Szczecin 08.01.2020

Dr hab. inż. Mirosław Pajor prof. ZUT
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Al. Piastów 19, 70-310 Szczecin

Recenzja pracy doktorskiej pt." Wyznaczanie pozycji obiektów w otoczeniu robota przemysłowego ma podstawie zdjęć i chmur punktów" autorstwa mgr inż. Jakuba Wojciechowskiego.

Recenzję opracowano na podstawie zlecenia DM.63.432.2019 Pana Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania – Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, Politechniki Poznańskiej dr hab. inż. Olafa Ciszaka z dnia 11.10.2019.

1. Przedstawienie treści pracy

W przemyśle maszynowym i wytwórczym obserwuje się bardzo szybkie przemiany, wręcz o charakterze rewolucyjnym, a analitycy nazwali ten proces czwartą rewolucją przemysłową „Przemysł 4.0". Głównym wyróżnikiem tej rewolucji jest cyfryzacja produkcji, wprowadzanie nowych systemów diagnostycznych maszyn, intensywny rozwój innowacyjnych interfejsów komunikacyjnych o wysokim poziomie interaktywności oraz wzrost liczby układów sensorycznych „sztucznych zmysłów" instalowanych na robotach i maszynach wytwórczych. Szczególnie zaawansowane są prace nad rozwojem technik samoorganizacji procesów produkcyjnych oraz autonomiczności działania maszyn i robotów przemysłowych. Ważnym zagadnieniem w obszarze autonomicznych maszyn jest rozpoznawanie przez nie obiektów zlokalizowanych w ich bezpośrednim otoczeniu, czyli tzw. „widzenie maszynowe". Nowe technologie informatyczne dostarczają zaawansowanych narzędzi do budowy procedur analizy dużych zbiorów danych pozyskiwanych z cyfrowych systemów wizyjnych i systemów skanowania parametrów geometrycznych obiektów zlokalizowanych w przestrzeni roboczej. Technologie te umożliwiają zdecydowane podwyższenie poziomu autonomiczności maszyn w zakresie samodzielnego

przemieszczania się, manipulowania przedmiotami, wykrywania obecności człowieka i wielu innych dziedzinach.

Recenzowana rozprawa doktorska wpisuje się w tę bardzo interesującą tematykę, niezmiernie ważną dla rozwoju nowych technik sterowania i programowania maszyn oraz komunikacji operator-maszyna. Pan mgr inż. Jakub Wojciechowski podejmuje się realizacji badań nad problematyką efektywnego rozpoznawania obiektów na podstawie danych wizyjnych i chmury punktów pozyskanych w procesie przestrzennego skanowania geometrii otoczenia. Podstawowym problemem do rozwiązania w tego typu systemach analizy danych jest opracowanie efektywnych procedur rozpoznawania obiektów i wyznaczania ich pozycji i orientacji w przestrzeni analizowanej sceny. W recenzowanej pracy Autor podejmuje się opracowania wydajnych i niezawodnych procedur wyznaczania położenia obiektów w chmurach punktów pozyskanych w procesie skanowania, a jako jedno z narzędzi proponuje technikę uczenia maszynowego z zastosowaniem sztucznych sieci neuronowych. Jest to bardzo interesujący problem badawczy, a jego podjęcie jest w pełni uzasadnione.

Opiniowana praca doktorska liczy 110 strony i składa się z siedmiu rozdziałów, streszczenia w języku polskim i angielskim oraz wykazu stosowanych symboli i akronimów. Na końcu zamieszczono spis literatury zawierający 135 pozycji literaturowych z czego 94 to pozycje z ostatnich dziesięciu lat. Dobór źródeł literaturowych jest prawidłowy i nie budzi zastrzeżeń. Poszczególne rozdziały rozprawy doktorskiej obejmują: wstęp, analizę stanu wiedzy zakończoną sformułowaniem cel pracy oraz cztery rozdziały merytoryczne zakończone podsumowaniem i wnioskami końcowymi.

