
dr hab. inż. Bartosz GAPIŃSKI, prof. PP
Zakład Metrologii i Systemów Pomiarowych
Instytut Technologii Mechanicznej
Wydział Inżynierii Mechanicznej
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
60-965 Poznań
e-mail: bartosz.gapinski@put.poznan.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Wiktora HARMATYSA pt.

***MODELOWANIE DOKŁADNOŚCI OPTYCZNYCH
WSPÓLRZĘDNOŚCIOWYCH MASZYN POMIAROWYCH***

Promotor: prof. dr hab. inż. Jerzy A. SŁADEK

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Adam GĄSKA, prof. PK

Podstawa opracowania recenzji:

Uchwała Rady Naukowej Wydziału Mechanicznego Politechniki Krakowskiej
M.00-520-127/2021 z dnia 16 czerwca 2021r.

1. Wprowadzenie

Ciągły rozwój gospodarki jest jednoznacznie związany z rozwojem metrologii, a rozwój metrologii związany jest z potrzebami postępu w gospodarce. W zależności do sytuacji uzyskiwane wyniki pozwalają na potwierdzenie poprawności wykonania wyrobu zgodnie z założeniami, ale jednocześnie dane pomiarowe są częstokroć informacją pozwalającą na opracowanie nowego rozwiązania. Metrologia wpisuje się we wszystkie dziedziny życia człowieka i trudno sobie wyobrazić naszą egzystencję bez pozyskiwanych dzięki niej informacji. Z tego powodu wszelkie prace pozwalające na zwiększenie dokładności uzyskiwanych wyników i/lub skrócenie czasu pomiaru są jak najbardziej wskazane i potrzebne.

Jednym z bardzo istotnych obszarów dla gospodarki jest metrologia wielkości geometrycznych. W jej ramach od lat 70-tych XX wieku nieustannie rozwija się współrzędnościowa technika pomiarowa. Początkowo obejmowała ona pomiary stykowe za pomocą współrzędnościowych maszyn pomiarowych, jednak z czasem rozrosła się w szereg systemów pomiarowych, takich jak choćby ramiona pomiarowe, skanery optyczne, trackery

laserowe, czy w ostatnich latach rentgenowskie tomografy pomiarowe. Równolegle rozwijały się układy akwizycji danych. Między innymi dzięki dynamicznemu wzrostowi możliwości obliczeniowych komputerów, coraz częściej stosowane są metody bezstykowe, w których wymagana jest szybka analiza dużych zbiorów danych.

Jednym z kluczowych zagadnień w metrologii jest określenie niepewności uzyskiwanych wyników pomiarów. Jest to proces niełatwy i często czasochłonny, co przekłada się m.in. na swoisty opór ze strony przemysłu w tym zakresie, a ponadto poziom wiedzy i świadomości w tym obszarze nie jest najwyższy. Z tego powodu bardzo cenne są, realizowane m.in. na Politechnice Krakowskiej, prace pozwalające na wiarygodne szacowanie niepewności pomiaru za pomocą metod angażujących w nieznacznym stopniu operatora urządzenia.

Między innymi z tych powodów podjęta przez Doktoranta tematyka, związana z modelowaniem dokładności optycznych współrzędnościowych maszyn pomiarowych pokazuje, jak ważny, a jednocześnie niezbadany jest to obszar. W świetle przedstawionych zagadnień podjęcie tematu rozprawy należy uznać za trafne i w pełni uzasadnione, zarówno pod względem naukowym, jak i utylitarnym. To wszystko sprawia, że praca poruszająca omawianą tematykę jest bardzo interesująca, a zaproponowane rozwiązanie ma szansę na wdrożenie w praktykę przemysłową.

2. Układ i obszar merytoryczny rozprawy

Recenzowana praca liczy 133 strony i składa się z 11 rozdziałów, w tym wykazu literatury (rozdział 10) zawierającego 104 pozycje oraz 23 normy i wytyczne, a także jedną stronę internetową obejmującą tematycznie zakres pracy. Doktorant jest współautorem 6 spośród pozycji wymienionych w wykazie literatury. Praca poprzedzona jest spisem treści, a zakończona (rozdział 11) streszczeniem w języku polskim i angielskim. W dysertacji nie zawarto spisu najważniejszych oznaczeń i skrótów stosowanych w tekście rozprawy – byłoby to pewnym ułatwieniem dla czytającego. Poszczególne rozdziały pracy zawierają następujące treści:

Rozdział 1 - *Wstęp* – Autor krótko wprowadza czytelnika w tematykę związaną ze współrzędnościową techniką pomiarową. Nacisk kładzie na aspekty dokładności urządzeń współrzędnościowych, ze szczególnym uwzględnieniem urządzeń multisensorowych. Podkreśla również wkład zespołu Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej Politechniki Krakowskiej i swój własny w prace dotyczące poprawy dokładności współrzędnościowych systemów pomiarowych.

