

Dr hab. inż. Mirosław Pajor prof. ZUT
Instytut Technologii Mechanicznej
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

Recenzja pracy doktorskiej pt. ” Badania interakcji dotykowej w rzeczywistości wirtualnej z zastosowaniem robota typu Delta” autorstwa mgr inż. Damiana Grajewskiego.

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia DM-63/643/2017 Pana Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania, Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszaka z dnia 29.11.2017.

1. Przedstawienie treści pracy

Przemysł maszynowy i wytwórczy ulega bardzo szybkim przemianom, można śmiało powiedzieć, że zmiany te mają charakter rewolucyjny a analitycy nazwali ten proces czwartą rewolucją przemysłową „Przemysł 4.0”. Głównym wyznacznikiem tej rewolucji jest cyfryzacja produkcji, wprowadzanie nowych systemów diagnostycznych maszyn oraz intensywny rozwój innowacyjnych interfejsów komunikacyjnych o wysokim poziomie interaktywności. Szczególnie zaawansowane są prace nad rozwojem technik komunikacji człowiek-maszyna. Maszyny i procesy produkcyjne stają się coraz bardziej złożone – nauka ich obsługi, programowanie i ich sterowanie wymagają nowego podejścia. Nowe technologie informatyczne dostarczają zaawansowanych narzędzi do budowy interaktywnych interfejsów z zastosowaniem rzeczywistości wirtualnej VR (Virtual Reality) oraz rzeczywistości rozszerzonej AR (Augmented Reality). Technologie te umożliwiają zdecydowane podwyższenie interaktywności interfejsów oraz ich intuicyjną obsługę. Na rynku pojawiają się nowe urządzenia peryferyjne zapewniające wysoki poziom immersji operatora w środowisku wirtualnym takie jak hełmy wizyjne, układy wizyjnego śledzenia operatora czy różnego rodzaju manipulatory haptyczne z siłowym sprzężeniem zwrotnym. Urządzenia te z powodzeniem są stosowane do budowy omawianych interfejsów.

Recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się w tę bardzo interesującą tematykę niezmiernie ważną dla rozwoju nowych technik sterowania i programowania maszyn oraz szkolenia personelu do obsługi maszyn i procesów technologicznych zgodnie z założeniami czwartej rewolucji przemysłowej. Pan mgr inż. Damian Grajewski podejmuje się realizacji badań nad problematyką efektywnego zastosowania metod i narzędzi wirtualnej rzeczywistości VR do tworzenia interaktywnych symulacji szkoleniowych, zorientowanych na prace wykonywane na stanowisku produkcyjnym. Podstawowym problemem do rozwiązania w tego typu systemach to zapewnienie wysokiego poziomu immersyjności oraz interakcji dotykowej zachodzącej pomiędzy użytkownikiem a elementami środowiska wirtualnego. W recenzowanej pracy Autor zaproponował zastosowanie nowatorskiej konstrukcji robota typu Delta o kinematyce równoległej, którego zadaniem jest symulowanie kształtów wirtualnych obiektów. Jest to bardzo interesujący problem badawczy, a jego podjęcie jest w pełni uzasadnione.

Opiniowana praca doktorska liczy 152 strony i składa się z sześciu rozdziałów oraz streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykazu oznaczeń. Na końcu zamieszczono spis literatury, spis rysunków i tabel oraz dwa załączniki. Spis literatury, który zawiera zestaw 87 cytowanych pozycji literaturowych oraz 19 witryn internetowych. Dobór źródeł literaturowych jest prawidłowy i nie budzi zastrzeżeń. Poszczególne rozdziały rozprawy doktorskiej obejmują: wprowadzenie, przegląd literatury, cel pracy i problem badawczy oraz trzy rozdziały merytoryczne zakończone podsumowaniem, wnioskami końcowymi i omówieniem perspektyw dalszych badań.

