Dr hab. inż. Czesław Łukianowicz,
prof. Politechniki Koszalińskiej,
Politechnika Koszalińska
Wydział Mechaniczny
Katedra Inżynierii Produkcji

Koszalin, 11 grudnia 2019 r.

R E C E N Z J A

rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego pt. Wyznaczanie pozycji obiektów w otoczeniu robota przemysłowego na podstawie zdjęć i chmur punktów

Promotor rozprawy doktorskiej: Pan dr hab. inż. Olaf Ciszak, prof. Politechniki Poznańskiej.

Podstawa opracowania recenzji: pismo DM.63.432.219 z dnia 11 października 2019 r., Pana prof. dr. hab. inż. Tomasza Łodygowskiego, Rektora Politechniki Poznańskiej.

1. Przedmiot recenzji

Rozprawa doktorska Pana mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego pt. "*Wyznaczanie pozycji obiektów w otoczeniu robota przemysłowego na podstawie zdjęć i chmur punktów*", o objętości 120 stron, zawiera 7 rozdziałów, w tym między innymi *Wstęp* i *Podsumowanie*. Na początku rozprawy, jako oddzielne punkty, zamieszczono *Spis stosowanych symboli i akronimów*, *Streszczenie* rozprawy w języku polskim i *Abstract* w języku angielskim. Na końcu rozprawy została umieszczona *Bibliografia*. Rozprawa zawiera łącznie 46 rysunków i 14 tabel. W *Bibliografii* podano spis 135. publikacji źródłowych. Są to przede wszystkim artykuły opublikowane w czasopismach naukowych i monografiach, referaty opublikowane w materiałach konferencyjnych, preprinty artykułów, a także biblioteki oprogramowania, umieszczone w elektronicznych archiwach i repozytoriach, oraz strony internetowe. Wśród publikacji zamieszczonych w *Bibliografii* są 4 artykuły naukowe, których współautorem jest mgr inż. Jakub Wojciechowski. Kopia elektroniczna rozprawy doktorskiej została dołączona, w postaci płyty CD, do wydrukowanego oryginału rozprawy.

2. Tematyka rozprawy i jej struktura

Postępująca automatyzacja produkcji coraz częściej wymaga wyposażenia robotów przemysłowych w systemy umożliwiające identyfikację obiektów, znajdujących się w ich zmiennym otoczeniu, oraz określania położenia tych obiektów. Obecnie znane rozwiązania tego problemu polegają na ogół na zastosowaniu tzw. robotów adaptacyjnych. Najczęściej roboty adaptacyjne są wyposażone w sensoryczne systemy optyczne, skanujące lub wizyjne, sprzężone z układem sterującym pracą robota. Informacja o aktualnym położeniu danego obiektu, uzyskana za pomocą systemów optycznych jest wykorzystywana przez oprogramowanie sterujące robotem do bezkolizyjnego przemieszczenia i pozycjonowania efektora końcowego robota względem obiektu.

Rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego dotyczy badań nad sposobami wyznaczania pozycji obiektów w otoczeniu robotów przemysłowych, na podstawie analizy chmur punktów uzyskanych np. w wyniku skanowania laserowego otoczenia robota oraz na podstawie analizy dwuwymiarowych zdjęć tego otoczenia. Celem tych badań jest zwiększenie autonomiczności zrobotyzowanych systemów produkcyjnych w zakresie realizacji operacji technologicznych, przy zmiennym położeniu obiektów, w tym operacji obróbkowych i montażowych. Tematyka tej rozprawy mieści się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych i obejmuje zagadnienia z dyscypliny inżynieria mechaniczna, a także wybrane problemy z pogranicza automatyki i robotyki przemysłowej oraz zastosowań metod informatyki.

3. Przedmiot rozprawy, tezy, jej cele i struktura

Podstawowym zagadnieniem naukowym rozpatrywanym w recenzowanej rozprawie jest przeanalizowanie, zbadanie i zaproponowanie skutecznych, szybkich i niezawodnych metod wyznaczania położenia obiektów w otoczeniu robotów przemysłowych w celu elastycznego i autonomicznego sterowania pracą robotów w zmiennym środowisku.

