

Dr hab. inż. Krzysztof Walczak, prof. UEP
Katedra Technologii Informatycznych
Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu
al. Niepodległości 10, 61-875 Poznań
tel.: +48 61 639-2712
walczak@kti.ue.poznan.pl
<http://www.kti.ue.poznan.pl/walczak>

Poznań, 2020-01-15

Recenzja
rozprawy doktorskiej
mgr. inż. Radosława Gierwiąto
pt. „System rzeczywistości wzbogaconej do wspomaganie
procesu uczenia na potrzeby zabiegu termoablacji wątroby”
promotor: dr hab. inż. Robert Sitnik, prof. Politechniki Warszawskiej
promotor pomocniczy: dr inż. Marcin Witkowski

Zagadnienie naukowe rozpatrywane w rozprawie

Problematyka badawcza rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława Gierwiąto dotyczy ważnej i aktualnej tematyki metod budowania systemów wzbogaconej rzeczywistości (ang. *augmented reality*, AR). Tego typu systemy pozwalają na łączenie percepcji obiektów rzeczywistych znajdujących się w otoczeniu użytkownika oraz treści syntetycznych generowanych przez komputer, w celu ułatwienia lub umożliwienia użytkownikowi wykonywania różnego rodzaju zadań. Wzbogacona rzeczywistość znajduje praktyczne zastosowania w licznych obszarach, w tym w przemyśle samochodowym, lotniczym, obronności, produkcji przemysłowej, marketingu oraz medycynie. W swojej pracy naukowej mgr inż. Radosław Gierwiąto skupił się na systemach ułatwiających naukę zabiegów medycznych, a w szczególności procesu termoablacji wątroby – skomplikowanej procedury wymagającej specjalistycznego szkolenia.

W prowadzonych przez siebie badaniach mgr inż. Radosław Gierwiąto skoncentrował się na metodach budowania praktycznych systemów wzbogaconej rzeczywistości spełniających dwa istotne wymagania wynikające z ich uwarunkowań aplikacyjnych. Pierwszym wymaganiem jest możliwość wizualnego wzbogacania obiektów, którymi można swobodnie manipulować w przestrzeni roboczej, bez stosowania dodatkowych znaczników ułatwiających określanie ich pozycji i orientacji. Drugim wymaganiem jest możliwość obserwacji informacji wzbogacających (wraz z postrzeganiem głębi) bez konieczności zakładania na głowę specjalistycznych gogli, typowo używanych w tego typu systemach. Są to ciekawe i ważne zagadnienia, gdyż konieczność oznaczania śledzonych obiektów oraz niedogodności związane ze stosowaniem gogli są czynnikami, które obecnie w największym stopniu ograniczają możliwości praktycznego stosowania systemów wzbogaconej rzeczywistości.

Problematyka rozprawy doktorskiej mgr. inż. Radosława Gierwiąto dotyczy ważnego problemu naukowego w dyscyplinie inżynierii mechanicznej (budowy i eksploatacji maszyn), dla rozwiązania którego konieczne jest podejście łączące również elementy pochodzące z innych dyscyplin w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych (informatyka, automatyka, elektronika).

Zaproponowane w rozprawie rozwiązanie rozpatrywanego zagadnienia naukowego

W swojej rozprawie doktorskiej mgr inż. Radosław Gierwiąto przedstawił nową metodę budowania systemów wzbogaconej rzeczywistości. W zaproponowanym podejściu wizualne wzbogacanie obserwowanej przez użytkownika rzeczywistości jest realizowane przez rzutowanie za pomocą projektora na wybrane obiekty odpowiednio przygotowanych i na bieżąco zmienianych obrazów. Aby obraz poprawnie wzbogacał postrzeganie obiektu przez użytkownika jest konieczne dostosowanie tego obrazu do położenia i orientacji wzbogacanego obiektu oraz punktu z którego użytkownik obserwuje obiekt. Zmiana obrazu w zależności od punktu obserwacji pozwala również na zwiększenie realizmu i stopnia zanurzenia użytkownika przez umożliwienie postrzegania głębi obrazu dzięki efektowi paralaksy występującemu przy poruszaniu głową.