Rozdział 2 – *Współrzędnościowa technika pomiarowa* – Doktorant scharakteryzował syntetycznie współrzędnościowe systemy pomiarowe – maszyny współrzędnościowe, skanery optyczne. Przedstawił również maszyny multisensorowe będące efektem połączenia klasycznych mikroskopów pomiarowych i techniki współrzędnościowej.

Rozdział 3 – *Analiza stanu wiedzy z zakresu tematu pracy* – Autor omówił błędy pochodzące od układów optycznych – aberrację sferyczną, zjawisko komy, astygmatyzmu i dystorsji. Następnie przedstawił zasady cyfrowego przetwarzania obrazu podczas pomiaru współrzędnościowego i powiązane z nimi metody rozpoznawania krawędzi, a także rodzaje systemów autofocus ukazując ich zalety i ograniczenia. Scharakteryzował również metody oceny

dokładności pomiarów prezentując metodę porównawczą, wielopozycyjną i symulacyjną. W kolejnej części rozdziału Autor omówił zasady wzorcowania współrzędnościowych optycznych systemów pomiarowych w oparciu o normę ISO 10360-7:2011.

Rozdział 4 – *Hipoteza, Cel i zakres pracy* – jest to praktycznie jednostronicowy rozdział prezentujący zgodnie z jego tytułem cel oraz zakres podjętych działań, a także etapy jakie autor przyjął do realizacji podczas pracy nad doktoratem.

Rozdział 5 – *Identyfikacja źródeł błędów optycznych maszyny pomiarowej* – jest to jeden z głównych rozdziałów dysertacji. Autor scharakteryzował w nim źródła błędów występujących podczas pomiaru stykowego na CMM oraz przy pomiarach optycznych realizowanych za pomocą maszyny multisensorowej. Następnie przedstawił sposób realizacji pomiarów oraz wyniki uzyskane dla: oceny jakości podświetlenia, badania wpływu podświetlenia oraz zmian temperatury na wyniki pomiaru, a także modelowania prawdopodobieństwa odtworzenia punktów, wpływu temperatury oraz błędów układu autofocus.

Rozdział 6 – *Model matematyczny maszyny optycznej* – w rozdziale tym Doktorant przedstawił przyjęty przez siebie sposób symulacji punktów pomiarowych oraz uzyskiwane wyniki uwzględniające rodzaj użytego podświetlenia, zmianę temperatury otoczenia, analizę powtarzalności wyników i błędy pochodzące od użycia systemu autofocus.

Rozdział 7 – *Weryfikacja modelu* – Autor przedstawił opracowany przez siebie obiekt testowy, wyniki jego wzorcowania metodami klasycznymi oraz porównanie wyników z wartościami uzyskanymi metodą symulacyjną. Zaprezentował również efekty walidacji opracowanego przez siebie modelu.

Rozdział 8 – *Integracja aplikacji z oprogramowaniem Calypso* – w rozdziale tym została omówiona weryfikacja praktyczna opracowanego oprogramowania współpracującego z oprogramowaniem Calypso używanym podczas badań do obsługi multisensorowej maszyny pomiarowej O-Inspect.

Rozdział 9 – *Wnioski i kierunki dalszych badań* – informacje zawarte w tym rozdziale podzielono na wnioski poznawcze zawarte w 7 punktach, wnioski utylitarne przedstawione również w 7 punktach oraz opis dalszych kierunków badań jakie Autor zamierza podjąć.

