michał Chwesiuk

Prof. dr hab. inż. Bogusław Cyganek
Wydział Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji
Katedra Elektroniki
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie
cyganek@agh.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej
mgra inż. Michała Chwesiuka
Pomiar charakterystyk czułości na kontrast w peryferyjnych
obszarach widzenia oraz ich wykorzystanie do przyspieszania syntezy
obrazów

Wstęp

Recenzja rozprawy doktorskiej Pana mgra inżyniera Michała Chwesiuka pt. „*Pomiar charakterystyk czułości na kontrast w peryferyjnych obszarach widzenia oraz ich wykorzystanie do przyspieszania syntezy obrazów*”, opracowanej w roku 2019 na Wydziale Informatyki w Zachodniopomorskim Uniwersytecie Technologicznym w Szczecinie. Promotorem pracy jest Pan dr hab. inż. Radosław Mantiuk, prof. ZUT. Przygotowanie recenzji zostało zlecone przez Pana Prorektora ds. Nauki, prof. dra hab. inż. Jacka Przepiórskiego.

1. Charakterystyka zagadnienia naukowego podjętego w pracy, tezy pracy oraz umiejscowienie podjętego zagadnienia w nauce światowej

Rozprawa doktorska Pana magistra Michała Chwesiuka opisuje przeprowadzone eksperymenty dotyczące pomiaru czułości ludzkiego układu wzrokowego na kontrast w peryferyjnych obszarach widzenia, jak również pomiaru wpływu całkowitego opóźnienia odpowiedzi systemu na percepcję obrazu, a następnie zbadanie wpływu tych zjawisk na możliwość przyspieszenia syntezy obrazów poprzez dynamiczną adaptację parametrów wyświetlania uzależnioną od kierunku obserwacji. Badanie te mają duże znaczenie w nowoczesnych systemach multimedialnych, takich jak systemy wirtualnej rzeczywistości, czy też monitorów i wyświetlaczy graficznych.

Podjęty przez p. mgra inż. Michała Chwesiuka problem badawczy uważam za istotny, zarówno od strony poznawczej, jak i technologicznej. W pracy została przedstawiona następująca teza „*Uwzględnienie progów widzialności informacji dla peryferyjnych obszarów widzenia umożliwia zmniejszenie częstotliwości próbkowania, a co za tym idzie przyspieszenie syntezy obrazów*”. Oprócz

tezy, na początku pracy zostały przedstawione cele badawcze dotyczące opracowania środowiska eksperymentalnego do pomiaru czułości na kontrast przy widzeniu peryferyjnych, wykonanie stosownych eksperymentów mierzących czułość na kontrast dla bodźców chromatycznych, achromatycznych oraz mieszanych, jak również przeprowadzenie eksperymentów prowadzących do określenia możliwego opóźnienia percepcji obiektów w odpowiedzi na zmianę widzenia z peryferyjnego na centralne. Ponadto, praca zakłada wykonanie aplikacji umożliwiających weryfikację opracowanych modeli do syntezy obrazów z uwzględnieniem widzenia kierunkowego, jak również wyświetlania obrazu w wyświetlaczach stereoskopowych z akomodacją.

Rozprawa doktorska p. mgra inż. Michała Chwesiuka liczy 100 stron. Została ona podzielona na 3 główne rozdziały, uzupełnione przez podsumowanie oraz obszerny spis literatury dotyczącej przedmiotu badań. Przedstawiona praca ma charakter teoretyczno-eksperymentalny i plasuje się w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

2. Najważniejsze osiągnięcia naukowe przedstawione w rozprawie, ich oryginalność oraz pozycja w stosunku do stanu wiedzy

Pierwsze osiągnięcie naukowe Pana mgra inż. Michała Chwesiuka polega na stworzeniu stanowiska pomiarowego i wykonaniu serii pomiarów czułości ze względu na kontrast układu wzrokowego człowieka. Zbadane zostały progi kontrastów bodźców chromatycznych, achromatycznych oraz mieszanych. Na podstawie pomiarów zaproponowany został analityczny model. Zarówno same pomiary, jak i zaproponowany model, mają zastosowanie w szeroko rozumianych algorytmach syntezy obrazu. Umożliwiły one między innymi system renderingu obrazu czuły na kierunek patrzenia, dzięki czemu możliwe było zmniejszenie nakładu obliczeniowego w obszarach peryferyjnych patrzenia.

Kolejne pomiary, wykonane przez p. mgra inż. Michała Chwesiuka, dotyczyły oszacowania całkowitego opóźnienia systemu renderingu obrazów w funkcji odległości od punktu centralnego obrazu. Pomiary te umożliwiły podanie maksymalnych wartości odpowiedzi systemu, które nie powodują zauważalnych i niekorzystnych efektów wizualnych związanych z ewentualnym opóźnieniem.

Powyższe eksperymenty zostały przeprowadzone w zbudowanym torze pomiarowym i z pomocą grup ochotników. Zorganizowanie tego typu eksperymentów, jak również opracowanie otrzymanych danych, są czynnościami żmudnymi, które wymagają precyzyjnego zaplanowania odpowiednich scenariuszy, a następnie ich realizacji.

