

Warszawa, dn. 03.10.2016 r.

dr hab. inż. Adam Woźniak, prof. nzw. PW
Instytut Metrologii i Inżynierii Biomedycznej
Wydział Mechatroniki
Politechnika Warszawska
ul. Św. A. Boboli 8, 02-525 Warszawa
tel: 22 234 8756, fax: 22 849 0395
e-mail: wozniaka@mchtr.pw.edu.pl

Recenzja
Rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamili Gromczak
pt. "Validation model of coordinate measuring methods"
"Model walidacji współrzędnościowych metod pomiarowych"

Promotor rozprawy:
Podstawa opracowania recenzji:

prof. dr hab. inż. Jerzy Śladek
zlecenie Dziekana Wydziału Mechanicznego
Politechniki Krakowskiej

1. Skrócona charakterystyka zawartości pracy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Kamili Gromczak napisana została w języku angielskim. Ujęta została w jedenastu rozdziałach o objętości wynoszącej (wraz z wykazem literatury oraz dwoma załącznikami) łącznie 125 stron. Dodatkowo na 15 stronach zamieszczono streszczenie w języku polskim przedstawiające w syntetyczny sposób zawartość merytoryczną rozprawy.

Rozdziały 1 i 2 obejmują wprowadzenie do zagadnienia i omówienie istniejącego stanu wiedzy z zakresu współrzędnościowej techniki pomiarowej, ze szczególnym zwróceniem uwagi czytelnika na zagadnienie dokładności i niepewności pomiarów geometrycznych, w tym również pomiarów współrzędnościowych. W rozdziale 3 przedstawiono aktualny stan wiedzy (ujęty również w zaleceniach norm międzynarodowych) w zakresie wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych. Szczegółowo omówiono trzy metody: szacowanie niepewności pomiarów współrzędnościowych z zastosowaniem wywzorcowanego przedmiotu (wzorca), szacowanie niepewności pomiarów współrzędnościowych z zastosowaniem niewykalibrowanego wzorca z wielokrotnie powtarzaną strategią pomiarową oraz metodę symulacyjną z zastosowaniem tzw. wirtualnej współrzędnościowej maszyny pomiarowej. W rozdziale tym omówiono również metody walidacji pomiarów z uwzględnieniem wymagań formalnych i prawnych w tym zakresie. W rozdziale 4 przedstawiono tezę i cel pracy. Rozdział 5 jest dość szczątkowy. Poza bardzo krótkim wprowadzeniem (dwa zdania) zawiera jedynie odwołanie do aneksu 1, który przedstawia ogólny algorytm walidacji pomiarów współrzędnościowych. Właściwa twórczo-naukowa część rozprawy obejmuje rozdziały 6, 7 i 8, w których przedstawiono trzy modele walidacji współrzędnościowych metod pomiarowych: model statystycznej spójności, model metrologicznej zgodności z nowo obliczonymi wartościami progu kappa oraz model normalnej spójności z miarami rozbieżności. W rozdziałach tych przedstawiono opis

teoretyczny opracowanych modeli oraz wyniki badań eksperymentalnych, które posłużyły do oceny ich przydatności metrologicznej. Rozdział 9 stanowi podsumowanie ujmujące w 18 punktach wnioski poznawcze oraz w 5 punktach wnioski użytkowe. Osobny rozdział 10 przedstawia skrótowo kierunki dalszych badań, które Doktorantka uważa za kluczowe w kontekście dalszego rozwoju opracowanych modeli walidacji. Zamieszczona w końcowej części pracy liczna bibliografia zawiera 124 publikacje naukowe, w większości anglojęzyczne. Zdecydowana większość z nich odnosi się do zagadnień merytorycznie związanych z rozprawą, z czego 5 jest współautorskich Autorki pracy. Osobno zamieszczono wykaz zrealizowanych projektów związanych z zagadnieniem oraz wytycznych i norm w tym zakresie.

2. Uzasadnienie podjęcia tematu oraz cel i teza pracy

Rosnące wymagania dotyczące jakości oraz niezawodności masowo produkowanych urządzeń technicznych wymuszają ciągły rozwój metod pomiarowych służących do weryfikacji poprawności ich wykonania. Dzięki odpowiedniej kontroli wymiarów oraz odchyłek kształtu i położenia części urządzeń produkowanych w przemyśle motoryzacyjnym, lotniczym, AGD i w każdym innym, można uzyskać dobrą współpracę tych elementów i wysoką niezawodność wytworzonych urządzeń. Jedną z głównych metod pomiaru jest metrologia współrzędnościowa, która obecnie niemal zastępuje klasycznie rozumianą metrologię geometryczną.