W rozprawie Autor nie sformułował w sposób jawny tez/hipotez pracy, co jest nietypowe w polskich warunkach, lecz dosyć powszechnie występuje w pracach doktorskich realizowanych za granicą. Natomiast jasno sformułowane zostały 4 cele pracy. Pierwszy z nich to opracowanie niezbyt drogiego urządzenia, zintegrowanego z systemem sterowania robotem, przeznaczonego do akwizycji danych trójwymiarowych o cechach geometrycznych obiektów znajdujących się w przestrzeni roboczej robota przemysłowego. Drugim celem rozprawy było opracowanie sposobów sterowania robotem na podstawie danych o położeniu obiektów w przestrzeni roboczej robota, w tym procedur kalibracyjnych i technologicznych dla zidentyfikowanych obiektów. Trzeci cel to zwiększenie szybkości i niezawodności określania położenia obiektów na podstawie wyznaczonych wcześniej chmur punktów. Czwartym celem rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego było opracowanie techniki wykorzystującej uczenie maszynowe, do wyznaczania położenia obiektów w przestrzeni roboczej robota.

Recenzowana rozprawa doktorska ma charakter badawczo-projektowy. Jej struktura jest prawidłowa i typowa dla tego rodzaju prac. W rozdziale 1. *Wstęp* przedstawiono ogólnie problematykę rozprawy i jej zawartość. Rozdział 2. *Analiza stanu wiedzy* zawiera wprowadzenie do metod akwizycji, reprezentacji, rekonstrukcji, opisu i przetwarzania danych o trójwymiarowych geometrycznych właściwościach obiektów. Opisano w nim także aktualny stan wiedzy dotyczącej przetwarzania chmur punktów. W rozdziale 3. pracy, zatytułowanym *Zrobotyzowany skaner laserowy*, zaprezentowano – opracowany przez Autora rozprawy – układ skanera optycznego. Rozdział 4. *Dostosowanie programu robota do pozycji obiektów technologicznych* poświęcony został adaptacyjnemu systemowi sterowania robotem przemysłowym. W rozdziale 5. *Sterowanie robotem przemysłowym przy użyciu skanera 3D* zostały zaproponowane autorskie algorytmy analizy chmur punktów. Zostały one dostosowane do pracy w ramach zrobotyzowanego stanowiska i zweryfikowane doświadczalnie. Rozdział 6. *Wyznaczanie pozycji obiektów przy użyciu uczenia*

maszynowego zawiera propozycję wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do dopasowywania wyznaczonych chmur punktów do tzw. chmur docelowych.

4. Merytoryczna ocena rozprawy

Rozwój inżynierii mechanicznej, a zwłaszcza współczesnych systemów wytwarzania, podlega pewnym trendom, które w znacznym stopniu związane są z koncepcją Przemysłu 4.0. Jednym z takich trendów, widocznym zwłaszcza w nowoczesnych liniach technologicznych, jest wyposażenie niektórych urządzeń, takich np. jak roboty, czy też roboty współpracujące, w pewien stopień autonomii działania. Wyróżnia się przy tym dwa typy autonomii: energetyczną i informacyjną. W recenzowanej pracy podjęto problematykę zwiększenia autonomii informacyjnej robota przemysłowego. Na ogół problem ten rozwiązywany jest za pomocą wyposażenia robota w sensory, które generują sygnały pozwalające dostosowywać działanie robota do realizowanego zadania. Zagadnienie komplikuje się wówczas, gdy sygnały otrzymywane z sensorów cechuje wielowymiarowość. Autor rozprawy podjął trudną tematykę, dotyczącą akwizycji i wykorzystania przestrzennej, trójwymiarowej informacji o kształcie, wymiarach i położeniu obiektów znajdujących się otoczeniu robota przemysłowego do sterowania działaniem robota. Dzięki zintegrowaniu z robotem elementów zbudowanego skanera laserowego, robot stał się bardziej autonomiczny, zaś system uzyskał zwiększoną zdolność działania w zmiennym otoczeniu.

4.1. Czy analizę źródeł przeprowadzono w rozprawie w sposób właściwy?

W rozdziale drugim rozprawy, jej Autor przeprowadził gruntowną analizę stanu wiedzy w zakresie niezbędnym z punktu widzenia tematyki pracy. Skoncentrował się przede wszystkim na sposobach pozyskiwania danych o przestrzennym geometrycznym ukształtowaniu obiektów. Następnie wyspecyfikował zadania pozwalające na identyfikację i ocenę położenia obiektów oraz przeanalizował dostępne publiczne zbiory danych 3D. Bardzo ważnym i wartościowym elementem analizy źródeł jest część poświęcona dopasowywaniu chmur punktów oraz zastosowaniu sztucznych sieci neuronowych w przetwarzaniu danych przestrzennych. Autor dokonał charakterystyki i oceny praktycznej przydatności licznych algorytmów i programów umieszonych w otwartych bibliotekach elektronicznych, repozytoriach i archiwach, a następnie dokonał podsumowania.