Otrzymane charakterystyki czułości na kontrast ludzkiego układu wzrokowego zostały wykorzystane w stworzonym algorytmie śledzenia promieni w środowisku sztucznej rzeczywistości (ang. *virtual reality*). Doktorant wykazał, że w obszarach peryferyjnych, właśnie ze względu na mniejszą czułość, możliwe jest renderowanie znacznie mniejszej ilości promieni, co prowadzi do mniejszych wymagań na moc obliczeniową i, w rezultacie, na skrócenie samego czasu obliczeń.

Kolejny obszar aplikacyjny dotyczył zbadania możliwości adaptacji parametrów wyświetlania na różnych typów wyświetlaczy. W szczególności zbudowana została hybrydowa metoda dekompozycji obrazu w wyświetlacz wielopłaszczyznowym z polem światła (ang. *light field*). Zastosowana metoda polega na doborze linowego procesu mieszania oraz syntezy pól światła, zależnego od kierunku patrzenia obserwatora, jak również od rodzaju przedstawianej sceny. Wykazano, że dzięki temu

podejściu możliwe jest skrócenie czasu renderingu i w konsekwencji synteza obrazu w tzw. trybie czasu rzeczywistego.

Wyżej wymienione osiągnięcia były możliwe dzięki zbudowaniu i oprogramowaniu odpowiedniego środowiska badawczego. Co jednak szczególnie zasługuje na uznanie to przeprowadzenie często skomplikowanych logistycznie eksperymentów, wymagających między innymi zaangażowania oraz odpowiedniego przygotowania biorących w nich udział ochotników. Zarówno same pomiary, jak i zaproponowane modele i metody renderingu obrazów, sterowanych kierunkiem patrzenia, świadczą o dużej pomysłowości oraz dojrzałości naukowej Pana magistra inżyniera Michała Chwesiuka. Stanowią one istotny wkład w dziedzinę grafiki i widzenia komputerowego, jak również posiadają duże znaczenie praktyczne.

3. *Słabe strony rozprawy, jej główne wady oraz zagadnienia dyskusyjne*

Rozprawa doktorska p. mgra inż. Michała Chwesiuka napisana jest starannie, na wysokim poziomie, zarówno pod kątem naukowym, jak również edycyjnym. Tym niemniej, praca zyskałaby na czytelności gdyby w kilku rozdziałach Autor zamiast kolejnych stron tekstu umieścił tabele podsumowujące główne parametry eksperymentów. W pracy nie zauważyłem istotnych błędów merytorycznych, ani też edycyjnych. Niżej wymienione zagadnienia mają charakter dyskusyjny.

Znaczenie oraz rola przestrzeni kolorów LMS nie do końca jest jasna. Uzyskiwana jest ona poprzez liniową transformację z przestrzeni XYZ, której wartości podane są *a priori*, bez głębszej analizy. Nie jest jasne w jaki sposób wartości te zostały obliczone, ani też czy są jedynymi możliwymi, czy też są w jakimś sensie wartościami optymalnymi. Współrzędne LMS są następnie transformowane do współrzędnych ARY, na podstawie których obliczany jest kontrast wartości składowych. Jednakże nie jest jasne czemu wartości kontrastu nie miałyby być obliczone wprost z wartości z przestrzeni XYZ.

Praca zyskałaby również na czytelności, gdyby zawarte w niej wzory zostały odpowiednio ponumerowane, co w przypadku prac naukowych jest raczej regułą, niż wyjątkiem. Wtedy na przykład łatwiej byłoby zadać pytanie o pierwszy wzór na stronie 46, dotyczący obliczania wartości prawdopodobieństwa wypadkowego dla wszystkich składników kontrastu, jak opisano w tekście za pomocą sumowania, podczas gdy wzór dotyczy iloczynu prawdopodobieństw, co prawdopodobnie odpowiada założeniu o ich niezależności.

Również ciekawe byłoby nieco głębsze omówienie filtru Gabora, o którym mowa w rozdziale 2.1.1. Autor wspomina tam, że jest to „filtr linowy wykorzystywany na obrazach celem ich analizy”. Ciekawe byłoby więc wytłumaczenie w relacji do których swoich parametrów filtr Gabora jest filtrem linowym, jak również do jakiego typu analizy obrazów może on posłużyć.

Pewnym ograniczeniem zaproponowanych rozwiązań jest konieczność korzystania z urządzenia do śledzenia kierunku patrzenia (ang. *eye tracker*). Autor jest świadomy ograniczeń i nakładów obliczeniowych z tym związanych. Jednakże ciekawa i wartościowa byłaby bardziej pogłębiona analiza tego problemu. Dla przykładu, zaproponowany w rozdziale 2.4.4 układ śledzenia w postaci kamery oraz źródła oświetlenia podczerwonego (ang. *infra-red*), to być może skuteczne rozwiązanie w wersji laboratoryjnej, jednakże wydaje się ono być nie do końca użyteczne w przypadku rozwiązań aplikacyjnych, zarówno ze względu na konieczność zbudowania prawdopodobnie dość drogiego urządzenia, ale również ze względu na fakt zmęczenia układu wzrokowego oświetlanego promieniowaniem podczerwonym. Nie jest też jasne, jak taki układ śledzenia radzi sobie z ruchami sakadycznymi oczu.