W pierwszym rozdziale rozprawy Autor definiuje problem, a następnie po wnikliwej analizie stanu zagadnienia wykazuje potrzebę podjęcia badań nad opracowaniem nowego podejścia do problemu tworzenia interaktywnych symulacji szkoleniowych, uwzględniających badania interakcji dotykowej. W rozdziale drugim Autor przedstawia główne założenia systemów wirtualnej rzeczywistości oraz charakteryzuje obszary ich zastosowań w szeroko pojętych zagadnieniach inżynierskich. Ponadto zaprezentowano główne trendy w aplikacjach do interaktywnych szkoleń prowadzonych z zastosowaniem VR wskazując ich główne wady i problemy. W następnym rozdziale Autor wyznacza cele i zakres pracy oraz formułuje jej tezę w brzmieniu: *„Zastosowanie robota typu Delta w środowisku wirtualnym pozwoli dostarczyć bodźce dotykowe podczas interakcji z cyfrowymi obiektami z tym samym wpłynie na immersyjność aplikacji VR do treningu zadań proceduralnych”*. Przyjęty cel i zakres pracy oraz jej teza nie budzą zastrzeżeń i są adekwatne do rozwiązywanych problemów naukowych.

W rozdziale czwartym Autor przedstawił metodykę badań eksperymentalnych. Zaprezentowano plany poszczególnych eksperymentów oraz scharakteryzowano ich cele. Ponadto przedstawiono główne założenia budowanego systemu VR oraz omówiono zastosowany sprzęt i oprogramowanie. Opisano szczegóły procesu budowy systemu do badań interakcji dotykowej w rzeczywistości wirtualnej.

W kolejnym, piątym rozdziale zaprezentowano przebieg eksperymentów badawczych. Autor przeprowadził obszerną dyskusję uzyskanych wyników badań eksperymentalnych. Wyniki te posłużyły do oceny możliwości zastosowania proponowanych w monografii rozwiązań w interaktywnych symulacjach ręcznych zadań proceduralnych.

Rozprawę zakończono podsumowaniem, w którym Autor wyciągnął wnioski z przeprowadzonych badań i ocenił poziom weryfikacji postawionej w pracy tezy.

2. Oryginalne osiągnięcia pracy

Bardzo dużym atutem pracy doktorskiej Pana Damiana Grajewskiego jest innowacyjny charakter proponowanych rozwiązań. Autor posiada dużą biegłość w posługiwaniu się nowoczesnymi narzędziami w zakresie komputerowego modelowania i projektowanie elementów środowisk wirtualnej rzeczywistości VR. Ponadto Autor wykazał się znajomością zagadnień projektowania zaawansowanych urządzeń mechatronicznych takich jak roboty o strukturze równoległej oraz projektowania algorytmów ich sterowania pod kątem współpracy ze środowiskiem rzeczywistości wirtualnej.

Autora nie stronił również od prac eksperymentalnych. W celu praktycznego potwierdzenia funkcjonalności zaprojektowanego manipulatora typu Delta w zakresie symulacji kształtów elementów rzeczywistości wirtualnej, Autor przeprowadził szereg badań doświadczalnych wykazując przy tym wysokie umiejętności realizacji tego typu badań. Eksperyment praktyczny w przyjętym zakresie potwierdził poprawność działania opracowanych algorytmów symulacji wrażeń dotykowych w zaprojektowanym systemie rzeczywistości wirtualnej VR z zastosowaniem robota typu Delta. Procedury badawcze opracowane dla potrzeb badań eksperymentalnych realizowanych w ramach pracy są nowoczesne i adekwatne do rozważanej problematyki. Zaplanowane zadania Autor zrealizował konsekwentnie a uzyskane rezultaty poddał stosownej analizie.

Do największych oryginalnych osiągnięć tej pracy zaliczyć można:

1. Opracowanie nowatorskiej koncepcji zastosowania manipulatora typu Delta jako aktywnego urządzenia dotykowego do symulacji modeli cyfrowych w aplikacji szkoleniowej wykorzystującej technologię rzeczywistości wirtualnej.
2. Projekt środowiska wirtualnego dla potrzeb aplikacji szkoleniowej do nauki ręcznych zadań proceduralnych. Integracja tego środowiska z urządzeniami do podwyższania poziomu immersji operatora w środowisku VR (tj. hełm wizyjny), przenoszenia wrażeń dotykowych (tj. robot Delta) oraz kontroli ruchów operatora (tj. PST-55) w jednolity wielopoziomowy system wirtualnej rzeczywistości.
3. Zaplanowane i zrealizowane badania doświadczalne, potwierdzające w przyjętym zakresie skuteczność działania opracowanej koncepcji zastosowania manipulatora Delta do symulacji modeli cyfrowych i przenoszenia wrażeń dotykowych w środowisku wirtualnym.