Analizę źródeł zamieszczoną w drugim rozdziale rozprawy oceniam bardzo pozytywnie. Została ona przeprowadzona szeroko i w sposób kompetentny, świadczący o bardzo dobrej orientacji Autora w podjętej problematyce. Pewną niespodzianką dla czytelnika może być umieszczenie celów pracy na końcu drugiego rozdziału rozprawy.

4.2. Czy Autor rozwiązał postawione zagadnienie i zrealizował cele rozprawy?

Z punktu widzenia merytorycznej oceny recenzowanej rozprawy doktorskiej najważniejsze są rozdziały trzeci, czwarty, piąty i szósty. W rozdziale 3. przedstawiono zasadę działania, krótki opis i ocenę dokładności prostego skanera laserowego, którego część skanująca zintegrowana została z ramieniem robota. Rozdział 4. dotyczy modyfikacji programu robota, tak aby uwzględniał on podczas działania aktualne położenie obiektów technologicznych. Cel ten osiągnięto dzięki wykorzystaniu alfanumerycznych, dwuwymiarowych, matrycowych kodów graficznych QR, umieszczanych na obiektach, do

określania ich aktualnej pozycji. Sterowaniu działaniem robota na podstawie informacji o obiektach, uzyskanej za pomocą skanera laserowego, został poświęcony 5. rozdział rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego. Przedstawiono w nim między innymi algorytm identyfikacji obiektów na podstawie chmury punktów oraz algorytm generowania trajektorii efektora robota dla zadania montażowego. Dokonano także sprawdzenia powtarzalności dopasowania obiektu do chmury punktów, zbadania odporność algorytmu identyfikacji obiektu na zasłonięcia i występowanie tzw. punktów odstających. Przeprowadzono także proste badania pozwalające określić powtarzalność chwytania przez efektor robota obiektów umieszczonych na palecie w sposób losowy.

Wartościowym uzupełnieniem omówionych dotychczas rozdziałów rozprawy jest rozdział 6., w którym Autor rozprawy przedstawił możliwość uczenia maszynowego opracowanego systemu, w celu identyfikacji i wyznaczania położenia obiektów w otoczeniu robota. Przeanalizował w nim w sposób zwarty i czytelny wszystkie zasadnicze elementy, które powinny być wzięte pod uwagę podczas praktycznej realizacji tej metody. Do automatycznego generowania deskryptorów chmur punktów zaproponował wykorzystanie hierarchicznej konwolucyjnej sztucznej sieci neuronowej o znanej architekturze PointNet++. W rozdziale tym przedstawione zostały także wyniki praktycznej weryfikacji tej koncepcji zastosowanej w różnych konfiguracjach. Wskazują one, na przydatność proponowanego rozwiązania do analizy danych dwu i trójwymiarowych, chociaż jego skuteczność nie jest jeszcze zadowalająca, a czas obliczeń jest zbyt długi.

Reasumując, Autor rozprawy przedstawił próbę rozwiązania zagadnienia polegającego na zwiększeniu autonomii informacyjnej robota przemysłowego i zrealizował wszystkie cele rozprawy doktorskiej. Merytoryczną część rozprawy oceniam pozytywnie. Szczególnie wartościowe jest to, że przy wielu istniejących ograniczeniach, Autor rozprawy zdawał sobie sprawę z tych ograniczeń i starł się korzystać z najnowszej wiedzy w zakresie dostępnych algorytmów i oprogramowania.

4.3. Na czym polega oryginalność rozprawy ?

Oryginalny wkład Autora rozprawy doktorskiej do nauki polega na:

1. Zbadaniu oryginalnej, innowacyjnej metody określania położenia obiektu w otoczeniu robota przemysłowego na podstawie danych dotyczących chmury punktów, uzyskanej za pomocą prostego skanera laserowego wyposażonego w układ detekcyjny w postaci kamery wizyjnej.
2. Przeanalizowaniu oraz przetestowaniu skuteczności nowoczesnych algorytmów dopasowujących chmury punktów do modelu obiektu, co pozwoliło na zaproponowanie odpowiedniej sekwencji przetwarzania danych, wyznaczania punktów charakterystycznych i generowania ich deskryptorów.
3. Zaproponowanie i wstępne zweryfikowanie nowej techniki wyznaczania położenia obiektu przy użyciu uczenia maszynowego, wykorzystującej istniejące architektury konwolucyjnych sztucznych sieci neuronowych, a także opracowanie oryginalnej techniki ich uczenia.