Głębszej analizy wymaga powstawanie zjawiska aliasingu, o którym mowa w rozdziale 3.1.4 i kolejnych. Nie do końca jest jasne, czy wspomniane migotanie w obszarach peryferyjnych to wyłącznie przyczyna aliasingu, a jeżeli tak, to jaki jest dokładny mechanizm jego powstawania, czy też być może jest to związane z innymi parametrami toru przetwarzania, takimi jak np. szybkość zapisu do/z pamięci, itd.

W większości eksperymentów analizowane są sceny statyczne, np. zagadnienie to jest wspomniane w rozdziale 3.2.5. Jednakże w praktyce wiele scen charakteryzuje się dynamicznymi zmianami. W jakim więc stopniu wyniki otrzymane dla scen statycznych odnoszą się również do scen dynamicznych?

Należy jednak podkreślić, że powyższe pytania mają charakter polemiczny i dotyczą dalszego wyjaśnienia, bądź też zawierają sugestie rozszerzenia pewnych zagadnień natury naukowej poruszonych w rozprawie.

4. Przydatność rozprawy dla nauk technicznych

Opisane w rozprawie doktorskiej p. mgra inż. Michała Chwesiuka dane eksperymentalne, jak i skonstruowane na ich podstawie modele oraz wykonane realizacje praktyczne bazujące na tych pomiarach są oryginalne i wnoszą istotny przyczynek zarówno do dalszego poznania parametrów ludzkiego układu wzrokowego, jak i do możliwości przystosowania technologii do tych parametrów. Badania tego typu są bardzo ważne, gdyż nie tylko dostarczają nowej wiedzy, ale również przyczyniają się do rozwoju nowych, a często przełomowych, technologii. Dla przykładu, obserwacje możliwości percepcyjnych człowieka stały za wynalezieniem urządzeń do przedstawiania ruchomych obrazów, najpierw w postaci kinetoskopu zbudowanego w 1892 roku przez Thomasa Alwisa Edisona, a następnie w postaci tak zwanego kinematografu opatentowanego w 1895 roku przez braci Lumière. To właśnie powstanie tego ostatniego uznawane jest za początek kina, które wywarło olbrzymi wpływ na kulturę w ostatnim stuleciu, jak również ma doniosłe znaczenie obecnie, a niedługo od swojego debiutu przyczyniło się do powstania telewizji, jak również nowoczesnych technik multimedialnych, jakie znamy obecnie.

Jak zostało to wykazane w rozprawie p. mgra inż. Michała Chwesiuka, wyniki jego pomiarów, jak również opracowane na tej podstawie modele i algorytmy, umożliwiają dostosowanie parametrów wyświetlania, czy też tworzenia, obrazu w różnorodnych typach wyświetlaczy elektronicznych, w funkcji kierunku obserwacji widza. Jak pokazano w pracy, dzięki takiemu mechanizmowi adaptacji możliwe jest odpowiednie ograniczenie nakładów obliczeniowych, dzięki możliwemu ograniczeniu ilości przetwarzanej informacji podczas dynamicznego procesu tworzenia sceny w peryferyjnych lokalnych obszarach wyświetlania. Samo zjawisko widzenia peryferyjnego i związanych z tym ograniczeń percepcji jest dobrze znane. Jednakże opracowanie ilościowych parametrów, stanowi bazę naukową do opracowania skutecznych algorytmów tworzenia scen uwzględniających kierunkowość widzenia. Tym niemniej, rozwiązania takie bazują na skutecznych technologiach śledzenia kierunku widzenia, które same podlegają ciągłym badaniom, jak również udoskonaleniom technologicznym.

Podsumowując, otrzymane przez p. mgra inż. Michała Chwesiuka wyniki eksperymentalne, jak również opracowanie na ich podstawie modele i algorytmy mają istotne znaczenie dla nauk technicznych, zarówno w aspekcie osiągnięć teoretycznych, jak i możliwości aplikacyjnych.

5. Charakterystyka działalności naukowej, w tym publikacyjnej, Doktoranta

Oprócz przedstawionych w poprzednich rozdziałach analiz dotyczących głównych eksperymentów oraz metod zaprezentowanych w rozprawie, istotnym aspektem jest działalność naukowa oraz publikacyjna Doktoranta. Z nadesłanych informacji, jak również z analizy materiałów dostępnych w Internecie, wynika, że p. mgr inż. Michał Chwesiuk jest współautorem siedmiu publikacji naukowych. Prace te wpisują się w dyscyplinę informatyka, a w szczególności w dziedzinę wizualizacji oraz grafiki komputerowej. Znaczna część tych publikacji to materiały konferencyjne, w przypadku trzech z nich p. Michał Chwesiuk jest pierwszym autorem. Z kolei ostatnia publikacja z roku 2019, w której p. Michał Chwesiuk jest jednym z autorów, ukazała się w czasopiśmie *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, którego aktualny tzw. *impact factor* wynosi $IF=3,78$.

Wszystkie powyższe osiągnięcia świadczą o znacznym zaangażowaniu naukowym, jak również o aktywności badawczej i publikacyjnej oraz rozpoznawalności w periodykach międzynarodowych p. mgra inż. Michała Chwesiuka.