Rozdział 10 to spis literatury, a rozdział 11 zawiera streszczenia po polsku i po angielsku.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Poddana ocenie rozprawa doktorska jest dziełem interesującym, zawierającym wiele informacji związanych z optycznymi maszynami współrzędnościowymi i modelowaniem dokładności takich systemów. Przedstawiona treść pozwala pozytywnie ocenić wiedzę i doświadczenie Doktoranta w omawianym zakresie. W ocenie czytającego zaprezentowane wyniki odzwierciedlają odpowiednie zgłębienie podjętego tematu, czego efektem jest opracowanie algorytmów do modelowania dokładności optycznych współrzędnościowych maszyn pomiarowych oraz przeprowadzenie stosowanych badań, które pozwoliły potwierdzić poczynione założenia i opracować funkcjonujące oprogramowanie.

Czytając recenzowaną rozprawę doktorską odnosi się pozytywne i oczekiwane wrażenie, że Doktorant dobrze zna prezentowane zagadnienia związane z modelowaniem dokładności systemów współrzędnościowych, co pozwoliło mu na opracowanie i zwalidowanie programu do szacowania niepewności wyników uzyskiwanych podczas pomiaru optycznego na multisensorowej maszynie pomiarowej. Należy również stwierdzić, iż zrealizowane przez Pana mgra inż. Wiktora HARMATYSA prace analityczne i badania pozwoliły na wyciągnięcie wniosków określających obszary zastosowania przedstawionego rozwiązania. Świadczy to o dojrzałości naukowej Doktoranta, co należy oceniać bardzo pozytywnie.

Analizując założenia ocenianej rozprawy doktorskiej, wyrażone w postaci hipotezy, celu i przyjętego zakresu stwierdzam, że zostały one przez Autora zrealizowane. Opracowano model optycznej identyfikacji współrzędnych punktów pomiarowych, co pozwoliło na opracowanie modelu funkcjonalnego dla optycznych pomiarów realizowanych za pomocą maszyny multisensorowej wraz z korekcją dokładności. Opracowano również oprogramowanie symulacyjne do szacowania niepewności pomiaru i zintegrowano je z oprogramowaniem Calypso firmy Zeiss.

W dysertacji dokonano przeglądu literatury, a Autor powołuje się we właściwych miejscach na artykuły, książki i normy. Można jednak mieć drobne zastrzeżenie, co do sposobu prezentacji odnośników literaturowych, gdyż zamiast zbiorczej informacji na końcu akapitu bardziej właściwe byłoby, w miejscach gdzie jest to możliwe, przypisanie pozycji literaturowych do poszczególnych informacji i stwierdzeń. Nie zmienia to jednak faktu, iż dobór źródeł literaturowych oraz zakres przeprowadzonych prac i osiągnięte rezultaty potwierdzają możliwości i umiejętności Pana mgra inż. Wiktora HARMATYSA do prowadzenia badań naukowych i formułowania właściwych wniosków z nich płynących.

Poniżej prezentuję bardziej szczegółowe uwagi krytyczne i polemiczne, dotyczące poszczególnych fragmentów dysertacji:

Na stronie 8 Autor przedstawia krótką historię techniki współrzędnościowej. Wymieniając urządzenia historyczne nie wspomina jednak o pierwszej maszynie zaliczanej do grupy CMM, jaką było urządzenie firmy Ferranti, Ltd (za: Hocken R.J., Pereira P.H. (eds.). "Coordinate Measuring Machines and Systems". Boca Raton: CRC Press, 2012).

Również na stronie 8 zamieszczono podział na maszyny o konstrukcji otwartej i zamkniętej. Charakteryzując urządzenia można było dodać, iż rozwiązania z ruchomym portalem lub stołem zaliczane są do urządzeń portalowych.

Na stronie 9 Autor prezentuje wspomniane maszyny portalowe pokazując schemat oraz zdjęcie urządzenia laboratorium Politechniki Krakowskiej. Ponieważ te dwa obrazy dotyczą odmiennych konstrukcji, można było o tym wspomnieć w komentarzu, by nie tworzyć wrażenia ich adekwatności, a taką zachowano dla rysunków 4 i 5 (str. 10). Ponadto rysunek 2 powinien mieć odnośnik do normy [N1-1] zamiast publikacji [51], w której się na ww. normę powołano.

Na stronie 12 Doktorant podaje informacje, iż pomiar z zastosowaniem optycznych maszyn współrzędnościowych dla głowicy optycznej ma charakter 2D. Można z tym stwierdzeniem polemizować, gdyż możliwy jest pomiar wysokości elementu na bazie ustawienia ostrości. Jest to jednak rozwiązanie mniej dokładne i stąd określane jako 2,5D dla podkreślenia odmienności w stosunku do np. stykowych pomiarów 3D.