Pozytywnie oceniam oryginalność, innowacyjność i poziom naukowy wymienionych osiągnięć.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Autor w rozdziale drugim *Przegląd literatury – stan zagadnienia* zamieścił bardzo obszerny opis zagadnień związanych z rzeczywistością wirtualną poczynając od lat siedemdziesiątych minionego stulecia aż do czasów obecnych. Bardzo szczegółowo opisał rozwój technologii VR oraz konstruowanych urządzeń do nawigacji i manipulacji w tej przestrzeni. Rozdział ten zajmuje 54 strony co stanowi ok. 40 % treści rozprawy. Rozdział ten jest bardzo ciekawy i dobrze się czyta, ale z punktu widzenia naukowego nie wnosi do pracy nic ważnego i zdecydowanie powinien być skrócony. Celem przeglądu literatury jest bowiem uzasadnienie podjęcia określonej tematyki badawczej, wskazanie aktualnie konkurencyjnych rozwiązań oraz ich wad. Rozdział tego typu powinien zatem zawierać syntetyczny opis najważniejszych (możliwie najnowszych) pozycji literaturowych i osiągnięć naukowych bezpośrednio powiązanych z badaniami opisywanymi w rozprawie.
2. Autor w rozprawie zamieścił wyniki pomiaru siły nacisku na stół. Układ pomiarowy pokazano na rys. 4.26 str. 97 i rys.5.1 str. 110 – rysunki te dublują się i pokazują tylko siłomierz tensometryczny nie do końca ilustrując, jak on jest zabudowany w końcówce

robotycznej manipulatora. Zamieszczony na stronie 110 wzór 5.1 nie jest adekwatny do realizowanych pomiarów. To jest wzór dla wariantu, gdy belka tensometryczna będzie mocowana np. w wadze i mierzona będzie masa ważonych elementów. Na str.112 rys.5.4 widać pewne opóźnienie mierzonej siły w stosunku do przebiegu współrzędnej Z. Ponadto drugi pik na wykresie siły nie jest powiązany ze zmianami współrzędnej Z – jak to można wyjaśnić? Natomiast na str. 113 rys.5.5 na współrzędnej Z można zaobserwować dwa momenty dotyku platformy a pików siły jest sześć – jak to zjawisko można wyjaśnić? Nasuwa się ponadto pytanie po co mierzono siłę nacisku jeżeli w dalszej części pracy wyniki te, ani zbudowany układ pomiarowy, nie są wykorzystywane?

3. Na str. 111 rys.5.3 sugeruje, że badano zjawisko dotyku krawędzi stołu. Czy tak było w rzeczywistości, czy jest to tylko niezamierzona sugestia? Ponadto brakuje w opisach stanowiska badawczego szczegółów modelu dłoni wirtualnej i podczas analizy wyników badań rodzi się wiele pytań jak skorelowany jest dotyk z ewentualnymi ruchami palców. Dopiero na końcu pracy autor uchyla rąbka tajemnicy stwierdzając, że nieruchoma dłoń wirtualna jest jedną z przyczyn pogarszających wrażenia dotykowe. Na rys.4.35 widać, że dolna część dłoni jest poniżej palców zatem operator widząc cały stół winien oczekiwać wrażenia dotykowego na dolnej części dłoni a nie na palcach. Czy fakt ten nie zakłóca procesu odbierania wrażeń dotykowych? Ponadto sama konstrukcja robota Delta jest stosunkowo podatna. W obrazie wirtualnym operator widzi masywny stół. Czy zatem nie wyczuwa nadmiernej podatności robota, co może wprowadzać drobną dezorientację bo doświadczenie życiowe raczej wyzwała oczekiwanie zdecydowanego twardego oporu stołu?
4. W badaniach kontaktu dłoni ze stołem wirtualnym symulowanym przez robota Delta wskazano, że operator dotykał stół w kilku miejscach a manipulator podążał za ruchem dłoni. Podano też pewne dane na temat czasu przesuwu stołu (1.06 s) nie podając drogi co uniemożliwia ocenę prędkości nadążania robota za dłonią operatora. Rodzi się zatem pytanie czy manipulator jest wystarczająco szybki, aby operator mógł w miarę swobodnie dotykać stołu w różnych miejscach? Jest to też problem, który może się ujawnić w eksperymencie wkładania wałków do skrzynki z otworami, którą symuluje robot. Jeżeli operator pomylił się i nie odłożył wałka do wskazywanego otworu tylko do otworu obok, czy manipulator zdąży z reakcją tak aby zapewnić operatorowi właściwe wrażenia dotykowe i możliwość korekty błędu?