O ile samo wykorzystanie projektorów do budowania systemów AR nie jest nowością – prace na temat przestrzennych systemów AR (ang. *spatial augmented reality*) pojawiają się w literaturze od dość dawna, to za nowatorskie należy uważać połączenie trzech mechanizmów: (1) wizyjnego śledzenia obiektu wzbogacanego, (2) fotogrametrycznego śledzenia położenia głowy użytkownika oraz (3) projekcji wewnętrznych struktur obiektu z uwzględnieniem kształtu obiektu, tak aby wyświetlany obraz poprawnie reprezentował strukturę wewnętrzną. Dzięki takiemu połączeniu mgr inż. Radosław Gierwiąto uzyskał założony cel, którym było zbudowanie systemu pozwalającego użytkownikowi na naturalne postrzeganie wzbogaconych obiektów wraz z efektem głębi występującym przy poruszaniu głową bez konieczności stosowania specjalnych okularów AR oraz umieszczania we wzbogacanej scenie specjalnych znaczników. Jedynym elementem dodatkowym wymaganym przez system jest znacznik wizualny umieszczony na głowie użytkownika i pozwalający na identyfikację punktu obserwacji.

W celu umożliwienia efektywnego określania pozycji i orientacji obiektu wzbogacanego mgr inż. Radosław Gierwiąto opracował deskryptor konturu nazwany przez niego „DRG”. Deskryptor bazuje na klasycznej mierze odległości punktów konturu od środka obiektu (ang. *centroid distance function*), jednak określonej we współrzędnych biegunowych i przy pewnych założeniach co do metody określania początkowego punktu konturu (PPK). Tak zdefiniowany deskryptor spełnia wymagania niezależności od skali śledzonego obiektu i jego obrotu w osi prostopadłej do płaszczyzny obrazu. Przy użyciu tak zdefiniowanego deskryptora jest możliwe określanie orientacji obiektu w przestrzeni dzięki wykorzystaniu bazy danych konturów (BDK), tworzonej niezależnie dla każdego śledzonego obiektu fizycznego. Zadanie to realizuje moduł śledzenia fantomu (MŚF).

Śledzenie głowy użytkownika mgr inż. Radosław Gierwiąto zrealizował przez określanie położenia w przestrzeni wizualnego znacznika znajdującego się na czole operatora za pomocą dwóch kamer modułu śledzenia głowy (MŚG). Na tej podstawie jest możliwe przybliżone określenie pozycji oczu użytkownika. Mgr inż. Radosław Gierwiąto wyznacza punkt środkowy wzroku jako punkt znajdujący się 45 mm poniżej śledzonego znacznika w globalnym układzie współrzędnych systemu.

Projekcja wewnętrznych struktur obiektu została zrealizowana za pomocą rzutnika wyświetlającego obraz renderowany na podstawie trójwymiarowego modelu obiektu ustawionego w taki sposób, aby jego położenie i orientacja odpowiadały położeniu i orientacji wzbogacanego obiektu fizycznego. Dzięki temu, w pewnym zakresie kątów ułożenia obiektu i kątów obserwacji, jest możliwe poprawne wyświetlanie szczegółów

obiektu, tak jak powinny one wyglądać z punktu obserwacji użytkownika. Trójwymiarowy model obiektu jest uzyskiwany w wyniku tomografii komputerowej obiektu wzbogaconego. Dzięki takiej metodzie prezentacji obrazu użytkownik może niezbrojonym wzrokiem obserwować obiekt wraz z obrazem wzbogacającym.

W celu dostarczenia użytkownikowi zwrotnej informacji dotykowej mgr inż. Radosław Gierwiąto posługuje się fizycznym modelem obiektu. Użytkownik nakładając model czuje opór stawiany przez materiał symulujący tkankę oraz elementy struktury wewnętrznej. Model pozwala również na pomiar czasu i zbieranie informacji o skuteczności wykonania nakładki obiektu.

Zaproponowana przez mgr. inż. Radosława Gierwiąto metoda budowania systemów wzbogaconej rzeczywistości została zaimplementowana w postaci prototypu o nazwie MARVIS (ang. *Medical Augmented Reality Visualizer*), służącego do wspomaganie szkolenia chirurgów. System MARVIS został poddany ocenie zarówno ilościowej, jak i jakościowej. Ocena ilościowa obejmowała pomiar czasu wykonywania poszczególnych kroków przetwarzania danych w systemie, dokładność kątownego śledzenia obiektu, dokładność wspólnej kalibracji modułów śledzenia obiektu i projekcji oraz dokładność śledzenia głowy operatora. Wyniki oceny ilościowej są bardzo dobre. Czasy przetwarzania danych są wystarczająco krótkie aby system mógł działać płynnie w czasie rzeczywistym, a dokładność kalibracji i śledzenia przekracza wymagania dla tego typu systemów.