Na stronie 14 Autor wymienia błędy układów optycznych, które w dalszej części rozdziału omawia. W wykazie zabrakło omawianej w rozdziale 3.1.4 dystorsji, natomiast szkoda, że nie omówiono zjawiska krzywizny pola oraz aberracji chromatycznej. Ponadto Doktorant używa sformułowania abberacja, podczas gdy to zjawisko nosi nazwę aberracji.

Pewnym ułatwieniem dla czytającego byłoby, gdyby Autor w opisie rysunku 13 zaznaczył, który z podawanych przykładów dotyczy dystorsji ujemnej, a który dodatniej. Na kolejnej stronie zawarto rysunek 14 – jest on w znacznym stopniu podobny do rysunku 13.

Na stronie 20 na rysunku 17 podano przykład rozbicia obrazu na składowe RGB. Niestety jakość zdjęcia nie pozwala na zaobserwowanie tych różnic. Pod ww. rysunkiem następuje opis histogramu jasności. Szkoda, że Autor nie przedstawił graficznej ilustracji takiego wykresu.

Na stronie 22 zawarto opis do rysunku 2 – jak sądzę, jest to opis do rysunku 18 i należało go umieścić razem z opisem ww. rysunku. Dalej na stronie 22 w rozdziale 3.3.1 Autor opisuje metodę wykrywania krawędzi. Na ilustracji do tej metody (rys. 19) można było przedstawić osie układu współrzędnych powiązane z prezentowanymi równaniami.

Na stronie 25 na rysunku 22 zilustrowano wykrywanie krawędzi z użyciem operatora Sobela. Niestety zasada działania tego operatora nie została opisana w tekście, jak ma to miejsce dla operatorów Robertsa (rozdział 3.3.1) i Canny (rozdział 3.3.2).

Na stronie 27 w opisie metody porównawczej wkradła się drobna nieścisłość. W tabeli 1 zawarto informacje, że materiał wzorca i przedmiotu mierzonego mogą być podobne, natomiast w tekście nad tabelą podano, że muszą być identyczne. Warto by również podać źródło literaturowe dla informacji podanych w ww. tabeli.

Na stronie 30 i 31 zawarto rysunki obrazujące strategię pomiaru dla metody wielopozycyjnej. Położenie obiektów związane jest w tym przypadku z orientacją względem osi układu współrzędnych – można było te osie przedstawić na ilustracji.

W rozdziale 3.6.2 – *Wyznaczenie błędu próbkowania PF2D*, zawarto opis procedury zgodnie z normą, jednak można było go zakończyć informacją co należy uczynić z obliczonymi odległościami pomiędzy środkiem wyznaczonego elementu, a zebranymi punktami.

Na stronie 37 rozpoczyna się rozdział 5 zatytułowanym „*Identyfikacja źródeł błędów optycznych maszyny pomiarowej*”. Wydaje się, że bardziej właściwy byłby tytuł: „*Identyfikacja źródeł błędów optycznej maszyny pomiarowej*”, gdyż w rozdziale tym badaniu poddano nie tylko błędy układu optycznego, ale również m.in. wpływ zmiany temperatury na wyniku uzyskiwany za pomocą optycznej maszyny pomiarowej. Na tej samej stronie Autor stwierdza, że „*W przypadku systemu bez ruchomego stołu nie byłby możliwy pomiar obiektu większego niż zakres roboczy obiektywu bez zmiany obiektywu i powiększenia*”. Nie jest to stwierdzenie do końca prawdziwe, gdyż są spotykane na rynku rozwiązania maszyn multisensorowych, w których stół wykonuje ruch jedynie w jednej osi, bądź ruch w trzech kierunkach wykonuje układ optyczny. Również na stronie 37 omawiając rysunek 28 Doktorant stwierdza, że największą grupę stanowią błędy pochodzące od konstrukcji WMP. Warto by jednak dodać, że równie liczna jest grupa związana z głowicą pomiarową, co wynika z ww. rysunku.

Na stronie 38 przedstawiono na rysunku 29 źródła błędów dla optycznych maszyn pomiarowych. W części dotyczące mierzonego przedmiotu zabrakło w mojej ocenie informacji na

temat wpływu rozproszenia i transparentności ściśle związanych z materiałem, z którego wykonany jest obiekt badany.