6. Podsumowanie

Podsumowując stwierdzam, że **postawione w rozprawie zagadnienia badawcze zostały prawidłowo rozwiązane, postawiona w rozprawie teza została wykazana, a plan badawczy zrealizowany**. Uzyskane rezultaty stanowią oryginalny własny wkład Autora rozprawy Pana mgra inżyniera Michała Chwesiuka w rozwój dyscypliny naukowej informatyka techniczna i telekomunikacja, a w szczególności dotyczą nowoczesnych metod wizualizacji oraz grafiki komputerowej. Pan mgr inż. Michał Chwesiuk wykazał się przy tym dobrą znajomością metod i algorytmów tworzenia oraz przetwarzania obrazów, zarówno w systemach komputerowych, jak i w ludzkim układzie wzrokowym, a ponadto dobrą znajomością analizy danych. Wykazał się on również opanowaniem naukowego warsztatu badawczego, zarówno od strony teoretycznej, jak i eksperymentalnej. Wszystko to świadczy o dojrzałości naukowej Pana mgra inż. Michała Chwesiuka.

Recenzowaną pracę oceniam jako **spełniającą** wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Wnioskuje o jej przyjęcie oraz o dopuszczenie Pana magistra inżyniera Michała Chwesiuka do publicznej obrony.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Michała Chwesiuka pt.: „Pomiar charakterystyk czułości na kontrast w peryferyjnych obszarach widzenia oraz ich wykorzystanie do przyspieszania syntezy obrazów”

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Radosław Mantiuk, prof. ZUT

1. Aktualność i znaczenie tematyki rozprawy

W rozprawie podjęto problem zbadania charakterystyk układu wzrokowego człowieka, które odpowiednio wykorzystane, mogą zapewnić wzrost efektywności metod syntezy i renderingu obrazów graficznych. Obecnie istnieje duże zapotrzebowanie na syntetyczne grafiki przypominające zdjęcia wykonane aparatem fotograficznym, które wraz z wizualizacjami 3D znalazły zastosowanie w medycynie, w projektowaniu, w różnego rodzaju symulacjach, a także w grach komputerowych. Jednakże, do przygotowania fotorealistycznych wizualizacji wykorzystuje się algorytmy o wysokiej złożoności, wymagające użycia komputerów o dużej mocy obliczeniowej. Wymagania takich algorytmów są szczególnie trudne do spełnienia w przypadku systemów, gdzie kluczowym czynnikiem jest czas renderowania obrazu. Dla takich obszarów poszukuje się rozwiązań, które będą w stanie sprostać ograniczeniom czasowym, przy jednoczesnym zachowaniu zadawalającej jakości obrazu. W ostatnich latach dużym zainteresowaniem cieszą się metody bazujące na analizie ruchu oka i charakterystyce przetwarzania informacji pozyskiwanych za pomocą układu wzrokowego. Dzięki dynamicznemu rozwojowi algorytmów przetwarzania obrazów oraz technologii umożliwiających śledzenie ruchu oka, w szczególności w zakresie wideo-okulografii, możliwym staje się pozyskiwanie aktualnych pozycji skupienia wzroku z dużą precyzją, w nieuciążliwy dla obserwatora sposób.

Prace we wspomnianych obszarach są ciągle rozwijane, więc podjęcie przez Autora rozprawy tematu, który rozszerza możliwości efektywnej syntezy obrazów z wykorzystaniem metod okulografii uważam za aktualne i celowe.

2. Zawartość rozprawy

Rozprawa ma charakter eksperymentalny z elementami analitycznymi. Stanowi ona spójną tematycznie całość. Składa się z pięciu rozdziałów wraz z wprowadzeniem i podsumowaniem, a każdy rozdział, poza ostatnim, kończy się własnym podsumowaniem. We wprowadzeniu Autor rozprawy krótko scharakteryzował problem oraz przedstawił motywacje uzasadniające podjęcie analizowanego tematu. Następnie zdefiniował tezę pracy:

Uwzględnienie progów widzialności informacji dla peryferyjnych obszarów widzenia umożliwia zmniejszenie częstotliwości próbkowania, a co za tym idzie przyspieszenie syntezy obrazów.

Natomiast, jako główny cel swojej pracy Autor postawił:

Pomiar charakterystyk układu wzrokowego człowieka w kontekście dostrzegalnych progów kontrastów bodźców wzrokowych, uwzględniając kierunkowość widzenia oraz kolor, a następnie opracowanie analitycznego modelu wskazującego prawdopodobieństwo spostrzeżenia bodźca o zadanym kontraście.

W mojej opinii cel pracy powinien być lekko przeformułowany. Część: „uwzględniając kierunkowość widzenia oraz kolor”, należałoby zmienić na „uwzględniając ich kolor i kierunkowość widzenia”. W pierwszej wersji nie bardzo wiadomo, o jaki kolor chodzi.