Ocenę jakościową systemu MARVIS mgr inż. Radosław Gierwiąto wykonał z udziałem grupy użytkowników – pracowników Politechniki Warszawskiej oraz pracowników i studentów Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego. Przeprowadzone eksperymenty wskazują na istotne skrócenie średniego czasu potrzebnego na wykonanie zabiegu oraz zmniejszenie liczby błędnych nakład. Ocena działania zbudowanego systemu z udziałem ekspertów dziedzinowych jest bardzo wartościowa. Możliwość praktycznego stosowania otrzymanych wyników badań naukowych stanowi potwierdzenie ich autentycznej wartości.

Na podstawie przeprowadzonej walidacji mgr inż. Radosław Gierwiąto dokonał statystycznej weryfikacji przyjętych hipotez badawczych oraz głównej tezy rozprawy.

Podsumowując tę część opinii uważam, że mgr inż. Radosław Gierwiąto rozwiązał postawiony problem naukowy proponując skuteczną metodę budowania systemów wzbogaconej rzeczywistości działających bez znaczników umieszczanych na obiekcie, z uwzględnieniem punktu obserwacji, bez konieczności stosowania specjalnych gogli AR zakładanych na głowę przez użytkownika.

Oryginalność zaproponowanego przez autora zagadnienia naukowego

Zaproponowane przez mgr. inż. Radosława Gierwiąto podejście do budowania systemów wzbogaconej rzeczywistości oceniam jako oryginalne. Potwierdzeniem oryginalności zaproponowanego podejścia są wysoko punktowane publikacje naukowe, w tym artykuł w czasopiśmie *Opto-Electronics Review* (IF= 1.438) oraz artykuł w czasopiśmie *Applied Sciences* (IF=2.217), który wprost opisuje wyniki naukowe zawarte w omawianej rozprawie doktorskiej.

Charakter rozprawy

Rozprawa mgr. inż. Radosława Gierwiąto ma charakter praktyczny (konstrukcyjny). Dotyczy to zarówno rozdziałów 4 i 5, które zawierają opis zaproponowanej koncepcji rozwiązania oraz zbudowanego na podstawie tej koncepcji systemu MARVIS, jak i rozdziału 6, który stanowi ewaluację zaproponowanego podejścia.

Analiza literatury i stanu wiedzy w rozpatrywanej dziedzinie

Rozprawa świadczy o głębokiej i aktualnej wiedzy mgr. inż. Radosława Gierwiąto w dziedzinie systemów wzbogaconej rzeczywistości i ich zastosowań w medycynie. Rozdział 2 rozprawy stanowi wstęp teoretyczny obejmujący zagadnienia naturalnego widzenia człowieka oraz kalibracji systemów wizyjnych. W rozdziale 3 mgr. inż. Radosław Gierwiąto przeanalizował 10 różnych systemów stosowanych w medycynie, w tym dwa wykorzystujące wirtualną rzeczywistość, sześć wykorzystujących wzbogaconą rzeczywistość oraz dwa działające na urządzeniach mobilnych.

Zabrakło w rozprawie natomiast opisu istniejących algorytmów rozpoznawania obiektów, w szczególności używanych obecnie deskryptorów konturu. Ponieważ opracowany przez mgr. inż. Radosława Gierwiąto deskryptor DRG jest jednym z głównych oryginalnych wyników rozprawy, dobrze by było porównać jego działanie z innymi dostępnymi deskryptorami.

Umiejętność autora samodzielnego prowadzenia badań naukowych

Kluczowe elementy omawianej rozprawy doktorskiej zostały opisane w artykule naukowym opublikowanym w czasopiśmie *Applied Sciences* (IF=2.217), w którym mgr. inż. Radosław Gierwiąto jest pierwszym autorem, a pozostali autorzy to promotor, promotor pomocniczy oraz eksperci z zakresu medycyny z Warszawskiego Uniwersytetu Medycznego. Wskazuje to na kluczową rolę mgr. inż. Radosława Gierwiąto w osiągnięciu opisanych w artykule i rozprawie doktorskiej wyników naukowych.

Na pozytywne podkreślenie zasługują umiejętności techniczne mgr. inż. Radosława Gierwiąto, w szczególności umiejętność konstrukcji złożonych urządzeń mechaniczno-optyczno-informatycznych oraz biegłość w posługiwaniu się zaawansowanymi technikami programowania (C++, Open GL, AMP, TCP/IP).