Na stronie 40 Autor przedstawia opracowany przez siebie adapter z filtrem zamontowany na maszynie O'Inspect (rys. 31). Można było bardziej wyeksponować, bądź oznaczyć kolorem ten element, gdyż jest on trudny do zaobserwowania.

Na stronach 42/43 przedstawiono wyniki badań odchyłki kształtu okręgu z zastosowaniem filtrów. Dla danych w tabeli 3 nie podano, czy zawarte w niej dane to wartość średnia z 50 pomiarów, czy przykładowy zestaw danych. Ponadto dane te nie są zbieżne z wartościami zawartymi na rysunkach 34 i 35. W opisie tych rysunków nie zawarto również informacji, czy tzw. wąsy obrazują rozrzut, odchylenie standardowe, czy inną wartość. Uwaga ta dotyczy również rysunków 36-38.

Na stronie 46 Autor zawarł informację, że podczas pomiarów użyto największego dostępnego powiększenia 6,3x. Nie wyjaśnia natomiast dlaczego zdecydowano się na taką konfigurację. Dalej w tym rozdziale Doktorant opisując procedurę badania wpływu podświetlenia na wynik pomiaru podaje, że zmierzono płytę otworową oraz pierścien o średnicy 20 mm. Z dalszej części rozdziału można uzyskać informację, iż pierścienie w płycie otworowej mają średnicę 5 mm. Nie podano jednak informacji z czego wynika taki dobór średnic elementów wzorcowych i dlaczego użycie samej płyty nie było wystarczające. Nie podano również, które z okręgów w płycie wzorcowej były badane.

Na stronie 47 omawiając rysunki 40-42 Autor podaje, że „Wartości po lewej stronie wykresu odpowiadające najniższym wartościom podświetlenia są raczej mało stabilne”. Sformułowanie to jest mało szczęśliwe i można było podać bardziej precyzyjny opis odpowiadający rozprawie doktorskiej. Kontynuując opis na str. 48 Doktorant powołuje się na analizę literatury dotyczącą właściwości fizycznych światła – nie podaje jednak odnośników literaturowych.

Analizując wyniki przedstawione na wykresach rys. 40-42 zastanawia dlaczego zestawiono dane dla tak różnej liczby punktów pomiarowych jakimi są 4 i 12, a 3600. Nie zmienia to jednak faktu, że charakter zmian prezentowanych wyników jest tożsamy. Na wspomnianych wykresach zabrakło w mojej ocenie informacji prezentującej wartość wzorcową średnicy. Pozwoliłoby to ocenić, która z wartości podświetlenia pozwala uzyskać średnicę o najmniejszej odchyłce.

Opisując na stronie 49 wartości przedstawione na rysunku 43 Autor podaje, iż wartości odchyłki okrągłości dla najmniejszej intensywności podświetlenia charakteryzują się „...najmniejszą stabilnością”. W mojej ocenie oprócz ewidentnej różnicy wartości dla podświetlenia L9 pozostałe wartości, aż do L100 cechują się nawet większymi różnicami wartości, a interpretacja może pochodzić od zagęszczenia zmian wartości podświetlenie, która w obszarze L9-L20 realizowana jest co 1 punkt procentowy.

Na stronie 55 przedstawiono wyniki pomiarów pierścienia w różnych pozycjach stołu pomiarowego. Podano wartości średnich w osi X i Y. Jednak trudno zrozumieć, czego są to wartości średnie – współrzędnych dla 12 punktów pomiarowych zebranych w lokalnym układzie współrzędnych? Prezentując dane w tabeli 5 można było również je zaokrąglić do wartości znaczących.

Na stronie 56 przedstawiono wartości koordynat X i Y punktu pomiarowego dla podświetlenia 10% i 20%. Można było przedstawić te informacje dla skrajnych wartości

podświetlenia odpowiadających 9% i 100% (co zapisano na str. 55). Można było się również pokusić o wykres zbiorczy dla omawianych danych.

Na stronie 66 Autor omawia wpływ temperatury otoczenia na wynik pomiaru. Analizując przyjęte wartości temperatury powietrza należy zadać pytanie, czy różnica wartości temperatury pomiędzy 25°C, a 26°C jest, aż tak istotna?

