

Prof. dr hab. inż. Edward Chlebus  
Politechnika Wrocławska  
Wydział Mechaniczny  
Centrum Zaawansowanych Technologii Wytwarzania/Fraunhofer Project Center  
Katedra Technologii Laserowych, Automatykacji i Organizacji Produkcji  
[edward.chlebus@pwr.edu.pl](mailto:edward.chlebus@pwr.edu.pl)  
telefon: +48 71 3202046; kom: +48 724 999 905  
ul. Łukasiewicza 5  
PL 51 031 Wrocław

## RECENZJA

Pracy doktorskiej **mgra inż. Damiana Grajewskiego** zatytułowanej: **Badanie interakcji dotykowej w rzeczywistości wirtualnej z zastosowaniem robota typu Delta** opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania Politechniki Poznańskiej

### 1. Wstęp

Wytwarzanie i konsumpcja wyrobów rynkowych ma ciągle tendencje rosnące, przy czym odnosi się to nie tylko się do wielkości podaży i popytu ale w coraz to większym stopniu poszukuje nowych wyrobów wyróżniających ich spośród całej palety będących na rynku. Pojawiły się nie tylko nowe metody badania rynku, specyfikacji jego potrzeb ale również podjęto próby takiego opracowania metod i technik inżynierskich aby zapewnić możliwość elastycznego i zsynchronizowanego oddziaływania na jego potrzeby. Konkurencyjne działania na rynku „produktu” wymaga też od producenta i jego poddostawców szybkiego i bezbłędnego reagowania na sygnały rynkowe i ciągłego udoskonalania organizacji wewnętrznej, powiązań kooperacyjnych, logistycznych i serwisowych.

Do najwyżej cenionych dziś cech systemów produkcyjnych zalicza się m.in. ich elastyczność, szybkie reagowanie na zmiany konstrukcyjne i technologiczne, krótki cykl rozwoju i wdrażania produktu do produkcji, wysoka jakość i niskie koszty produkcji. Aby te wielkości określać w sposób wymierny należy opracować metody prognozowania, planowania oraz analizy czynników wpływających na te wymagania. Można wymienić wiele metod przydatnych w tym obszarze, ale ostatnio największym zainteresowaniem cieszą się metody modelowania i symulacji procesów produkcyjnych.

Jednym z wycinków tego szerokiego obszaru badawczego zajął się Doktorant przedstawiając zagadnienia integracji i interakcji wirtualnych narzędzi modelowania i symulacji

procesów zintegrowanych z rzeczywistymi komponentami systemów wytwarzania, w tym przypadku z robotem typu Delta. Jest to zagadnienie istotne z aplikacyjnego jak i naukowego punktu widzenia, i mieści się w strategii rozwoju przemysłu określonej w tzw. inteligentnych specjalizacjach będących jednym z filarów innowacyjnych technologii rozwijanych w globalnym przemyśle, znanych pod pojęciem przemysłu **I4.0**.

Zatem temat pracy podjęty przez mgra inż., Damiana Grajewskiego „**Badanie interakcji dotykowej w rzeczywistości wirtualnej z zastosowaniem robota typu Delta**” należy uznać za bardzo aktualny z dużymi możliwościami aplikacyjnymi w przyszłości.

Praca została zrealizowana w Katedrze Zarządzania i Inżynierii Produkcji Wydziału Budowy Maszyn i Inżynierii Produkcji Politechniki Poznańskiej, pod kierunkiem Prof. dr hab. inż. Adama Hamrola z udziałem promotora pomocniczego dr inż. Filipa Górskiego.

## **2. Struktura pracy, cele i treść pracy**

W pracy przedstawiono koncepcję, proces budowy oraz testy autorskiego systemu VR, bazującego na nowatorskim zastosowaniu robota typu Delta. Głównym zadaniem robota jest zachowanie zbliżone, ale alternatywne do funkcjonalności urządzeń haptycznych w zakresie symulowania kształtu wirtualnych obiektów. Przygotowane rozwiązanie integruje robota o równoległej strukturze kinematycznej z nisko kosztowym sprzętem VR przeznaczonym do wizualizacji (hełm wizyjny) i śledzenia pozycji obiektów rzeczywistych (optyczny system śledzenia), a także zapewnia manipulację fizycznymi obiektami (reprezentującymi dane cyfrowe).

