

Dr hab. inż. Paweł Majda

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Mechatroniki
Instytut Technologii Mechanicznej
Zakład Zautomatyzowanych Systemów Wytwarzania i Inżynierii Jakości
70-310 Szczecin
al. Piastów 19
tel: 793 314 801
e-mail: Pawel.Majda@zut.edu.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Wiśniewskiego
pt. "Badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych"
opracowana na zlecenie Dziekana Wydziału Budowy Maszyn i Zarządzania dr. hab. inż. Olafa Ciszaka
z dnia 21-12-2015 r.

1. Uwagi ogólne

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Wiśniewskiego pt. "Badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych", przygotowana pod opieką promotora dr. hab. inż. Olafa Ciszaka, obejmuje 136 stron formatu A4, ze spisem treści, streszczeniem w języku polskim i angielskim, słownikiem terminów, wprowadzeniem, 5 głównymi rozdziałami, spisem literatury, norm, adresami stron internetowych oraz załącznikami.

Poświęcona jest ważnej, z praktycznego punktu widzenia, tematyce badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania elementów wykonawczych robotów przemysłowych. Powszechnie wiadomo, że dokładność, a w szczególności powtarzalność jest bardzo ważnym wskaźnikiem oceny nie tylko stanu technicznego, ale także możliwości produkcyjnych różnych rodzajów maszyn technologicznych. Badaniami metod i poprawy uzyskiwanych niepewności pomiaru w przedmiotowym zakresie zajmuje się, zatem wiele ośrodków naukowo-badawczych na świecie. W nurt ten wpisuje się recenzowana rozprawa mgr. inż. Marcina Wiśniewskiego.

Tematyka pracy jest zbieżna do zagadnień zdefiniowanych w krajowej inteligentnej specjalizacji Polski - KIS 17. O aktualności rozważanej tematyki świadczą także cele prac badawczo-rozwojowych prowadzonych aktualnie w ramach inicjatywy "Factories of the Future" realizowanej w programie Horyzont 2020. Futurystyczne wizje fabryk przyszłości, bazujące na założeniach IoT, IoE i Przemysłu 4.0 zakładają wysoki stopień automatyzacji produkcji gdzie roboty przemysłowe mają stanowić jeden z elementów zrobotyzowanych gniazd obróbkowych komunikujących się ze światem zewnętrznym drogą internetową z zastosowaniem technologii chmury (cloud) na różnych poziomach funkcjonalności gniazda. Robot przemysłowy w takich gniazdach oprócz spełnienia dotychczasowej funkcji podajnika czy manipulatora realizuje także funkcje zaawansowanych maszyn wytwórczych i pomiarowych w tzw. rekonfigurowanych i/lub elastycznych systemach produkcyjnych. Adaptacja robota przemysłowego do nowych i tak wszechstronnych zadań wymusza ich przeobrażanie, przeprogramowanie oraz ponowną kalibrację w zależności od funkcji realizowanej przez jego element roboczy. Pomimo, że literatura tematu z ostatnich lat zawiera bardzo dużo opracowań pokazujących możliwości rekonfigurowanych systemów i manipulatorów przemysłowych wyposażonych w zaawansowane systemy monitorowania otoczenia, funkcje adaptacji i różne rodzaje elementów roboczych (wykonawczych i sensorycznych) to zagadnienie oceny ich dokładności ze względu na rozważane przeznaczenie jest znacznie skromniejsze. Dlatego uważam, że podjęta tematyka z zakresu

badania i oceny charakterystyk metrologicznych różnych robotów przemysłowych jest bardzo aktualna i nowoczesna. Rozważane w pracy zagadnienia mogą przyczynić się do rzeczywistej oceny robotów przemysłowych ze względu na ich przydatność do realizacji nowych procesów, które wcześniej wykonywano z użyciem wielu innych maszyn (wytwórczych i pomiarowych).

2. Charakterystyka i ocena rozprawy doktorskiej

W 1 oraz 3.1 rozdziale Autor dokonał przeglądu literatury, na podstawie którego przedstawiono aktualny stan wiedzy. Zaprezentowano w nich podstawowe rodzaje robotów, ich struktury kinematyczne, źródła błędów pozycjonowania oraz zestawiono definicje, normy, sposoby wyznaczania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych. Omówiono także przyrządy, systemy pomiarowe oraz metody pomiarów wspomagające badania błędu pozycjonowania. Autor w rozdziale 3.2 sformułował kryteria porównania i dokonał zestawienia różnych przyrządów pomiarowych (choć sam pisze o metodach a nie przyrządach - tabela 3.1 i 3.2) mogących mieć zastosowanie w badaniach dokładności pozycjonowania. Jednak wyników porównania nie skomentował oraz nie analizował pozostawiając rozdział niedokończonym.