Poprawność językowa i redakcyjna

Rozprawa jest napisana w języku polskim, a styl wypowiedzi jest zasadniczo dobry i zrozumiały. Zdarzają się jednak w rozprawie dość częste pomyłki pisarskie i błędy interpunkcyjne. Mgr. inż. Radosław Gierwiąto posługuje się również nieuprawnionymi kalkami z języka angielskiego (np. słowo „projektować” w znaczeniu wyświetlać/rzutować, „haptyczny” w znaczeniu dotykowy, czy „video” w znaczeniu wideo). Te mankamenty jednak nie zaburzają w sposób istotny ogólnie pozytywnego wrażenia, które robi rozprawa.

Uwagi o charakterze krytycznym i dyskusyjnym

Przedstawiona rozprawa jest przekonująco napisana, wskazuje na wysokie kompetencje mgr. inż. Radosława Gierwiąto w dziedzinie budowania systemów wzbogaconej rzeczywistości, a przedstawione wyniki eksperymentów wskazują na dużą wartość osiągniętych wyników. Rozprawa ma jednak również pewne wady i słabe strony.

- 1) W niektórych fragmentach rozprawa nie dość precyzyjnie wskazuje na to, co jest osiągnięciem naukowym, a co konstrukcyjnym. O ile ogólność osiągniętych wyników naukowych nie budzi zastrzeżeń, to opis w wielu miejscach dotyczy konkretnego systemu, a nie ogólnej metody naukowej budowania tego typu systemów. Widać to wyraźnie zarówno w podrozdziale 1.3 „Cele i teza rozprawy” jak i rozdziale 4 „Koncepcja rozwiązania”. W ten sposób Autor niepotrzebnie umniejsza znaczenie osiągniętych wyników.
- 2) Zaproponowane przez mgr. inż. Radosława Gierwiąto metody śledzenia i wzbogacania obiektów fizycznych są wrażliwe na cechy tych obiektów. Jeżeli śledzenie i wzbogacanie dotyczy wyłącznie silikonowych modeli medycznych to niewątpliwie znaczenie ma dokładność ich wykonania (jak zauważono w sekcji 5.1.1.1) oraz odkształcenia odlewów w trakcie pracy (na co wskazano w podrozdziale 7.4). Gdyby jednak stosować zaproponowaną metodę do innego rodzaju obiektów, istotny jest wpływ cech materiału, z którego jest wykonany obiekt (barwa, przezroczystość, odbijanie światła) oraz kształt obiektu. W szczególności nie uwzględniono w rozprawie przypadku, w którym środek ciężkości obszaru wypada poza jego granicami. Nie jest jasne, czy zaproponowany deskryptor DRG działa wtedy poprawnie.
- 3) W celu umożliwienia detekcji orientacji obiektu w przestrzeni mgr inż. Radosław Gierwiąto posługuje się bazą danych konturów (BDK) zawierającą wyliczone wartości deskryptora DRG dla konkretnego obiektu przy różnych kątach obserwacji. Wymagana duża dokładność wyznaczania kąta obserwacji powoduje konieczność tworzenia stosunkowo dużych baz danych. W literaturze naukowej można znaleźć wiele prac dotyczących wyznaczania kąta obserwacji obiektu na podstawie jego obrazu w czasie rzeczywistym. Brakuje w rozprawie odniesienia do tych metod i oceny możliwości ich użycia w systemie MARVIS.
- 4) W swojej koncepcji i konstrukcji systemu mgr inż. Radosław Gierwiąto uwzględnił zmianę obrazu wzbogacającego wraz ze zmianą punktu, z którego użytkownik obserwuje wzbogacany obiekt. To rozwiązanie daje wrażenie głębi postrzegania obiektu dzięki efektowi paralaksy powstającemu przy poruszaniu głową, ale nie daje w pełni trójwymiarowego postrzegania. O ile zrozumiałe jest, że ze względu na wymaganie działania bez okularów mgr inż. Radosław Gierwiąto nie mógł użyć obrazu stereoskopowego, to zabrakło w pracy oceny na ile brak takiego obrazu (pozostający w sprzeczności z obserwowanym efektem paralaksy) jest znaczący dla właściwego postrzegania wzbogacanego obiektu.
- 5) W zaproponowanym przez mgr. inż. Radosława Gierwiąto rozwiązaniu określenie punktu, z którego użytkownik obserwuje obiekt jest realizowane przez śledzenie w trójwymiarowej przestrzeni sferycznego znacznika umieszczonego na czole obserwatora. Na tej podstawie jest wyliczany punkt środkowy jako punkt znajdujący się 45 mm poniżej znacznika w globalnym układzie współrzędnych. Takie założenie jest prawdziwe (w pewnym uproszczeniu) jedynie w sytuacji, w której użytkownik trzyma głowę w pionie. Jakiegokolwiek odchylenie głowy od pionu w płaszczyźnie tył-przód lub lewo-prawo skutkuje zaburzeniem wyznaczania punktu obserwacji. Mgr inż. Radosław Gierwiąto zaproponował w kierunkach dalszych prac rozwiązanie tego problemu przez śledzenie oczu chirurga, co jest zadaniem trudnym. Ten problem można jednak dużo łatwiej rozwiązać przez zmianę znacznika umieszczonego na głowie użytkownika. Zamiast sferycznego znacznika, dla którego jest możliwe jedynie określenie położenia w przestrzeni, można posłużyć się