Postępująca automatyzacja produkcji części maszyn i urządzeń, a wraz z nią - konieczność dostosowania rytmu kontroli wymiarów oraz odchyłek geometrycznych, stymulują ciągły wzrost liczby współrzędnościowych maszyn pomiarowych oraz ich odmian w postaci systemów opartych na fotogrametrii bliskiego zasięgu, ramion pomiarowych, laserowych systemów nadeżnych, a ostatnio również tomografów rentgenowskich do zastosowań inżynierskich. Wszystkie te urządzenia znajdują zastosowanie zarówno w laboratoriach, jak również w halach produkcyjnych. Stąd też doskonalenie technik pomiarowych oraz ocena ich wiarygodności ma ogromne znaczenie.

Rozwój techniczny współrzędnościowych systemów pomiarowych postępuje stosunkowo szybko. Dotyczy to materiałów i konstrukcji nośnych współrzędnościowych urządzeń pomiarowych, ich oprzyrządowania w postaci różnego typu głowic pomiarowych, ale przede wszystkim systemów sterowania, akwizycji i analizy danych pomiarowych. Jednak problem oceny niepewności pomiarów współrzędnościowych oraz walidacji wyników pomiarów jest ciągle żywym zagadnieniem, zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu.

Zagadnieniami niepewności pomiarów współrzędnościowych zajmują się różne zespoły badawcze na świecie, np. University of North Carolina at Charlotte oraz narodowe instytuty metrologiczne, np. PTB, NPL, NIST. W kraju tematyka ta rozwijana jest z dużym sukcesem przede wszystkim na Politechnice Krakowskiej, przez zespół prof. Jerzego Śładka, oraz w Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, przez zespół prof. Władysława Jakubca.

Analizując aktualne piśmiennictwo, w tym uformowane do tej pory zalecenia wydane w postaci norm, należy stwierdzić, iż obecnie przyjęło się, że niepewność pomiaru współrzędnościowego może być wyznaczana jedną z trzech metod: metodą eksperymentalną (tu rozróżnia się metodę z zastosowaniem wywzorcowanego przedmiotu oraz metodę wielopozycyjną z zastosowaniem niewykalibrowanego wzorca), metodą analityczną oraz symulacyjną.

Metody eksperymentalne wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych polegają na wielokrotnym pomiarze przedmiotu wzorcowego. Należy tu jednak pamiętać, że w takim przypadku wykorzystanie wyników oceny dokładności współrzędnościowej maszyny pomiarowej na podstawie kontrolnego pomiaru wzorca do oszacowania niepewności pomiarów innych obiektów może odbywać się tylko wtedy, gdy są zachowane warunki podobieństwa w zakresie mierzonego wymiaru, materiału mierzonego przedmiotu, strategii pomiaru oraz konfiguracji głowicy pomiarowej. Takie podejście do szacowania niepewności pomiaru proponuje norma ISO 15530-3:2011, a wcześniej ISO/TS 15530-3:2004. Metodę z zastosowaniem wywzorcowanego przedmiotu (wzorca) Doktorantka przyjęła za zwalidowaną metodę odniesienia do badań porównawczych z innymi metodami: wielopozycyjną z zastosowaniem niewykalibrowanego wzorca (zgodnie z ISO/CD TS 15530-2) oraz z symulacyjną, które Doktorantka uznała za niezwalidowane.

Metody symulacyjne szacowania niepewności pomiarów współrzędnościowych realizowane są poprzez implementację tzw. współrzędnościowej maszyny wirtualnej. Wyznaczaniu niepewności pomiarów współrzędnościowych metodą symulacyjną poświęcona jest norma ISO/TS 15530-4:2008. Takie podejście, w odniesieniu do współrzędnościowych maszyn pomiarowych, w różnych odmianach rozwijał prof. Jerzy Śladek, a potem dr Adam Gąska z Politechniki Krakowskiej. Podobnie budowane są modele innych systemów współrzędnościowych. Przykładem jest model symulacyjny – wirtualne ramię pomiarowe – opracowane przez dr Ksenię Ostrowską również z tego samego zespołu. Również na Politechnice Krakowskiej opracowano własne oprogramowanie, które realizuje symulacyjną metodę wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych.