5. Pomysł zastosowania robota do dynamicznej symulacji kształtów elementów rzeczywistości wirtualnej jest bardzo interesujący i ma duży potencjał. Jednak wydaje się, że Autor nie do końca ten potencjał wykorzystał. Zaprojektowany eksperyment z odkładaniem wałków do skrzynki z otworami równie dobrze można zasymulować wykonując te obiekty np. proponowaną w pracy technologią druku 3D. Prawdopodobnie operator pracując w przestrzeni wirtualnej z atrapą stołu i skrzynki z otworami nie zauważy różnicy w odniesieniu do robota a takie rozwiązanie będzie znacznie prostsze i tańsze. Szkoda, że Autor nie pokusił się o symulację procedur montażowych z ruchomym obiektem, wówczas zdecydowanie dobitniej wyeksponowane zostałyby zalety proponowanego rozwiązania.
6. Zamieszczone w ostatnim rozdziale wnioski końcowe są moim zdaniem w pewnych punktach nazbyt optymistyczne. Sugeruję Autorowi bardziej powściągliwe opinie. Stwierdzenie np. we wniosku nr 5, że uzyskany postęp w nauce użytkowników systemu uzasadnia jego zastosowanie do szkoleń przemysłowych jest dyskusyjna, bo dopiero porównanie różnych technik szkoleniowych i uzyskiwanych nimi postępów uprawnia do postawienia tak zdecydowanego wniosku. Ponadto stwierdzenie, że opracowana technologia już na obecnym etapie może być wdrożona do **kursów przemysłowych** jest również dyskusyjna jak opinia zawarta we wniosku 6bii stwierdzająca, że technologia wirtualna eliminuje ograniczenia rzeczywistych stanowisk takich jak koszty, dostępność i bezpieczeństwo. Zwracam uwagę, że analizując koszty zaprojektowanego stanowiska wirtualnego z całym wymaganym sprzętem (robot, hełm wizyjny, układy śledzenia, oprogramowanie itp.) w żaden sposób nie korespondują one z kosztami dwóch stołów i prostej skrzynki odkładczej. Autor winien mieć świadomość, że technologia ta jest dopiero w fazie rozwoju a analizowane na tym etapie problemy montażowe są stosunkowo banalne i jeszcze daleka jest droga do symulacji w wirtualnej rzeczywistości zaawansowanych zadań montażowych, gdzie może ujawnić się przewaga np. kosztowa. Uwaga ta w żaden sposób nie deprecjonuje pracy Autora, ma jedynie namówić Go do ostrożności w formułowaniu tak huraoptymistycznych wniosków.

Tekst pracy został napisany starannie, część edytorska pracy jest na wysokim poziomie. W trakcie czytania pracy wykryłem tylko kilka drobnych błędów redakcyjnych:

- Str.11 (trzeci akapit, czwarty wiersz) – jest „to”, winno być „do”.
- Str.103 rys.4.32 oraz str. 111 rys. 5.2 – tego typu rysunki nic nie prezentują i nie mają większej wartości.

- Str. 107 rys.4.36 nic nie wnosi do treści pracy, jeżeli nie jest dokładnie opisany. Należy założyć, że czytelnik nie zna tego oprogramowania i prezentowane grafiki nic mu nie wyjaśniają.

4. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę powyższą ocenę treści rozprawy stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane pracom doktorskim przez ustawę o stopniach i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. (z późniejszymi zmianami) oraz Rozporządzeniu Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 15 stycznia 2004 r. (z późniejszymi zmianami). Zrealizowana przez mgr. inż. Damiana Grajewskiego praca charakteryzuje się wysokim poziomem innowacyjności. Praca ta stanowi oryginalne rozwiązanie sformułowanego problemu naukowego oraz wskazuje na duży poziom wiedzy teoretycznej i praktycznej jej Autora. **Reasumując stwierdzam, że opiniowana rozprawa doktorska może być dopuszczona do publicznej obrony.**