Ważnym atutem rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego jest innowacyjny charakter proponowanych rozwiązań. Autor rozprawy posiada dużą biegłość

w wykorzystaniu nowoczesnych algorytmów i technik przetwarzania danych dotyczących przestrzennych właściwości obiektów. Wykazał się też znajomością zagadnień dotyczących projektowania i integrowania systemów pomiarowych oraz sterujących. Oryginalność, innowacyjność i poziom naukowy wymienionych osiągnięć oceniam bardzo pozytywnie.

4.4. Czy wyniki rozprawy są przedstawione w sposób jasny i przekonujący?

Podstawowe zagadnienia i problemy będące przedmiotem rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego, a także uzyskane wyniki są na ogół przedstawione w sposób zwięzły, jasny i przekonujący. Sprzyjają temu zarówno językowe umiejętności Autora rozprawy, a także odpowiednio dobrane zależności matematyczne, opisy stosowanych algorytmów, tabele i ilustracje. Jednakże w recenzowanej rozprawie zdarzają się sytuacje, na szczęście niezbyt liczne, w których czytelnik nie zawsze ma możliwość uzyskania bardziej szczegółowych, wyczerpujących informacji pozwalających na lepsze zrozumienie przekazu Autora rozprawy.

Po pierwsze, Autor niekiedy używa terminów, akronimów oraz symboli bez ich objaśniania. Zakłada zapewne, że są one znane czytelnikowi lub też przyjmuje, że informacje te czytelnik może znaleźć w cytowanych w rozprawie materiałach źródłowych. Na przykład:

1. Na str. 22, w trzecim akapicie użyto sformułowania cyt.: „na łatę odzwierciedlającą lokalną geometrię". Warto wyjaśnić co oznacza termin „łata".
2. Co oznaczają symbole s_A, s_B, s_C zamieszczone w tab. 4.1?
3. Na str. 94 użyto symbolu ORB bez szerszego wyjaśnienia, co oznacza ten akronim i na czym polega metodą, którą oznacza się tym symbolem.

Sugeruję, aby w przyszłości przyjąć zasadę, że albo Autor objaśnia wprowadzane akronimy, wzory i terminy, albo ich nie używa, a dany problem stara się wyjaśnić w inny sposób.

Po drugie, w tekście rozprawy pojawiają się niezbyt fortunne określenia, które czytelnik co prawda na ogół potrafi zrozumieć, ale są one nieprawidłowe. Najczęściej są one wynikiem nieudanego tłumaczenia z języka angielskiego, lub zostały przejęte z języka potocznego. Dla przykładu:

1. W ostatnim zdaniu p. 2.2.6 (str. 22) czytamy o „sieci przeciwników".
2. Na str. 21 czytamy o „wyzwaniu SHERC'16" zamiast o „konkursie SHERC'16".
3. W ostatnim zdaniu na str. 23 występuje termin cyt.: „waga" zamiast masa, a na str. 47 czytamy cyt.: „o wadze...0,2 kg".
4. Na str. 33 możemy przeczytać o cyt.: "funkcji sferycznej, którą można rozbić do składowych harmonicznych".

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

Słabsze strony i drobne wady recenzowanej rozprawy nie są znaczące. Są one związane przede wszystkim z jej stroną redakcyjną i przedstawione zostały w poprzednim punkcie niniejszej recenzji. Nie wpływają one w sposób istotny na moją pozytywną ocenę merytorycznej strony recenzowanej rozprawy doktorskiej.

4.6. Jaka jest przydatność rozprawy dla nauk inżynieryjno- technicznych?

W rozprawie doktorskiej mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego przedstawiono oryginalną metodę wyznaczania położenia obiektów w otoczeniu robota przemysłowego. Metoda ta oparta jest na zastosowaniu stosunkowo prostych środków technicznych, takich jak skaner laserowy z kamerą wizyjną i znaczniki kodów QR, ale wymaga skomplikowanych algorytmów przetwarzania sygnałów. Można mieć nadzieję, że metoda ta zostanie dostrzeżona przez środowisko naukowe i ta będzie skutecznie rozwijana. Dlatego, moim zdaniem, przydatność rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego dla nauk inżynieryjno-technicznych nie budzi żadnych wątpliwości.

W końcowej części rozprawy doktorskiej zamieszczono rozdział szósty *Podsumowanie*. Uważam, że w *Podsumowaniu* Autor rozprawy prawidłowo podsumował wyniki swojej pracy. Być może warto byłoby w tym rozdziale, nieco szerzej niż zostało to uczynione, przedstawić kierunki dalszych badań.