W rozdziale 5.6 przedstawiono wyniki wpływu temperatury pracy maszyny na uzyskiwane rezultaty. Doktorant omawiając wyniki zaprezentowane na wykresach (rys. 70 i 71) podaje wartości temperatury 21,4°C oraz 21,33°C, które nie korespondują z wartościami stabilizacji termicznej przedstawionymi na ww. wykresach.

Na stronie 72 przedstawiono rysunek 72 – brakuje informacji do jakich zakresów temperatur odnoszą się wykresy a-f. Ponadto zamiast używać anglicyzmu „*deviacja*” lepiej było użyć polskiego słowa „*odchyłka*”. Poniżej na tej samej stronie Autor podaje wyniki dotyczące korekcji temperatury. Dlaczego korekcja była realizowana w osobnym oprogramowaniu, a nie skorzystano z algorytmów urządzenia?

Na stronie 75 przedstawiono tabelę 6 zatytułowaną „*Tabela wyników pomiarów*” – uważam, że tytuł powinien być bardziej adekwatny do zawartości tabeli. Ponadto liczby prezentujące poszczególne wartości należałoby zaokrąglić do wartości o odpowiedniej liczbie miejsc znaczących. Dalej na stronie 75 Autor stwierdza: „... *że nie ma różnicy, czy maszyna osiąga stabilizację termiczną, czy nie.*”, potwierdzając to rysunkiem 76. Czy nie jest to zbyt duży skrót myślowy. Analizując przedstawione dane można zaobserwować, że wartości ulegają zmianom, jednak ich korekcja pozwala wyeliminować wpływ rozgrzewania na uzyskiwane wartości. Informacje dotyczące tego aspektu Autor przedstawia również na stronie 95 dysertacji omawiając publikacje [28].

Na stronie 78 Doktorant zaprezentował dwa wykresy elips otrzymanych podczas pomiaru wzorca szklanego dla odpowiednio 30% i 100% prędkości maszyny (rys. 78-79). Myślę, że można było te dwa zbiory przedstawić na wspólnym wykresie. Ułatwiłoby to zaobserwowanie różnic wynikających z prędkości urządzenia.

Na stronach 79-81 przedstawiono wykresy obrazujące zmianę współrzędnej Y punktu w zależności od podświetlenia i wielkości pola autofocus'a. Nie zaprezentowano danych szczegółowych dla pola 9x9 pokazanego na wykresie zbiorczym (rys. 84). Nie podano również, czy „*wąsy*” odnoszą się do rozrzutu wartości, czy odchylenia standardowego.

Na stronie 83 Autor podaje, iż „*przedstawione składniki są to elementy mające największy wpływ na akwizycję punktów pomiarowych, oprócz nich istnieją inne składniki ... jednak są one pomijalnie małe ...*”. Składniki te nie są brane pod uwagę w opracowanym modelu, jednak można było je dla porządku wymienić.

Na stronie 86 Doktorant wyjaśnia, jak dobierał skok wartości podświetlenia. Opis ten można było zawrzeć znacznie wcześniej w rozdziale 5, w którym zgodnie z tą filozofią badano wpływ intensywności oświetlenia na uzyskiwane wyniki.

Na rysunku 91 (str. 89) przedstawiono graficznie brak zgodności wektorów kierunkowych oraz interpolację liniową. Można było zachować tożsamość oznaczeń pomiędzy rysunkami.

W rozdziale 6 Autor przedstawia schematy graficzne dotyczące kolejnych etapów symulacji. Są one bardzo przejrzyste i ułatwiają zrozumienie poszczególnych kroków. Jednak można było w opisie rysunków zamieścić informację o tym, co oznaczają poszczególne symbole stanowiące wartości wejściowe, obliczane i wyjściowe.

W rozdziale 7 doktorant przedstawił efekty weryfikacji opracowanego modelu. Wykresy obrazują tylko część uzyskanych wyników – brakuje jednak informacji, jak one korelują z wynikami, które nie zostały pokazane. Ponadto niektóre z danych można było zaprezentować na wykresie zbiorczym np. rys. 110-112.