Cel główny pracy został uzupełniony o 5 celów szczegółowych, wśród których znalazły się:

- (1) *Opracowanie środowiska eksperymentalnego do pomiaru progu czułości na kontrast dla widzenia peryferyjnego. Opracowanie oraz implementacja eye trackera o częstotliwości zapewniającej precyzyjną rejestrację ruchów sakadycznych.*
- (2) *Opracowanie i wykonanie eksperymentu mierzącego czułość na kontrast dla bodźców chromatycznych i achromatycznych w peryferyjnych obszarach widzenia.*
- (3) *Analiza wyników i opracowanie modeli czułości na kontrast dla układu wzrokowego człowieka w zależności od częstotliwości sygnału, typu bodźca i kąta widzenia.*
- (4) *Opracowanie i wykonanie eksperymentu mierzącego opóźnienie percepcji obiektów spowodowane zmianą z widzenia peryferyjnego na centralne.*
- (5) *Aplikacja opracowanych modeli w algorytmach syntezy obrazów uwzględniającym (pisownia oryginalna) widzenie kierunkowe. Wykorzystanie modeli w wyświetlaczach stereoskopowych z akomodacją.*

Rozdział pierwszy stanowi kompendium wiedzy na temat anatomii i fizjologii układu wzrokowego. Przedstawiono w nim budowę oka oraz proces przetwarzania sceny, pozyskanej za pomocą wzroku. Omówiono cechy widzenia centralnego i peryferyjnego w kontekście czułości na natężenie światła, percepcji barw oraz postrzegania ruchu. W rozdziale tym scharakteryzowano także składowe ruchy oka wynikające ze sposobu działania układu wzrokowego. Zdefiniowano również pojęcie kontrastu i funkcji czułości na kontrast. Wiedza ta jest kluczowa dla udowodnienia postawionej tezy i osiągnięcia założonego celu.

W rozdziale drugim przedstawiono zestaw eksperymentów ukierunkowanych na wyznaczenie charakterystyki czułości na kontrast. Dokonany w tej części rozprawy przegląd literaturowy wskazuje, że w tym obszarze zrealizowano już szereg podobnych badań, również z użyciem technologii śledzenia ruchu oka. Badania zaprezentowane w rozprawie doktorskiej stanowią ich rozszerzenie polegające na zastosowaniu nowych bodźców o nowych kierunkach kolorów, łączących składniki chromatyczne i achromatyczne. Eksperymenty, które wymuszają utrzymanie wzroku we wskazanym miejscu są niekomfortowe dla obserwatora, ze względu na nienaturalny sposób pracy układu wzrokowego. Pojawienie się bodźca poza obszarem widzenia centralnego powoduje naturalny odruch spojrzenia w jego kierunku. Odruch ten może spowodować niewłaściwą realizację eksperymentu, skutkującą dokonaniem pomiarów odpowiadających zakresowi widzenia centralnego

a nie, zgodnie z założeniami, widzenia peryferyjnego. Z tego względu w zaproponowanych w rozprawie testach, zmieniono wykorzystywany dotychczas sposób prezentacji bodźca w obszarze peryferyjnym z migającego, ograniczonego w czasie, na ciągły, a kontrolę kierunku spojrzenia zapewniono poprzez użycie okulografu (ang. *eye tracker*). W celu uniknięcia niepoprawnych pomiarów, w momencie wykrycia niepożądanego ruchu oczu, stosowano mechanizm wygaszania bodźca. Zapewniono w ten sposób warunki dla realizacji dokładniejszych pomiarów czułości na kontrast w obu obszarach widzenia. Dodatkowo, dla zwiększenia efektywności eksperymentów użyto metody psychometrycznej, która pozwoliła na adaptacyjny, wynikający z przebiegu eksperymentu, sposób doboru kontrastu wyświetlanego bodźca.

W dalszej kolejności zaproponowano model czułości na kontrast dla obliczenia prawdopodobieństwa wykrycia bodźca wzrokowego w scenie. Opracowanie tego modelu inspirowane było wcześniejszymi badaniami opublikowanymi w literaturze, w stosunku do których model ten został uproszczony. Stanowi on prostą zależność liniową czułości na kontrast od wartości kontrastu oraz odległości bodźca od centralnego obszaru widzenia. Pominęto w nim wcześniej stosowaną dodatkowo luminancję tła.

Osobną część rozdziału drugiego stanowi analiza dynamiki percepcji przy zmianie kierunku widzenia. Badania te ukierunkowane zostały na wykrycie zależności czasowych pomiędzy szybkością zmiany kierunku widzenia z peryferyjnego na centralny a wymaganą szybkością wygenerowania sceny w systemie renderingu czasu rzeczywistego. Dla oceny tej zależności zbudowany został, w oparciu o technologię śledzenia ruchu oka, eksperyment, w którym reprezentacja geometryczna bodźca dostosowywana była do aktualnego punktu spojrzenia obserwatora. W badaniach tych użyto jednak innego niż poprzednio urządzenia rejestrującego ruchy oczu, którego typ i częstotliwość próbkowania były porównywalne z okulografem stosowanym wcześniej. Zmiana ta nie została uzasadniona w rozprawie. Efektem przeprowadzonego eksperymentu są rekomendacje dotyczące częstotliwości odświeżania obrazu i próbkowania sygnału ruchu oka, które mają szansę zredukować możliwość dostrzeżenia operacji przerysowania sceny do obrazu o bardziej szczegółowej geometrii. W ostatnim podrozdziale tej części rozprawy zaprezentowano opracowany, w zespole badawczym Autora, system pomiaru ruchu oka, który może spełnić te wymagania. Ze względu na fakt, że autorami okulografu, jak i algorytmu wykrywania położenia źrenicy są inni członkowie zespołu, trudno ocenić udział Autora rozprawy w rozwoju tego urządzenia.