W pierwszym rozdziale rozprawy Autor krótko definiuje problem i wskazuje tematykę jaka będzie rozważana w rozprawie. Następnie, po wnikliwej analizie stanu wiedzy, Autor wykazuje potrzebę podjęcia badań nad opracowaniem urządzeń do skanowania geometrii otoczenia oraz rozwojem technik rozpoznawania i wyznaczania położenia obiektów na podstawie zeskanowanej chmury punktów. Wyniki tych badań będą zastosowane do planowania trajektorii ruchu robota przemysłowego. Rozdział prezentujący stan wiedzy zakończony jest krótką prezentacją celów pracy. Autor nie formułuje hipotezy, którą ma zamiar udowodnić w rozprawie. Formułuje natomiast cztery cele, z których pierwszy ma charakter konstrukcyjny i obejmuje budowę urządzenia skanującego, drugi dotyczy zaprojektowania technik sterowania robotem a dwa ostatnie obejmują rozwój metod identyfikacji obiektów i ich położenia na podstawie

chmury zeskanowanych punktów. Cele pracy są ambitne i adekwatne do tematyki prowadzonych badań. Kolejne rozdziały to rozdziały merytoryczne opisujące wyniki przeprowadzonych badań. Pierwszy z nich, tj. rozdział trzeci rozprawy, przedstawia konstrukcję oraz zasadę działania skanera laserowego opracowanego przez Autora rozprawy. Główną jego zaletą ma być niski koszt i prostota działania umożliwiająca zastosowanie skanera jako inteligentnego sensora wizyjnego na robocie przemysłowym. W rozdziale zaprezentowano wyniki z testów skanowania zaprojektowanym i wykonanym skanerem. W następnym rozdziale Autor przedstawia koncepcję zrobotyzowanego stanowiska wyposażonego w system wizyjny, którego geometria jest kalibrowana z zastosowaniem kodów matrycowych QR służących jednocześnie do rozpoznawania obiektów w przestrzeni roboczej.

W rozdziale piątym Autor przedstawił opracowane przez siebie procedury sterowania robotem przemysłowym z zastosowaniem zaprojektowanego skanera 3D oraz zaimplementowanych procedur rozpoznawania obiektów i ich położenia na podstawie danych geometrycznych (chmura punktów) z procesu skanowania. W rozdziale dokonano analizy wpływu parametrów działania różnych metod doboru deskryptorów do wykrywania obiektów na skuteczność ich działania. Autor przeprowadził walidację eksperymentalną badanych metod i zaproponował odpowiednią ich kombinację o największej efektywności działania.

W rozdziale szóstym Autor przedstawił zastosowanie technologii sieci neuronowych do opracowania procedur wyznaczania deskryptorów identyfikujących obiekty za pomocą algorytmów uczenia maszynowego. Zaproponowane podejście pozwoli wyeliminować konieczność ręcznego definiowania deskryptorów i całkowicie zautomatyzować procedury wizyjnego rozpoznawania obiektów na podstawie chmury punktów. Autor zaprojektował eksperyment numeryczny, w którym wykorzystał dostępne w bazach internetowych modele różnorodnych obiektów do analizy skuteczności działania testowanych przez siebie algorytmów uczenia maszynowego.

Rozprawę zakończono w rozdziale siódmym, w którym Autor zamieścił podsumowanie oraz wyciągnął wnioski końcowe i ocenił poziom zrealizowania zamierzonego celu pracy.

2. Oryginalne osiągnięcia pracy

Bardzo dużym atutem pracy doktorskiej Pana Jakuba Wojciechowskiego jest innowacyjny charakter proponowanych rozwiązań wpisujący się w trendy zmian postulowanych w koncepcji „Przemysł 4.0" . Autor posiada dużą biegłość w posługiwaniu się nowoczesnymi narzędziami w zakresie pozyskiwania i komputerowej analizy danych z systemów wizyjnych. Ponadto Autor wykazał się znajomością zagadnień projektowania zaawansowanych urządzeń mechatronicznych takich jak wizyjny skaner laserowy. Ponadto ma duże doświadczenie w projektowaniu algorytmów analizy danych wizyjnych oraz algorytmów sterowania systemami zrobotyzowanymi.