Praca składa się z 6 rozdziałów (wraz z podsumowaniem) i liczy 152 strony (wraz z załącznikami nr 1 i nr 2), w tym streszczenie w j. polskim i angielskim, wykaz ważniejszych oznaczeń, spis rysunków, spis tabel i 87 pozycji literatury.

**Rozdz.1 Wprowadzenie** – Doktorant osadził tematykę badawczą pracy w obszarze zastosowań metod i narzędzi VR w procesach tworzenia interaktywnych symulacji zorientowanych na prace wykonywane na stanowisku produkcyjnym. Autor odwołał się do genezy powstania technologii wirtualnych wspierających różne gałęzie przemysłu (głównie przemysł zbrojeniowy i medyczny) oraz dziedziny budowy maszyn i inżynierię produkcji, w których systemy VR stosuje się do wsparcia procesów projektowania nowych wyrobów i stanowisk pracy. Uzasadnił także potrzebę opracowania nowego podejścia w tworzeniu interaktywnych symulacji aplikacyjnych i szkoleniowych, uwzględniających badania interakcji dotykowej.

**Rozdz.2 Przegląd literatury – aktualny stan wiedzy** - Autor przeprowadził bardzo szeroką analizę literaturową, opisał podstawowe komponenty systemów VR, metodykę tworzenia aplikacji VR, a także przeanalizował istniejące zastosowania VR w inżynierii produkcji. Analizując wady istniejących systemów VR, uzasadnił potrzebę opracowania nowego rozwiązania wspierającego dodatkowo badania interakcji dotykowej.

### **Rozdz.3. Cel pracy i problem badawczy**

***Celem pracy jest opracowanie nowego podejścia w budowie systemu VR, stosowanego do interaktywnych symulacji zorientowanych na prace wykonywane na stanowisku produkcyjnym.***

Autor zaproponował rozwiązanie integrujące urządzenia VR stosowane do wizualizacji (hełm wizyjny) i śledzenia pozycji obiektów rzeczywistych (optyczny system śledzenia), z tzw. aktywnym urządzeniem dotykowym, którego rolę odgrywa manipulator o równoległej strukturze kinematycznej (robot typu Delta). W zintegrowanym środowisku wirtualnym, użytkownik realizuje scenariusz symulacji, w trakcie której wchodzi w interakcję dotykową z elementami wirtualnej sceny i doświadcza ich właściwości fizycznych (np. kształt, wymiary gabarytowe, ciężar). Dane cyfrowe reprezentowane są przez ich rzeczywiste odpowiedniki oraz przez odpowiednio zaadaptowany efektor końcowy robota typu Delta, który przemieszcza się do pozycji umożliwiającej interakcję. Głównym zadaniem robota, jako alternatywy dla stosowanych obecnie urządzeń haptycznych, jest symulowanie kształtu obiektów cyfrowych, a tym samym dostarczenie użytkownikowi bodźca dotykowego w trakcie eksperymentów.

**Rozdz. 4 Metodyka badań** – Autor przedstawił cele badań eksperymentalnych, plan prac badawczych, koncepcję systemu do badań interakcji dotykowej z użytkownikiem, zastosowane zasoby i narzędzia do budowy zintegrowanego stanowiska badawczego, metodę integracji sprzętowej i programowej komponentów systemu do badań interakcji dotykowej. Autor opracował trzy scenariusze badawcze, w trakcie których użytkownik wchodził w interakcję z symulowanym obiektem. Dwa scenariusze przygotowano na potrzeby oceny stopnia immersji aplikacji VR. Z kolei trzeci scenariusz zakładał realizację interaktywnego treningu z opracowanego zadania proceduralnego.