W rozdziale drugim sformułowano cele i zakres pracy. Głównym celem jest opracowanie szybkiej metody badań dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych zgodnie z wytycznymi zawartymi w normie ISO 9283. Realizacja tego celu ma w zamyśle umożliwić zmniejszenie cykli pomiarowych dając w ten sposób możliwość efektywnego zastosowania nowo opracowanej metody w warunkach przemysłowych. Formułując drugi cel przyjęto założenie, że nowa metoda prognozowania pozwoli określać powtarzalność pozycjonowania w innej przestrzeni roboczej. Tutaj by zrozumieć przyjmuję, że Autor miał na myśli inne punkty rozpatrywanej przestrzeni roboczej. Do realizacji celów zestawiono szczegółowo i jasno sformułowany zakres prac niezbędnych do wykonania. Ostatecznie sformułowano trzy tezy. Trzecia nie wnosi do rozważań nic istotnego, bo można ją uznać za efekt końcowy wynikający z udowodnienia prawdziwości pierwszej i drugiej. Treść tej pracy nie odnosi się bezpośrednio do problemu naukowego. Ich udowodnienie może mieć jednak istotne znaczenie praktyczne, dostarczając cennych narzędzi wspomagających proces identyfikacji najważniejszych wskaźników tj. dokładności i powtarzalności pozycjonowania, które charakteryzują roboty przemysłowe ze względu na możliwość realizacji precyzyjnych procesów wytwórczych i pomiarowych. Oceniając poprawność sformułowania dwóch pierwszych tez doszedłem do dwóch punktów widzenia. Pierwszy dotyczy kwestii dostarczenia wiarygodnego dowodu potwierdzającego możliwość skrócenia czasu badań dokładności i powtarzalności robota przy akceptowalnym progu błędów nowo opracowanej metody. Trudność polega na tym, że stosowane obecnie metody doczekały się znormalizowanych, czyli powszechnie akceptowanych, procedur postępowania. Dlatego Autor proponując nową metodę, sformułował niezwykle trudny do realizacji, ambitny i skomplikowany cel badań. Ponadto, ze względu na przyzwyczajenia do przyjętych standardów, niełatwo będzie przekonać środowisko zajmujące się przedmiotowymi badaniami o lepszych właściwościach nowej proponowanej przez Autora metody. Z wymienionych uprzednio powodów wysoko oceniam treść tezy drugiej. Jednak z perspektywy drugiego punktu widzenia uważam, że bezpieczniej byłoby dwie pierwsze tezy sformułować ogólniej. Obie zawierają w treści arbitralnie przyjęte poziomy odniesienia 30%. W rozprawie zabrakło uzasadnienia oraz analizy przesłanek, co do przyjęcia wartości przedmiotowych 30%. Autor formułując tezy stwierdził, że zrobił to na podstawie wstępnych badań oraz przeglądu literatury. Jednak wyników i wniosków z tego wynikających nie udostępni czytelnikowi. Nadmienię, że przy porównaniach wyników badań z kryteriami wynikającymi z tezy pracy nie brano pod uwagę przedziałów niepewności pomiarów. Dlatego proszę

by podczas publicznej obrony doktorant przedstawił rysunek nr 4.2 i skonfrontował wyniki na nim prezentowane w odniesieniu do poprawności wniosków końcowych oraz tezy pracy.