obiektem niesymetrycznym. Dla przykładu przestrzenny układ trzech kulek dawałby informację nie tylko o położeniu, ale również o orientacji znacznika – a tym samym głowy użytkownika – w przestrzeni.

- 6) Celem opisanych w rozprawie doktorskiej prac badawczych było opracowanie systemu wzbogaconej rzeczywistości wspomagającego proces uczenia chirurgów w ramach zabiegów termoablacji wątroby (podrozdział 1.3). Nie ulega wątpliwości, że ten cel został osiągnięty – system wspomaga proces uczenia. W rozprawie pojawiają się jednak również stwierdzenia mówiące, że opracowany system zwiększa skuteczność uczenia (np. w podrozdziale 6.2). Takie twierdzenie jest nieuprawnione, ponieważ nie zostały przeprowadzone żadne badania potwierdzające zwiększenie skuteczności uczenia, czyli skrócenie czasu potrzebnego na osiągnięcie zakładanej sprawności chirurga operującego już bez użycia systemu.
- 7) Z opisu zamieszczonego w rozprawie nie wynika dlaczego korzystając z systemu MARVIS użytkownicy muszą blokować moduł wyznaczający położenie wątroby w scenie w celu wykonania nakłucia. Z opisu w podrozdziale 6.4 wynika, że użytkownicy mieli z tym zadaniem trudności. Funkcjonalność blokowania śledzenia nie została wyjaśniona w rozdziałach opisujących koncepcję i implementację systemu MARVIS.
- 8) Mgr inż. Radosław Gierwiąto przedstawił w rozprawie wyniki pomiaru czasu przetwarzania klatek obrazu przez poszczególne moduły systemu MARVIS. Te czasy są istotne, gdyż mają wpływ na liczbę klatek na sekundę, które system może generować. Brak jest jednak w rozprawie informacji o sprzęcie, na którym oprogramowanie było uruchamiane. Bez tej informacji nie da się ocenić na ile to ograniczenie jest istotne w praktycznych zastosowaniach.
- 9) Pewnym ograniczeniem zaproponowanej metody wzbogacania obiektów jest użycie statycznego rzutnika do wzbogacania obiektów, które mogą być swobodnie obracane. Baza danych konturów przechowuje kontury śledzonego obiektu w zakresie kątowym (-60° , 60°) w jednej osi oraz (-45° , 45°) w drugiej osi. Maksymalny kąt obrotu obiektu jest jednak ograniczony przez efekt przesłaniania obrazu wzbogacającego zależny od kształtu obiektu. Zabrakło w rozprawie określenia rzeczywistych maksymalnych kątów obrotu, dla których wzbogacony obraz będzie poprawnie widoczny w przypadku praktycznie stosowanych obiektów.

Przedstawione powyżej uwagi mają jednak charakter jedynie dyskusyjny i nie zmniejszają mojej bardzo wysokiej oceny wyników naukowych osiągniętych przez mgr. inż. Radosława Gierwiąto.

Konkluzja

Biorąc pod uwagę istotność i aktualność tematyki doktoratu, osiągnięte wyniki badawcze oraz ich duże znaczenie praktyczne stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Radosława Gierwiąto **spełnia wymagania obowiązującej ustawy o stopniach i tytule naukowym** i wnoszę o jej dopuszczenie do publicznej obrony. Natomiast na podstawie samej rozprawy, jak i znaczących publikacji Autora w prestiżowych czasopismach, wnioskuję o jej **wyróżnienie**.