**Rozdz. 5 Eksperymenty badawcze – przebieg i wyniki** – Autor przedstawia opis realizacji eksperymentów (badanie interakcji dotykowej oraz symulacja zadania

proceduralnego) oraz otrzymane wyniki, na bazie których dokonano oceny stopnia immersji rozwiązania (klasyczne badanie ankietowe) oraz stopnia skuteczności wirtualnego szkolenia (uśrednione pomiary z 5 prób realizacji zadania przez 4 grupy testujące, które liczyły po 15 osób każda, rejestrowano czas wykonania zadania, liczbę błędów, liczbę prób bez błędów i z błędami oraz liczbę wystąpień, gdy poproszono o pomoc). Na podstawie przedstawionych pomiarów, a także wyników badania ankietowego, w którym znalazły się wysokie (w opinii autora) oceny użytkowników co do stopnia immersji opracowanego rozwiązania, autor stwierdził, że skuteczność realizacji czynności wynikała wprost z otrzymanego bodźca dotykowego.

**Rozdz. 6 Podsumowanie i wnioski** – autor formułuje wnioski praktyczne oraz ogólne, a także proponuje kierunki dalszych prac.

### 3. Ogólna ocena pracy

Doktorant przedstawił jasno plan prac badawczych, koncepcję systemu do badań interakcji dotykowej z użytkownikiem, zastosowane zasoby i narzędzia do budowy zintegrowanego stanowiska badawczego, metodę integracji sprzętowej i programowej komponentów systemu do badań interakcji dotykowej oraz zakres badań eksperymentalnych.

Głównymi problemami badawczymi rozwiązanymi przez Doktoranta są:

- opracowanie koncepcji i budowa systemu (stanowiska) do badań interakcji dotykowej z użytkownikiem,
- opracowanie złożonych algorytmów symulacji obiektów wirtualnych w zdefiniowanym środowisku rzeczywistym oraz zaprojektowanie struktur danych i parametrów do analizy funkcjonalnej systemu,
- opracowanie metody integracji i komunikacji robota typu Delta z wybranymi systemami immersyjnymi (hełm wizyjny, system śledzenia) i fizycznymi artefaktami (reprezentującymi dane cyfrowe),
- opracowanie scenariuszy badawczych dla wybranych procedur i funkcji systemu oraz opracowanie interaktywnej aplikacji VR,
- weryfikacja funkcjonalna i techniczna opracowanego systemu oraz ocena przyjazności systemu dla użytkownika w różnych stadiach jego przyswajania.

Badania miały na celu sprawdzenie, na ile dostarczenie bodźca dotykowego w trakcie interakcji dotykowej użytkownika (różne grupy testowe) z elementami świata wirtualnego (symulowanymi przez efektor końcowy urządzenia dotykowego i modele fizyczne), będzie wpływać na immersyjność rozwiązania. Autor opracował trzy scenariusze badawcze, w trakcie

których użytkownik wchodził w interakcję z symulowanym obiektem. Dwa scenariusze przygotowano na potrzeby oceny stopnia immersji aplikacji VR. Z kolei trzeci scenariusz zakładał realizację interaktywnego treningu z opracowanego zadania proceduralnego. Celem testu było wykazanie, czy przygotowane rozwiązanie może być skutecznym narzędziem do szkoleń z zakresu czynności wykonywanych na stanowisku produkcyjnym.

Należy podkreślić również praktyczne podejście do oceny skuteczności systemu, które jest istotne z praktycznego punktu widzenia i kierunków rozwoju aplikacji aż do fazy wdrożenia w przemyśle. Zastosowanie wirtualnych modeli i systemów symulacyjnych odtwarzających rzeczywiste procesy produkcyjne, procedury operacyjne i technologiczne, które są adekwatne dla środowiska rzeczywistego, przynosi znaczne korzyści finansowe przy jednoczesnym zmniejszeniu ryzyka uruchamiania nowych procesów (zleceń, a nawet kontraktów) oraz optymalizacji wykorzystania zasobów. W granicznie pełnym zastosowaniu takich rozwiązań można dojść do rozwiązań tzw. digital factory, kiedy procesy rzeczywiste i wirtualne są realizowane i monitorowane w trybie on line.