Autora nie stronił również od prac eksperymentalnych. W celu praktycznego potwierdzenia skuteczności działania algorytmów programowania robotów z zastosowaniem systemów wizyjnych, Autor przeprowadził szereg badań doświadczalnych. Eksperymenty praktyczne w przyjętym zakresie potwierdził poprawność działania opracowanych algorytmów automatycznego programowania zadań robota na podstawie danych pozyskanych ze specjalizowanego systemu wizyjnego. 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 skanera do pomiary parametrów geometrycznych przestrzeni roboczej robota przemysłowego. Osiągnięcie ma bardziej charakter konstrukcyjny niż naukowo badawczy. Technika skanowania z zastosowaniem prążka laserowego jest znana i dość powszechnie stosowana, jednak są to urządzenia stosunkowo drogie zwykle stosowane w laboratoriach metrologicznych. Główną zaletą opracowanego rozwiązania jest stosunkowo niski koszt urządzenia umożliwiający jego zastosowanie jako wizyjnego sensora pomocniczego (zmysł widzenia maszynowego) w warunkach produkcyjnych.
2. Szczegółowa analiza skuteczności działania dostępnych klasycznych algorytmów wykrywania położenia obiektów w chmurach punktów oraz testy ich skuteczności zależnej od doboru wybranych parametrów. Analiza ta umożliwia opracowanie optymalnej kompilacji algorytmów przetwarzania

wstępnego, doboru deskryptorów oraz oryginalnej techniki podziału chmury punktów na bloki.

3. Zastosowanie technologii uczenia maszynowego do automatycznego wyznaczania deskryptorów i wykrywania obiektów i ich położenia w chmurze punktów. Rozwiązanie oparto o znane struktury sieci neuronowych z zastosowaniem autorskiej techniki uczenia.

Pozytywnie oceniam oryginalność, innowacyjność i poziom naukowy wymienionych osiągnięć.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne

Do uwag dyskusyjnych i krytycznych zaliczyłbym:

1. Autor w rozdziale trzecim na str. 47 stwierdza, że „nie są znane ... rozwiązania, w których źródło wiązki przenoszone jest przez ramię robota, z którego odczytywane jest aktualne położenie wiązki". Idea przenoszenia skanera (z prążkiem laserowym lub światła strukturalnego) przez robota jest dość powszechnie stosowana. Faktycznie pozycja skanera nie jest czytana bezpośrednio z robota, zwykle z uwagi na niewystarczającą dokładność pozycjonowania. Istnieją natomiast rozwiązania, w których nośnikiem skanera jest np. ramie pomiarowe charakteryzujące się większą dokładnością pomiaru położenia skanera. Jakie zalety ma opracowana konstrukcja skanera w stosunku do rozwiązań istniejących? Dokładność skanowania nie jest wysoka, czy zatem tylko cenowo jest konkurencyjny? W rozwiązaniu zastosowano stałą pozycję kamery. Takie podejście ma pewne wady – naraża system na problemy z okluzją (niewidoczne powierzchnie boczne). Czy zastosowanie ruchomej kamery wraz ze źródłem prążka laserowego nie będzie skuteczniejsze i dokładniejsze?
2. Pokazane na str. 62 wyniki testów są robione na kulach o niedużej wysokości znajdujących się na blacie skanera. Zastosowana kamera jest ogniskowana na blacie i nie ma procedur automatycznego ostrzenia. Czy zatem wraz ze wzrostem współrzędnej pionowej (z) nie nastąpi pogorszenie dokładności skanowania ? Na fotografii stanowiska kamera jest umieszczona stosunkowo wysoko, zatem możliwe jest skanowanie wyższych elementów.
3. Prezentowane w tabeli 4.1 wyniki analizy powtarzalności pozycjonowania nie są imponujące i praktycznie eliminują takie rozwiązanie z wielu przemysłowych zastosowań. Czy Autor analizował możliwe przyczyny tych błędów (możliwości ich

minimalizacji)? Samo zastosowanie kodów QR jako markerów pozycjonujących jest dyskusyjne i może być źródłem błędów oraz problemów z ich wykrywaniem w przestrzeni roboczej.