Rozdziały 3.3 oraz 3.4 zawierają charakterystykę stanowiska pomiarowego, metodę pomiarów, metody wyznaczania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego i opracowane arkusze kalkulacyjne do wspomagania obliczeń odpowiednich wskaźników. Do pomiarów przestrzennej pozycji punktu Autor zaproponował użycie laserowego systemu nadążnego (tzw. trackera) o maksymalnym błędzie granicznym (MPE) dla pomiaru 1D odległości do 2 m wynoszącym $MPE = \pm 0,014$ mm oraz dla pomiaru 3D odpowiednio $MPE = \pm 0,044$ mm (wg danych katalogowych producenta bez uwzględniania poprawek temperaturowych). Skrupulatnie i szczegółowo opisano proces projektowania i kalibracji z użyciem współrzędnościowej maszyny pomiarowej tzw. zespołu pomiarowego do mocowania reflektora trackera i symulowania obciążenia działającego na interfejs mechaniczny robota. Charakteryzowane rozdziały oceniam, jako najlepiej napisane w całej pracy. Informacje w nich zawarte dowodzą, że Autor posiada wysokie kwalifikacje inżynierskie oraz, że potrafi perfekcyjnie opracować dokumentację procesu badawczego. W odniesieniu do celów pracy analiza przedmiotowych rozdziałów dostarcza cennych wniosków. Np. jednym z celów szczegółowych jest "... ustawienie robota przemysłowego i określenie płaszczyzn pomiaru". Autor formułuje zalecenie podając procedurę definiowania (w oparciu o zmierzoną pozycję trzech punktów trackerem) układów współrzędnych przyrządu pomiarowego i obiektu badanego, czyli robota - str. 51. Wg Autora po realizacji tej procedury powinno się osiągnąć równoległość osi układów przyrządu pomiarowego i głównego układu współrzędnych robota. Ze względu na przyczyny, które zestawiono w tabeli 1.2, zrealizowanie takiego zadania dla sformułowanych zaleceń obarczone będzie istotnymi błędami proponowanej metody. Dlatego chciałbym poznać uzasadnienie Autora odnoszące się do zrealizowania omawianego celu rozprawy a w szczególności chciałbym poznać powód, dla którego układy współrzędnych przyrządu pomiarowego i główny robota mają mieć osie równoległe do siebie.

Kolejna kwestia to poprawność doboru środków pomiarowych do badań realizowanych w pracy. Np. dla pomiarów dystansu 3D wartość MPE użytego trackera wyniosła $\pm 0,044$ mm. Podejrzewam, że w stosunku do wymagań stawianych kontroli charakterystyk dokładności pozycjonowania robotów przemysłowych wartość ta jest zbyt duża. Nie poddano interpretacji i nie skomentowano otrzymanych wyników badań ze względu na omawiane kryterium. Uważam, że powinno to być zrobione ze względu na temat rozprawy. Proszę Autora o ustosunkowanie się do tej uwagi w trakcie publicznej obrony.

Rozdział 3.5 zawiera obszerne zestawienie wyników znormalizowanego badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania kilku robotów przemysłowych. Badania wykonano dla różnych wariantów i warunków (różne obciążenia, długości boków pomiarowych, liczby powtórzeń pomiarów, różnych orientacji interfejsu mechanicznego robota itp.). W rozdziale tym widać ogromny wkład Autora w organizację i samą realizację badań doświadczalnych. Zebrane dane stanowią bazę do porównań z nową propozycją Autora w zakresie badań będących przedmiotem rozprawy. Szczególnie cenne, w rozdziale 3.5, są zestawienia wyników estymatora powtarzalności pozycjonowania różnych robotów w funkcji liczby powtórzeń pomiarów (wykresy zbieżności do 30 powtórzeń - patrz rys. od 3.58 do 3.74). Estymator ten liczone zgodnie z wzorem zalecanym przez normę ISO 9283 wg równania 1.11. Na każdym z prezentowanych wykresów zbieżności widać, że istnieje zawsze (w zbierze rozpatrywanych punktów pomiarowych) obciążenie i niezgodność estymatora powtarzalności. Objawia się to brakiem zbieżności do ustalonej wartości w funkcji zwiększania powtórzeń realizacji eksperymentu. Efekty te są losowe, bo nie ma prawidłowości, w którym punkcie

pomiarowym następują zaburzenia wartości szacowanego estymatora. Istnieją jednak także punkty, dla których obserwuje się asymptotyczną zbieżność do ustalonej wartości szacowanego parametru. Prezentowane wyniki dowodzą, że zarówno dla przypadku 8 jak i 30 powtórzeń eksperymentu w jednym punkcie pomiarowym i tak nie ma gwarancji wyznaczenia nieobciążonego lub obciążonego znaną wartością oraz zgodnego estymatora powtarzalności pozycjonowania robota przemysłowego. Autor nie skomentował oraz nie uwzględnił tego faktu przy liczeniu powtarzalności zarówno proponowaną przez siebie nową metodą jak i metodą znormalizowaną wg ISO 9283. Uważam, że przegapił w ten sposób najciekawszy naukowy aspekt swojej rozprawy doktorskiej, bo rozważania w tym zakresie mogłyby dostarczyć informacji o błędach proponowanej przez Autora metody, a także, co ważniejsze błędach wynikających ze stosowania normy ISO 9283 w zakresie szacowania wskaźników dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych w rozpatrywanym punkcie pomiarowym.