Inny istotny z punktu widzenia przedsiębiorstwa czynnik to gromadzenie wiedzy technologicznej i biznesowej, dostępnej dla potrzeb budowania krótko i średnioterminowej strategii rozwoju przedsiębiorstwa.

Mimo pozytywnej oceny pracy można wskazać jej Autorowi kilka zaleceń i zadać kilka pytań:

- zbyt deklaratywnie podporządkował Doktorant cele pracy i niektóre jej wątki merytorycznym zagadnieniom efektywności i skuteczności uczenia się. Kształcenie inżynierskie i jak wspomniano gromadzenie wiedzy inżynierskiej w środowisku wirtualnym będzie nabierać coraz większego znaczenia. Jednak praca doktorska powinna być wybitnie ukierunkowana na cele badawcze, modele, algorytmy i skuteczność osiągania celów w oparciu o metody i narzędzia naukowe – należy podkreślić, że ta praca zawiera te elementy dość znacznie rozbudowane. Oczywiście skuteczność uczenia się (użyteczności systemu) jest tu istotnym kryterium oceny aplikacji.
- dobrze byłoby aby główne cele i funkcje aplikacji były osadzone w szerszym i komplementarnym podejściu w obszarze budowania takich systemów (struktura możliwych do zastosowania funkcji), a należy zauważyć, że Doktorant posiada bardzo szeroką wiedzę w tym zakresie. Dałoby to szerszą wiedzę czytelnikom pracy, a i byłoby przydatne Autorowi pracy w dalszych badaniach i w rozwoju kariery naukowej.

- czy Autor widzi możliwość „uzbrojenia” systemu w inne sensory do pomiaru sparametryzowanych cech użytkowych: czas przemieszczenie, siła oraz ich graniczne wartości,... itp., aby można było standaryzować realizowane procedury?
- na stronie 110 wzór 5.1 Autor przedstawia równanie statyki, ale z komentarza wynika, że pomiar siły był kontrolowany z pomocą mostka tensometrycznego, więc bardziej wskazana byłaby interpretacja wynikająca z układu pomiarowego – mostka tensometrycznego (belki tensometrycznej), a nie że  $F = m \times g$  [N] j - siła grawitacyjna,
- str. 121, rys. 5.14 podano wg. recenzenta mylny podpis pod rysunkiem i mylny jego tytuł, albo też odwrócona jest skala oceny, ponieważ: określano poziom trudności korzystania z aplikacji VR, a największa wartość na osi „słupka” jest oznaczona jako „łatwy”. Tytuł mógłby brzmieć ocena łatwości (przyjazności) posługiwania się systemem.

#### 4. Konkluzja końcowa

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Damiana Grajewskiego dotyczy bardzo istotnych, aktualnych i przyszłościowych zagadnień integracji metod i narzędzi do modelowania oraz symulacji procesów i procedur produkcyjnych w heterogennym środowisku modelowania wirtualnego z pełnym uwzględnieniem rzeczywistego technicznego i technologicznego otoczenia produkcyjnego (wytwórczego). Jest to ważny przyczynek do rozwijania bardziej złożonych aplikacji zarówno do zastosowań badawczych jak i wdrożeń przemysłowych.

Należy podkreślić staranną redakcję pracy, a w szczególności rozległą wiedzę Doktoranta w podjętym temacie. Należy też wskazać na interdyscyplinarny charakter pracy oraz dobre przygotowanie teoretyczne i inżynierskie Autora pracy do realizacji badań naukowych oraz właściwej interpretacji jej wyników.

Konkludując stwierdzam, że przedłożona do recenzji praca doktorska **mgra inż. Damiana Grajewskiego** zatytułowana „**Badanie interakcji dotykowej w rzeczywistości wirtualnej z zastosowaniem robota typu DELTA**” spełnia wymagania formalne oraz akademickie i stawiam wniosek o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