Trzeci sposób wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych leży u podstaw metod analitycznych. Polegają one na szacowaniu niepewności pomiarów wykonywanych na współrzędnościowej maszynie pomiarowej na podstawie zależności geometrycznych występujących w tym pomiarze. Do tego celu należy określić model pomiaru osobno dla każdej mierzonej charakterystyki geometrycznej. Takie podejście rozwijał w swoich pracach prof. Władysław Jakubiec z Akademii Techniczno-Humanistycznej w Bielsku-Białej, gdzie opracowano i wdrożono oprogramowanie o nazwie EMU-CMMUncertainty, które umożliwia wyznaczenie niepewności dla pomiarów wykonanych na maszynach pomiarowych portalowych, wysięgnikowych z ruchomą kolumną i poziomym ramieniem oraz ramionach pomiarowych.

W swojej rozprawie Doktorantka nie podjęła się walidacji metody analitycznej wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych, koncentrując się na metodach: eksperymentalnej z zastosowaniem wykalibrowanego wzorca, metodzie eksperymentalnej wielopozycyjnej z zastosowaniem niewykalibrowanego wzorca oraz metodzie symulacyjnej. Jednak, w mojej opinii, pewne usystematyzowanie wiedzy w zakresie wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych wymaga, aby metoda analityczna została omówiona, choćby tylko we wstępnych, przeglądowych rozdziałach pracy doktorskiej. Poza tym Doktorantka dokonała w sposób usystematyzowany przeglądu i analizy literatury związanej bezpośrednio z metodami wyznaczania niepewności oraz walidacji, wskazując brak odpowiednich rozwiązań w zakresie walidacji pomiarów współrzędnościowych.

W świetle przedstawionych dotychczas nierozwiązanych zagadnień Doktorantka sformułowała następującą tezę pracy: „Możliwe jest opracowanie i zastosowanie statystycznych modeli walidacji dla współrzędnościowych metod pomiarowych”.

Podstawowy cel, który towarzyszy postawionej tezie, odnosi się do opracowania modeli walidacji charakteryzujących się tym, że „będą stanowić nowość w dziedzinie metrologii współrzędnościowej” oraz tym, że „będą zawierać statystyczne wzory do analizy matematycznej szacowania wyników i ich niepewności wg licznych publikacji i opracowań metrologicznych”.

Według mojej oceny zarówno teza, jak i cel pracy, zostały określone niezbyt trafnie. Z pewnością opracowanie skutecznego, uniwersalnego, lepszego od innych modelu walidacji jest osiągnięciem naukowym. Takich określeń czy porównań z innymi modelami zabrakło. W tym świetle zadanie, jakie stawia sobie Doktorantka, można sprowadzić do opracowania jakichkolwiek statystycznych modeli walidacji dla współrzędnościowych metod pomiarowych. Czy taki był cel rozprawy? Podobnie opis podstawowego celu niepotrzebnie koncentruje uwagę czytelnika na oczywistych i technicznych aspektach pracy, takich jak: „nowość w dziedzinie metrologii współrzędnościowej” oraz, że „modele będą zawierać statystyczne wzory do analizy matematycznej szacowania wyników i ich niepewności wg licznych publikacji i opracowań metrologicznych”. Tu również brakuje określenia jasnego, czytelnego i jednoznacznego wyznacznika modelu walidacji, do którego opracowania dąży Doktorantka. Na pochwałę zasługuje natomiast jasna metodologicznie koncepcja rozprawy, oparta na analizie teoretycznej problematyki i istniejących rozwiązań oraz na badaniach doświadczalnych zrealizowanych koncepcji.

3. Szczegółowa ocena rozprawy

Dokonując analizy poszczególnych części rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Kamili Gromczak, można wyróżnić najważniejsze osiągnięcia Doktorantki:

A. Opracowanie trzech statystycznych modeli walidacji pomiarów współrzędnościowych, tj.: model statystycznej spójności, model metrologicznej zgodności oraz model normalnej spójności z miarami rozbieżności,

B. Przeprowadzenie badań doświadczalnych, które umożliwiły Doktorantce weryfikację zaproponowanych metod walidacji z uwzględnieniem jakościowej i ilościowej ich oceny,

C. Określenie właściwości metrologicznych zaproponowanych modeli walidacji pomiarów współrzędnościowych oraz określenie kryteriów i warunków ich stosowania.