Z punktu widzenia planowanych do osiągnięcia celów, eksperymenty zostały starannie zaprojektowane i przeprowadzone. Przyjęta metoda badań była weryfikowana przed przystąpieniem do właściwych testów, z uwzględnieniem wyników uzyskiwanych w innych, powiązanych tematycznie, pracach. Zwrócono również uwagę na specyfikę działania układu wzrokowego człowieka, dostosowując do niej częstość i odstępy prowadzonych eksperymentów.

W trzecim rozdziale rozprawy zaprezentowano możliwości i sposoby użycia uzyskanych wyników w konkretnych zastosowaniach grafiki komputerowej. Jednym z nich była synteza obrazów realizowana w środowisku wirtualnej rzeczywistości (ang. *virtual reality*, VR). Zaproponowany model czułości na kontrast, na podstawie przeprowadzonego studium literaturowego, wykorzystany został do opracowania maski zapewniającej niższą gęstość próbkowania sceny w obszarze widzenia peryferyjnego. Dodatkowo, uproszczono proces rekonstrukcji obszarów nieobjętych próbkowaniem do prostej interpolacji barycentrycznej z użyciem kolorów sąsiednich pikseli. W mojej ocenie opis tej metody potraktowano zbyt lakonicznie, szczególnie, że w artykule [W6] jej zastosowanie wskazywane jest jako osiągnięcie badawcze. Dalsze zwiększenie efektywności procesu syntezy uzyskano poprzez

opracowanie takiej implementacji algorytmu wyznaczającego kolory pikseli należących do maski, która zakłada wykorzystanie zasobów karty graficznej. W efekcie wprowadzonych uproszczeń oraz na podstawie przeprowadzonych eksperymentów, potwierdzono skrócenie czasu renderingu sceny przy jednoczesnym utrzymaniu zadowalającej jej jakości.

W drugiej części tego rozdziału podjęto, niezbyt udaną, próbę zaprezentowania hybrydowej metody dekompozycji obrazu opracowanej dla środowiska wyposażonego w wyświetlacz stereoskopowy z akomodacją. W oparciu o ten opis oraz artykuł oznaczony jako [W7] można wnioskować, że model ten posłużył do opracowania reguły decydującej o wyborze metody dekompozycji obrazu w obszarze centralnego i peryferyjnego widzenia. Bazując na wykonanym studium literaturowym, na potrzeby tych badań wybrano dwie metody: liniowego mieszania (*ang. linear blending LB*) dla widzenia peryferyjnego oraz syntezy punktów świetlnych (*ang. Light-Field Synthesis LFS*) dla widzenia centralnego. Skuteczność nowej metody zbadano w eksperymentach pozwalających na porównanie wyników uzyskanych w trakcie renderingu zrealizowanego każdą z trzech metod niezależnie – LB, LFS oraz hybrydową. Środowisko dla badań stanowił zbudowany, w zespole badawczym Autora rozprawy, wielopłaszczyznowy wyświetlacz punktów świetlnych. Ocenie poddano zarówno jakość, jak i efektywność całego procesu z wykorzystaniem różnych scen. Wyniki eksperymentów wskazują, że zaproponowana metoda hybrydowa uzyskała lepsze parametry czasowe renderingu przy prawie niezauważalnej różnicy jakości rekonstruowanej sceny. Ponownie, dodatkowe zwiększenie efektywności uzyskano poprzez opracowanie implementacji metody LFS, dostosowanej do realizacji w środowisku procesorów graficznych. Ze względu na fakt, że wspomniany artykuł posiada dziesięciu autorów i brak jest jednoznacznego wskazania ich udziału w jego powstanie, trudno jest mi określić stopień zaangażowanie Autora w ten zakres prac.

Ostatnią część rozprawy stanowi podsumowanie przeprowadzonych badań i wnioski końcowe bazujące na uzyskanych wynikach. W rozdziale tym, Autor uzasadnił potwierdzenie postawionej tezy oraz naszkicował kierunki prac, które dalej zamierza rozwijać.

Pozostałe części rozprawy stanowią dobrze opracowane spisy rysunków, tabel, własnych publikacji Autora i publikacji cytowanych w rozprawie. Wśród tych ostatnich znalazło się 110 pozycji pokrywających zakres tematyczny rozprawy. Nie zauważono natomiast w pracy streszczenia w języku angielskim.

3. Ogólna ocena rozprawy

Autor rozprawy wykazał się gruntowaną wiedzą z zakresu funkcjonowania układu wzrokowego, metod pozyskiwania i analizy sygnału ruchu oka, metod syntezy obrazów graficznych oraz renderingu czasu rzeczywistego.

Za najważniejsze oryginalne elementy tej rozprawy uważam:

- zaproponowaną strategię badań czułości na kontrast w obszarze peryferyjnego widzenia, z wykorzystaniem bodźców o różnej charakterystyce i użyciem okulografu dla stworzenia bardziej naturalnych dla oka warunków eksperymentów,
- wyznaczenie charakterystyki oraz opracowanie modelu czułości na kontrast, który wskazuje prawdopodobieństwo wykrycia bodźca wzrokowego z uwzględnieniem jego cech i kierunkowości widzenia,

- ocenę dynamiki percepcji w przypadku zmiany kierunku spojrzenia pod kątem wymaganej szybkości renderingu obrazu, z jakości dedykowanej obszarowi widzenia peryferyjnego na niezbędną dla widzenia centralnego,
- opracowanie rozwiązań umożliwiających wykorzystanie zasobów karty graficznej.