Kolejne rozdziały wymagają od czytelnika wyrozumiałości by uznać je za tekst rozprawy doktorskiej. Zawierają zlepki niezależnych od siebie informacji, z których próbuje się zbudować logiczną całość naukowego wywodu. Np. w podsumowaniu rozdziału 3.5 na str. 79 powołano się na normę ISO 230-2 która ma zastosowanie w badaniach obrabiarek. Należy podkreślić, że wg tej normy wskaźnik powtarzalności pozycjonowania jest liczony inaczej niż w normie ISO 9283 dotyczącej robotów. Autor dostrzega jednak pomiędzy tymi niezależnymi od siebie dokumentami związek i formułuje zalecenie o zmniejszeniu liczby powtórzeń eksperymentu w celu udowodnienia pierwszej tezy rozprawy. Zgodność rozkładu wyników (by zrozumieć zdanie czytelnik musi przyjąć założenie, że chodzi o wyniki powtarzalności pozycjonowania) z rozkładem normalnym ma być podstawą udowodnienia tezy pracy. Efektem tych rozważań jest rozdział 3.6 i badanie normalności rozkładu tylko jednego ze składników sumy występującego w równaniu 1.11 wg, którego oblicza się powtarzalność pozycjonowania zgodnie z normą ISO 9283 (jest to moduł odchyłki pozycjonowania od jej wartości średniej). Skąd ten pomysł?. Dla 8 elementowej liczebności próbki rozważanej cechy Autor dowiódł, że podlega ona rozkładowi normalnemu. Dowodzenie poparł wynikami testu Shapiro-Wilka. Właściwie zrobił to już przed prezentacją wyników na str. 80. Jednak w załącznikach umieszczonych na końcu pracy zamieszczono wyniki tegoż testu z negacją hipotezy o normalności rozkładu rozpatrywanej cechy, czyli normalności nie potwierdzono. Ostatecznie zmniejszając liczbę cykli pomiarowych z 30 zalecanych w normie ISO 9283 do 8 zaproponowanych przez Autora, przy założeniu normalności rozkładu (którego nie potwierdzono) modułu odchyłki pozycji od jej wartości średniej, dochodzi w zasadzie do udowodnienia prawdziwości pierwszej tezy pracy. Przecież nikt nie może mieć wątpliwości, że wykonując 8 nie 30 pomiarów będzie możliwość skrócenia czasu ich wykonywania. Stanowczo w tym momencie krytykuję Autora za trywializowanie oraz tak niczym nieuzasadnione budowanie związku przyczynowo skutkowego z użyciem zupełnie niezależnych od siebie elementów.

W rozdziale 3.7 przedstawieniowo sprawdzenie zdolności procesu pomiaru z użyciem wskaźników C_p oraz C_{pk} czyli wskaźników przeznaczonych do badań zdolności systemów produkcyjnych. W moim przekonaniu założenia do analizy celowo przyjęto w taki sposób by wykazać wartości wskaźników na odpowiednim poziomie. Moje zastrzeżenia dotyczą:

- 1) zasadności użycia wskaźników badań zdolności systemów produkcyjnych (C_p , C_{pk}) zamiast wskaźników (C_g , C_{gk}) odnoszących się do badań systemów pomiarowych,
- 2) zasadności obliczania wskaźników zdolności systemu produkcyjnego dla ośmio elementowej próbki,
- 3) przyjęciu 100% przedziału rozważanej specyfikacji zamiast jej ułamka,

- 4) niezdefiniowaniu i rozpatrzeniu składników splotu rozkładów prawdopodobieństw wielkości podlegającej sprawdzeniu,
- 5) dopuszczeniu do rozważań wartości ujemnych (np. rys. 3.92 i 3.93) dla wskaźnika, który z definicji ujemnym być nie może,
- 6) przyjęciu wartości krytycznych wskaźników procesu na poziomie jeden, czyli niespotykanie niskiego.

Biorąc pod uwagę powyższe, zasadnym wydaje się jeszcze raz zweryfikować założenia i wnioski wynikające z opracowania rozdziału 3.7. Rzutują one bezpośrednio na wnioski końcowe całej rozprawy.