5. Inne uwagi

Rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego jest dobrze przygotowana pod względem edytorskim oraz starannie pod względem językowym. Mimo znacznej złożoności tematyki jest napisana w sposób zrozumiały. W tekście rozprawy, rzadko zdarzają się drobne nieścisłości, błędy redakcyjne i literowe oraz sformułowania wywołujące wątpliwości. W rozprawie mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego incydentalnie pojawiają się błędy stylistyczne. W porównaniu do innych prac, które miałem możliwość recenzować, rozprawę doktorską mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego mogę uznać pod tym względem za bardzo dobrą.

Niezależnie od tego, że moja ocena rozprawy jest bardzo pozytywna, u czytelnika pracy, a zwłaszcza u recenzenta, mają prawo pojawić się wątpliwości, pytania, sugestie oraz uwagi dyskusyjne, które mogą także zainteresować Autora. Oto niektóre z nich:

1. Jakie wielkości są przypisane osiom wykresów zamieszczonych na rys. 2.7?
2. Rys. 3.2 nie jest łatwy do zrozumienia. Proszę o wyjaśnienie, gdzie na tym rysunku byłby położony obiektyw kamery wizyjnej i jej sensor.
3. Czy użyty przez Autora na str. 50. termin cyt.: „notację Hessa" jest prawidłowy?
4. Czy równanie (3.6) jest poprawne?
5. Podane wartości błędów powtarzalności na str. 62 nie powinny moim zdaniem być numerowane.
6. Czy tytuł p.5.3.1 nie budzi wątpliwości Autora?
7. W p. *Biblografia* podano publikacje źródłowe, które uporządkowano w kolejności cytowania w tekście pracy. Dlaczego pozycje [13] i [14] nie spełniają tej zasady?

6. Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego dotyczy badań teoretycznych i eksperymentalnych związanych z wyznaczaniem położenia obiektów w otoczeniu robotów przemysłowych. Koncentruje się ona na metodach opartych na analizie chmur punktów otrzymanych w rezultacie skanowania laserowego otoczenia robota oraz na

analizie dwuwymiarowych zdjęć tego otoczenia. Celem aplikacyjnym badań zrealizowanych w recenzowanej rozprawie było dążenie do zintegrowania systemów pomiarowych i wizyjnych z układem sterowania robotów przemysłowych, co pozwala na zwiększenie autonomiczności zrobotyzowanych systemów produkcyjnych.

Ważnym elementem przy ocenie rozprawy doktorskiej jest jej związek z procesami poznania oraz stosowaniem odpowiedniej metodyki badań, co bezpośrednio lub pośrednio wpływa na poszerzenie stanu wiedzy. W przypadku rozprawy mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego warunek ten został spełniony. Rozprawa jest prawidłowo wykonana pod względem metodologii badań, a jej Autor jest dobrze przygotowany do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Doktorant znacznie poszerzył swoją wiedzę dotyczącą stosowania metod i narzędzi badawczych, zwłaszcza informatycznych, a także w zakresie praktycznego zastosowania metod sztucznej inteligencji.

Autor rozprawy przeanalizował i zbadał eksperymentalnie oryginalną metodę wyznaczania pozycji obiektów w otoczeniu robotów przemysłowych. Następnie korzystając z metod naukowych opracował i zweryfikował techniki wspomagające wyznaczanie położenia obiektów w przestrzeni roboczej robota przemysłowego, oparte na wykorzystaniu uczenia maszynowego i sztucznych sieci neuronowych. Badania przeprowadzone przez Autora rozprawy mają dużą wartość poznawczą i aplikacyjną. Mieszczą się one w głównym nurcie nowoczesnych prac badawczych ukierunkowanych na rozwiązanie ważnych problemów współczesnej inżynierii mechanicznej. Wszystko to wskazuje na dobre interdyscyplinarne przygotowanie Autora rozprawy do pracy naukowej, a także na Jego szeroką wiedzę, inwencję i potencjał twórczy. Podsumowując moją ocenę stwierdzam, że recenzowana rozprawa doktorska:

- zawiera oryginalne, autorskie rozwiązanie ważnego zagadnienia naukowego,
- wskazuje na gruntowną i szeroką wiedzę Autora w uprawianej dyscyplinie,
- świadczy o umiejętność Autora samodzielnego prowadzenia badań naukowych.

Na podstawie dokonanej analizy i oceny rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego pt. „Wyznaczanie pozycji obiektów w otoczeniu robota przemysłowego na podstawie zdjęć i chmur punktów" stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w *Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki* (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789), a zwłaszcza w art. 13 tej ustawy. Wnioskuję zatem o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgra inż. Jakuba Wojciechowskiego do publicznej obrony.