4. Na str. 82 w tabeli 5.1 zamieszczono wyniki analizy stopnia wykrywalności obiektu z cząstkowym pomiarem skanerem. Szkoda, że autor nie zamieścił pełnego rysunku skanowanego elementu bo na podstawie rysunków z tabeli trudno się domyśleć co to jest za obiekt. Największe prawdopodobieństwo wykrycia tego obiektu jest na poziomie 81%, zatem w 19% przypadków obiekt nie zostanie poprawnie wykryty. Czy istnieją zalecenia (normy), które wskazują na jakim poziomie musi być wykrywalność aby rozwiązanie mogło mieć zastosowanie w praktyce przemysłowej?
5. Na stronie 85 w tabeli 5.3 zamieszczono wyniki prawdopodobieństwa wykrycia obiektów w zależności od stopnia zasłonięcia. W tym przypadku uzyskano stosunkowo wysoki poziom wykrywalności (np. 99% wykrywalności przy 25% zasłonięciu). Jak te wyniki maja się do tych zamieszczonych w tabeli 5.1 na str. 82 – skąd tak znaczne różnice?
6. Na str. 86 w tabeli 5.4 pokazano wyniki badania odporności algorytmów detekcji na punkty odstające. Nie do końca jest dla mnie jasne jak rozumieć parametr „k". Jeżeli zastosujemy dosłownie definicje podaną w tabeli to wartość k=1 oznacza, że liczba punktów odstających jest równa liczbie punktów modelu (???), zatem wszystkie są błędne– jak zatem wykryć obiekt? Co oznacza, że mamy cztery razy więcej punktów odstających niż punktów modelu, czy pojawiły się jakieś punkty z otoczenia? A może wskaźnik k jest podawany w procentach ?
7. Zaproponowane na str. 97 w tabeli 6.2 modele obiektów, na których prowadzono badania weryfikacyjne, bardziej pasują do zagadnień grafiki czy gier komputerowych i mają mały związek z techniką. Dlaczego Autor zdecydował się na te obiekty? Wydaje się, że warto by było stworzyć bibliotekę modeli technicznych, które mają określoną specyfikę (duża ilość powierzchni prostych typu walec, płaszczyzna itp.) tym bardziej, że Autor dysponował skanerem. Takie podejście podkreśliłoby techniczny aspekt rozprawy. Uwaga ta koresponduje z komentarzem Autora zawartym na str. 103, gdzie zawarta jest krytyczna ocena działania algorytmów w odniesieniu do brył prostych.
8. Na str. 97 Autor stwierdza, że prawidłowo wyznaczona lokalizacja to ta, której błąd pozycji jest poniżej 20 mm a orientacji poniżej 7.5° – to bardzo duży błąd w warunkach technicznych, byłby on problematyczny nawet w procesach spawania i pakowania. Proszę o komentarz w tym temacie.

Tekst pracy został napisany starannie, część edytorska pracy jest na dobrym poziomie. Można mieć jedynie zastrzeżenie co do wielkości rysunków zamieszczanych w rozprawie. Wiele rysunków jest bardzo małych (wręcz są jak piktogramy) i trudno jest ocenić czytającemu geometryczne aspekty omawianych problemów. W trakcie czytania pracy wykryłem kilka błędów redakcyjnych:

- Str. 50 czym jest "t" we wzorze 3.8 i jakie jest powiązanie tego z parametrem „t_r".
- Str. 59. Na rys.3.10 wariant pierwszy i trzeci nie wiele się różnią, nie są jasne intencje Autora – czy chodzi tylko o gęstość skanowania?
- Str. 60 – ostatnie zdanie pierwszego akapitu. Jest „Zostały one usuwane…", winno być „Były one usuwane…".
- Str. 63 – pierwszy akapit, drugie zdanie. Jest „Zastosowanie…", winno być „Zastosowania…".
- Str. 76 – trzeci akapit. Jest „.. odbywa się tam w za pomocą..", winno być „.. dobywa się tam za pomocą..".
- Str. 87 – na rys.5.4 czerwone kropki opisane w tekście pod rysunkiem są bardzo słabo widoczne.
- Str. 88 – pierwsze zdanie. Jest „ ... metod zdolnej ...", winno być „ ... metody zdolnej …" lub „… metod zdolnych …".
- Str. 89 – pierwsze zdanie. Dwukrotnie powtórzony wyraz „można".
- Str. 98 – wzór (6.4) i (6.5). Jak się ma użyte we wzorach Δ_R i Δ_t do opisywanych we wcześniejszym akapicie Δt_T i ΔR_T?
- Str.99 – akapit po rys.6.6. Jest „… uznawane są nieprawidłowe.", winno być „… uznawane są za nieprawidłowe.".

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. Jakuba Wojciechowskiego 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**.