Biorąc pod uwagę wymienione w powyższych punktach efekty rozprawy, potwierdzające naukowy charakter prowadzonych badań w zakresie opisu matematycznego, optymalizacji i ostatecznie doświadczalnej weryfikacji i wnioskowania w zakresie walidacji współrzędnościowych metod pomiarowych, wyrażam pozytywną opinię o pracy doktorskiej Pani mgr inż. Kamili Gromczak. Recenzowana rozprawa wykazuje szeroki stopień teoretycznej wiedzy ogólnej Autorki w zakresie dyscypliny naukowej, której dotyczy praca.

Oceniając pozytywnie recenzowaną pracę, chciałbym przedstawić kilka uwag polemicznych i krytycznych.

Uwagi polemiczne.

1. Metoda kalibrowanego wzorca, którą Doktorantka przyjęła za walidowaną metodę odniesienia do badań porównawczych z innymi metodami, wydaje się być stosunkowo prosta. Współrzędnościowa maszyna pomiarowa pełni tu rolę swego rodzaju komparatora służącego do porównania wyników pomiaru określonych elementów geometrycznych mierzonego przedmiotu i przedmiotu wzorcowego, tzn. specjalnie wykonanego przedmiotu ze stabilnego wymiarowo materiału. W rozprawie przedstawiono jeden wzorzec „EUMETRON multi-feature check” stosowany w badaniach. Czy należy rozumieć, że ten sam przedmiot traktowano jako wzorzec i przedmiot mierzony?
2. Druga uwaga polemiczna również dotyczy metody eksperymentalnej wyznaczania niepewności pomiarów współrzędnościowych z zastosowaniem kalibrowanego wzorca. Stosując zależności zaproponowane w cytowanej przez Doktorantkę normie ISO 15530-3:2011, niepewność rozszerzona pomiaru współrzędnościowego może być

obliczona jako podwójna suma geometryczna czterech niepewności standardowych: niepewności kalibracji wzorca, niepewności procedury pomiarowej, niepewności związanej z przedmiotem mierzonym oraz niepewności wyznaczania błędu systematycznego na wzorcu. Nieco inne podejście funkcjonowało w protoplaście tej normy w wersji ISO/TS 15530-3:2004, gdzie zamiast niepewności wyznaczania błędu systematycznego na wzorcu występował moduł błędu systematycznego pomiaru, zdefiniowany jako różnica wskazań współrzędnościowej maszyny pomiarowej i wartości uzyskanej z wzorcowania przedmiotu kalibrowanego. Ciekaw jestem oceny Doktorantki co do słuszności jednego i drugiego podejścia do szacowania niepewności pomiarów współrzędnościowych.

3. W rozdziale 6.4 przedstawiono wzorzec „EUMETRON multi-feature check” wybrany do zastosowania w badaniach porównawczych. Jakie były mierzalne kryteria wyboru takiego wzorca? W załączonym streszczeniu (rozdział 3.3, s. 130) zatytułowanym „Wybór wzorca” nie ma ani jednego słowa na ten temat.
4. Na str. 6 we wstępie wymieniono narodowe instytuty metrologiczne PTB, NPL, NIST które biorą udział w międzynarodowych programach badań porównawczych, również dotyczących walidacji współrzędnościowych metod pomiarowych. W gronie wymienionych instytucji nie ma Głównego Urzędu Miar. Czy Doktorantka zna publikacje dotyczące wyników udziału GUM w takich międzynarodowych programach badań porównawczych?

Oprócz przedstawionych uwag polemicznych, w pracy dostrzegam także pewne braki oraz nieścisłości, błędy literowe i niedostatki interpunkcyjne. Przedstawiam tylko ważniejsze z nich.