Interesująca jest również część pracy potwierdzająca realizowalność przyjętej koncepcji:

- implementacja opracowanego modelu w celu zwiększenia efektywności syntezy obrazu w środowisku wirtualnej rzeczywistości,
- zastosowanie opracowanego modelu w hybrydowym algorytmie dekompozycji obrazu do zastosowań w środowisku badawczym wykorzystującym wielopłaszczyznowy wyświetlacz punktów świetlnych.

Uzyskanie powyższych wyników pozwala na potwierdzenie osiągnięcia głównego celu pracy i większości celów szczegółowych. Potwierdzają one również słuszność postawionej tezy. Na podstawie zaprezentowanej rozprawy nie można jednak potwierdzić spełnienia, takich szczegółowych celów jak:

- *opracowanie oraz implementacja eye trackera o częstotliwości zapewniającej precyzyjną rejestrację ruchów sakadycznych* – chociaż prezentacja takiego okulografu znalazła się w przedstawionej rozprawie, to jednak jego opis oraz referencyjne publikacje, nie wskazują Autora rozprawy jako autora tego rozwiązania,
- *opracowanie modeli czułości na kontrast dla układu wzrokowego człowieka w zależności od częstotliwości sygnału, typu bodźca i kąta widzenia* – w rozprawie przedstawiono tylko jeden model, bazujący na kontraście bodźca i jego odległości od punktu centralnego widzenia.

Ponadto należy podkreślić, że rezultaty badań przedstawione w niniejszej rozprawie doktorskiej były wcześniej publikowane w siedmiu pracach ze współudziałem Autora rozprawy, w tym w dwóch publikacjach indeksowanych w bazie Web of Science, z czego jedna posiada Impact Factor równy 3.780. Wyniki te zostały więc w jakimś stopniu zweryfikowane w środowisku naukowym. Wszystkie te publikacje mają jednak kilku autorów i brak mi danych, aby szczegółowo ocenić wkład w te prace Autora rozprawy. Natomiast, należy zauważyć, że w trzech publikacjach nazwisko Autora rozprawy znalazło się na pierwszym miejscu na liście autorów. Zbiór publikacji nie jest imponujący, jednak, moim zdaniem, zadowalający na tym etapie rozwoju naukowego.

Praca doktorska ma również słabe strony i niedociągnięcia, które przedstawiłam w dwóch grupach – uwagi ogólne, obejmujące pytania i wątpliwości, oraz uwagi szczegółowe.

Uwagi ogólne

1. Dla prezentacji osiągnięć zastosowano w rozprawie formę bezosobową lub osobową formułowaną w liczbie mnogiej. Taka prezentacja utrudnia ocenę wkładu Autora rozprawy w prowadzone badania:
 - „Aby sprawdzić, czy nasz eksperyment został przygotowany poprawnie, wykonaliśmy pomiary czułości kontrastu dla bodźca achromatycznego....”,

- „Bezpośrednie porównanie wskazuje zaniżoną czułość na kontrast uzyskaną w naszych pomiarach, co wyjaśnialiśmy różną wielkością bodźców wzrokowych w obu eksperymentach..”,
 - „natomiast fioletowa linia wskazuje progi kontrastu uzyskane w naszych badaniach...”.
2. W rozprawie Autor kilkakrotnie używa sformułowania „autorski algorytm”, „autorska procedura” lub „autorskiej płytce”. Określenia tego użyto, na przykład, w odniesieniu do algorytmu wykrywania żrenicy, opublikowanego w pracy [108] spisu literaturowego rozprawy, wśród autorów którego brakuje Autora rozprawy. Wymaga to więc wyjaśnienia czy w pozostałych przypadkach określenie to stosowano w stosunku do własnej pracy, czy też autorstwo dotyczy któregoś z członków zespołu badawczego.
 3. Wyniki badań potwierdzające skuteczność opracowanej metody uzyskane zostały dla stosunkowo małej liczby uczestników, jeśli weźmie się pod uwagę różnorodność oceny kolorów i zdolności ich postrzegania. Choć zaangażowani uczestnicy zapewne są użytkownikami systemów renderingu czasu rzeczywistego i ze względu na wiek oraz doświadczenie stanowią wiarygodną próbkę badawczą, to jednak większa liczba uczestników dawałaby silniejsze potwierdzenie poprawności dobranych progów czułości na kontrast.
 4. Rozprawa napisana została dość niestarannie. Poprawność języka pozostawia wiele do życzenia – szczególnie w trzecim rozdziale pracy. Czytelnik ma wrażenie, że rozprawa powstała jako bezpośrednie, czasem nietrafione, tłumaczenie artykułów z języka angielskiego. Powoduje to również niepotrzebne powtarzanie treści, które można było zaprezentować zbiorczo w jednym miejscu. Dobrym przykładem jest tu powtórzenie w rozprawie równania liniowego konwersji kolorów z przestrzeni XYZ do przestrzeni LMS lub powtarzanie opisu znaczenia kalibracji dla każdego użycia okulografu. Zastosowanie numeracji wzorów mogłoby rozwiązać pierwszy z wspomnianych problemów. Ponadto w pracy odnaleźć można wiele błędów edytorskich oraz wyrażen żargonowych.