Rozdział 4 prezentuje, nowe propozycje metod badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych. Całość pracy kończy podsumowanie i wnioski (rozdział 5). Autor stwierdza, że opracował podstawy teoretyczne i udowodnił sformułowane tezy rozprawy.

3. Ocena redakcyjna

Opracowanie redakcyjne jest mocną stroną recenzowanej dysertacji. Czytanie tekstu nie męczy, aczkolwiek fragmenty wymagające opisanie związków przyczynowo skutkowych mających dostarczyć dowodów na udowodnienie tez mogłyby być napisane staranniej. Jakość redakcyjna polepszyłaby się, gdyby zadbano o wzajemne powiązanie treści poszczególnych rozdziałów i ich doprecyzowanie ze względu na cel pracy. Np. z wprowadzenia czytelnik nie jest w stanie ustalić, jakich zagadnień będzie dotyczyła rozprawa a rozdziały dotyczące analizy literatury można z powodzeniem opublikować, jako niezależne artykuły, bo nie ma w nich odniesień do treści pracy. Wysoko oceniam obszerny i dobry materiał ilustracyjny. Ułatwia on zrozumienie opisów. Rozdział 3.4 to jeden akapit opisu, więc warto się zastanowić czy cały rozdział, jako samodzielny jest potrzebny.

Pojęcie "pomiar dokładności i powtarzalności" jest zamiennie używany w pracy z terminem "badania dokładności i powtarzalności". Nie powinno się jednak tych sformułowań mylić ze sobą. Charakterystyki takie jak: dokładność, precyzja, powtarzalność, odtwarzalność, niepewność, stabilność itp. nie są wielkościami fizycznymi, bo nie istnieją dla nich wzorce jednostek miar. Dlatego pomiarowi nie podlegają. Stąd dla odróżnienia od pomiarów wielkości prawidłowo powinniśmy mówić o ich badaniu.

Większą uwagę można także zwrócić tłumacząc informacje podawane przez producentów systemów pomiarowych. Np. "...poziom precyzji kątowej", jako charakterystyka metrologiczna laserowego systemu nadążnego podana w tabeli 3.5 na str. 46 jest zupełnie niezrozumiałym pojęciem dla polskiego metrologa. Z podanych wartości można wnioskować, że chodzi o rozdzielczość pomiaru kąta.

Powyższe drobne uwagi, mam nadzieję i sądzę, że Autor uwzględni w swoich kolejnych tekstach. Mogą one jedynie przyczynić się do polepszenia, jakości opracowania.

4. Podsumowanie i ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Najsłabszą stroną pracy jest powierzchowna interpretacja wyników badań. Najsilniejszą natomiast, bardzo dobre opracowanie graficzne ułatwiające śledzenie treści pracy, bogata baza danych znormalizowanych ocen dokładności i powtarzalności pozycjonowania różnych robotów przemysłowych oraz, co najważniejsze, rzetelne udokumentowanie procesu realizacji badań doświadczalnych. Na podstawie wnikliwej analizy treści pracy stwierdzam, że doktorant nie stosował "wybiórczej filtracji" wyników swoich pomiarów. Przeprowadził liczne badania dla różnych robotów przemysłowych w wielu wariantach. Świadczy to o wytrwałości i rzetelności badawczej, a co za tym

idzie wiarygodności załączonych wyników oraz przeświadczeniu doktoranta o możliwości praktycznego stosowania opracowanej metody badawczej. Kandydat zastosował w swoich badaniach najnowocześniejsze przyrządy pomiarowe pozwalające, w sposób bezdotykowy, mierzyć oraz rejestrować przestrzenne położenie punktu (w trzech osiach). W ten sposób zrealizował jedno z najważniejszych zaleceń zawartych w normie ISO 9283. Należy przy tym zastrzec, że użyty do badań laser tracker ze względu na swoją zasadę działania wciąż ma pewne ograniczenia, co z kolei wpływa na umiejscowienie uzyskanych rezultatów w łańcuchu porównań międzylaboratoryjnych. W tym kontekście wyniki badań mgr inż. Marcina Wiśniewskiego są oryginalne, co dowodzi umiejętności prowadzenia przez niego samodzielnych badań naukowych.

Podsumowując stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Wiśniewskiego pt. "Badania dokładności i powtarzalności pozycjonowania robotów przemysłowych" spełnia wymagania określonych w art. 13 ust. 1 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, i wnioskuję o jej przyjęcie i dopuszczenie do publicznej obrony.

Szczecin 21-02-2016