1. Doktorantka wykazała się niezwykle oszczędnością słów, szczególnie w kontekście opisu prezentowanych schematów i wyników badań doświadczalnych. Najważniejsze rozdziały 6.1, 7.1 i 8.1, w których przedstawiono trzy modele walidacji współrzędnościowych metod pomiarowych, zawierają wyłącznie schemat walidacji. Nie towarzyszy temu choćby skrótowy opis tych schematów pozwalający czytelnikowi zrozumieć zaproponowany algorytm. W rozprawie występują również inne szczerkowe rozdziały. Np. rozdział 7.4 zawiera dwa rysunki poglądowe bez jakiegokolwiek omówienia ich treści i jedno zdanie wprowadzenia bez powołania się na te rysunki.
2. W innych przypadkach występują rozdziały zawierające techniczne opisy, które merytorycznie nie wnoszą nic do rozprawy. Przykładem są rozdziały A, B na str. 35.
3. Również w mojej ocenie rys. od 10 (s. 52) do 15 (s. 54) są niepotrzebne, ponieważ informacje na nich zawarte powtórzone są również na bezpośrednio po nich występujących rys. od 16 (s. 55) do 21 (s. 58).
4. W rozprawie występuje wiele rysunków, na które nie ma powołania w tekście, np. rys. 1-4, 26, 27-38. Wiele z tych rysunków występuje w rozprawie bez należytego ich omówienia.
5. Z kolei cały, prawie półstronicowy pierwszy akapit ze str. 12 jest powtórzeniem ze str. 9.
6. W rozprawie Autorka zamieściła szereg odnośników bibliograficznych, ale nie wszystkie odnoszą się do właściwych źródeł.
7. Na str. 14 Główny Urząd Miar występuje w tłumaczeniu na język angielski jako „National Office of Measures”, podczas gdy oficjalna angielska nazwa GUM to „Central Office of Measures”.
8. W tekstach technicznych oznaczenia parametrów i funkcji przyjęło się pisać kursywą. Ta zasada nie zawsze jest stosowana (np. str. 9 i dalej).

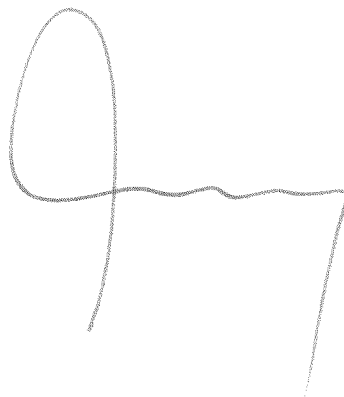
9. W polskim systemie notacji liczb oddzielamy część całkowitą od części ułamkowej przecinkiem, a nie kropką. W pracach w języku angielskim zasada jest odwrotna. W recenzowanej rozprawie zarówno w tekście w j. angielskim, jak również w streszczeniu w j. polskim, przecinek i kropka występują niemal naprzemiennie.
10. Składnia zamieszczonych na str. 98 (i dalej) pozycji bibliograficznych wymaga ujednolicenia.

4. Ocena końcowa rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Kamili Gromczak dotyczy opracowania teoretycznego i weryfikacji doświadczalnej modeli walidacji współrzędnościowych metod pomiarowych. Jest to ważna tematyka, gdyż dotyczy problemu analizy metrologicznej wyników pomiaru otrzymanych ze współrzędnościowych systemów pomiarowych, stanowiących obecnie podstawowe instrumentarium pomiarowe zarówno w laboratoriach badawczych, jak również w otoczeniu produkcji części maszyn i urządzeń.

Autorka rozprawy podjęła się rozwiązania trudnego problemu opracowania trzech statystycznych modeli walidacji pomiarów współrzędnościowych, przeprowadzenia badań doświadczalnych, które umożliwiły jej weryfikację zaproponowanych metod walidacji, oraz określenia właściwości metrologicznych zaproponowanych modeli i warunków ich stosowania. Postawiony problem naukowy ma duże znaczenie poznawcze i praktyczne. Sposób jego rozwiązania zaproponowany w rozprawie świadczy o interdyscyplinarnej wiedzy mgr inż. Kamili Gromczak i umiejętności samodzielnego podejmowania i rozwiązywania zadań naukowych. Wartość merytoryczną uzyskanych wyników oceniam pozytywnie. Przytoczone uwagi krytyczne nie obniżają pozytywnej oceny pracy.

Na podstawie powyższych stwierdzeń wyrażam opinię, że przedstawiona rozprawa doktorska pt. pt. "Validation model of coordinate measuring methods"; "Model walidacji współrzędnościowych metod pomiarowych" mgr inż. Kamili Gromczak spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym z dnia 14 marca 2003 r. i tym samym wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized initial 'G' followed by a horizontal line and a vertical line extending downwards.