Uwagi szczegółowe

- Wzór kontrastu Michelsona, prezentowany na początku strony 16, zawiera błąd w mianowniku – powinno być $L_{max} + L_{min}$
- W tekście rozdziału 2 można znaleźć zdanie, w którym występują dwa błędy. Pierwsza rzecz, która zwraca uwagę jest niepoprawnie zapisana nazwa autora publikacji oznaczonej numerem [101], Vatson zamiast Vanston. Druga uwaga dotyczy całego zdania – wydaje się ono niefortunnym tłumaczeniem zdania z artykułu oznaczonego w bibliografii rozprawy jako [W3].

*„Współcześnie Vatson i Crognale [101] w swoich badaniach sugerują, że **wzrost rozmiaru bodźca chromatycznego w obszarze peryferyjnym nie zmienia się** gdy bodziec odbierany jest przez czopki typu L i M, w przeciwieństwie do czopków typu S, dla których postrzegalny **próg kontrastu zwiększa się.**”*

- część zdania „Yxy zostały zmierzone spektrometrem, aby zostać skonwertowane do LMS”, ze strony 27 wydaje się być automatycznym tłumaczeniem tłumacza.

- „Pomiary czułości na kontrast dla achromatycznego bodźca wzorkowego wykazują, że szczytową zdolność rozpoznawania wzorców HVS osiąga dla bodźca wzorkowego o częstotliwości od 2 do 4 cpd.” Czy ten wniosek da się odczytać z rysunku 2.9 lub 2.11 ?
- Na rysunku 2.14 przyjęto błędne oznaczenie dla jednej serii danych – jest C1 powinno być raczej A1.
- Na stronie 45 pojawia się stwierdzenie *czułości bodźca na kontrast* – czy mamy tu do czynienia z pewnym uproszczeniem wypowiedzi ?
- Również na stronie 45 – „Standardowo za tę wartość przyjmuje się $\theta = 3.5$, jednak w proponowanym modelu przyjęto za $\theta = 2$ ”, z tekstu rozprawy nie wynika, czy wartość tę przyjęto za artykułem [19] czy przeprowadzono własne badania w tym kierunku ?
- Na stronie 68 zaproponowano niefortunny opis rysunku 3.6. Pierwszą sceną nazwano tą, która znajduje się po prawej stronie rysunku, drugą natomiast tą, którą umieszczono po lewej stronie. Naturalny sposób analizy rysunku sugerowałby odwrotną kolejność oznaczenia.
- Na stronie 71, na wykresie 3.8, po prawej jego stronie, nie zamieszczono informacji na temat różnic statystycznych wyników uzyskanych dla masek wskazujących 54% i 27% pikseli. Czy ich brak ma jakieś uzasadnienie ? W opisie wykresu pojawił się komentarz, „*Prawdopodobieństwa bliskie 50% zwykle powodują brak istotności statystycznej. Dla większych prawdopodobieństw przerywana linia zastępowana jest przez niebieską linię*”. Jak w tym kontekście należy traktować prawdopodobieństwo równe 77% ?
- Na stronie 75 pojawiło się sformułowanie „*liniowej metody najmniejszych kwadratów*”, czy chodziło o *regresję liniową metodą najmniejszych kwadratów* ? Ponadto dla określenia tej regresji użyto akronimu LFS tymczasem w artykule [W7], w którym opublikowano badania akronim LFS używany jest do określenia syntezy obrazów metodą punktów świetlnych *Light Field Synthesis*.
- Przykłady sformułowań żargonowych:
 - na stronie 67 pojawia się określenie – *temporalnego anty-aliasingu*,
 - na stronie 68 – w *ramach testów wydajnościowych ray tracera* porównano ...
 - na wielu stronach - *Wielopłaszczyznowy Wyświetlacz Light Fieldów, generowanie obrazów light field’ów ...*,
 - na stronie 75 – w *offline’owych przykładach*.

5. Wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Michała Chwesiuka stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wykazuje ogólną wiedzę Autora z zakresu informatyki. Jest ona również świadectwem umiejętności Autora w zakresie prowadzenia badań naukowych. W mojej ocenie, przedstawiona do recenzji rozprawa, mimo pewnych niedociągnięć, spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim przez obowiązujące przepisy. Wnoszę o dopuszczenie Pana mgr. inż. Michała Chwesiuka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Krzysztof Korpala

UCHWAŁA NR 111
Senatu Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie
z dnia 29 czerwca 2020 r.

w sprawie nadania mgr. inż. Michałowi Chwesiukowi
stopnia doktora

Na podstawie art. 179 ust. 2 i 3 pkt 2b ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669, z późn. zm.) w związku art 14 ust. 2 pkt 5 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jedn. Dz. U. z 2017 r. poz. 1789, z późn. zm.), uchwala się, co następuje:

§ 1.

Senat Zachodniopomorskiego Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie nadaje mgr. inż. Michałowi Chwesiukowi stopień doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie informatyka techniczna i telekomunikacja.

§ 2.

Uchwała wchodzi w życie z dniem podjęcia.

Przewodniczący Senatu
Rektor

dr hab. inż. Jacek Wróbel, prof. ZUT