W recenzowanej rozprawie doktorskiej znalazły się także pewne błędy edytorskie i gramatyczne. Dla porządku wymieniam kilka przykładów:

- Str. 22 – „Gradient można opisać jako wektor, którego kierunek wyznacza największy wzrost wartości funkcji w poszczególnych funkcjach”. Powinno być raczej: „... w poszczególnych kierunkach”.
- Str. 23 – „Kolejności wykonywania etapów nie jest przypadkowa, ponieważ w następnej kolejności na obraz cyfrowy stosuje się maskę Laplace’a,...”. Powinno być raczej: „Kolejność wykonywania etapów nie jest przypadkowa, ponieważ w następnym kroku na obraz cyfrowy stosuje się maskę Laplace’a,...”.
- Str. 32 – „Do tego celu używany jest dwuwymiarowy wzorzec płyty otworowej.” Powinno być raczej: „Do tego celu używany jest dwuwymiarowy wzorzec, jakim jest płyta otworowa.”
- Str. 58 – „Wyniki uzyskane podczas opisanych badań będą przydatne w opracowaniu pierwszego w pełni funkcjonalnego modelu wirtualnego współrzędnościowej maszyny optycznej do szacowania niepewności pomiaru współrzędnych.” Powinno być raczej: „Wyniki uzyskane podczas opisanych badań będą przydatne w opracowaniu pierwszego w pełni funkcjonalnego modelu wirtualnej współrzędnościowej maszyny optycznej, umożliwiające szacowanie niepewności wyników pomiarów.”
- Str. 117 – „... i jest przydatny w szacowaniu dokładności zadań pomiarowych.”, raczej powinno być „... i jest przydatny w szacowaniu niepewności zadań pomiarowych.”
- Ponadto w pracy Autor często używa określeń „na wykresie poniżej”, czy „na rysunku powyżej”. Nie zawsze jest to szczęśliwe rozwiązanie, gdy rysunek znajduje się na sąsiedniej stronie. Bardziej precyzyjnym rozwiązaniem jest podawanie numerów konkretnych rysunków, czy tabel.

Pewnym mankamentem edycyjnym są tzw. „teksty wiszące”. Ma to miejsce w rozdziałach 2, 3.3; 3.5; 3.6; 5; 6 i 7. Można było w takim przypadku dodać dodatkowy podrozdział, lub włączyć tekst do następującego po nim podrozdziału.

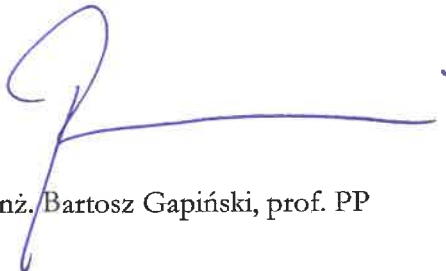
Oceniając stronę edytorską analizowanej pracy należy podkreślić, że jest ona napisana poprawnym językiem polskim. Wykazane powyżej drobne nieścisłości nie umniejszają jej wysokiego poziomu i mają jedynie charakter porządkowy. Zawarte w pracy rysunki obrazują zagadnienia związane z przeglądem literatury oraz przeprowadzonymi badaniami i uzyskanymi wynikami stanowiąc odpowiednie uzupełnienie prezentowanych treści. W niektórych miejscach Autor mógł jednak zastosować większą czcionkę dla poprawy czytelności prezentowanych danych.

4. Wnioski

Mimo uwag krytycznych i zasygnalizowanych problemów ujętych w niniejszej recenzji stwierdzam, że Autor przedstawił koncepcję naukową oraz gotowe rozwiązanie, co dowodzi, że opanował niezbędne do prowadzenia badań podstawy metodologii i metodyki pracy badawczej. Oceniana praca jest dziełem zawierającym szereg informacji na temat współrzędnościowej techniki pomiarowej, szczególnie w ujęciu optycznych maszyn pomiarowych oraz zagadnień związanych z modelowaniem dokładności tych urządzeń. Przedstawiona metodyka badań pozwoliła na zdiagnozowanie źródeł błędów i ich oszacowanie oraz opracowanie zasad modelowania dokładności optycznych maszyn współrzędnościowych. Pozwoliło to w efekcie końcowym na weryfikację modelu oraz jego integrację z oprogramowaniem komercyjnego urządzenia pomiarowego. Właściwe ułożenie treści, podział poszczególnych rozdziałów, a także bogaty i ciekawy materiał graficzny powodują, iż dysertacja napisana jest w sposób przejrzysty i czytelny. Uporządkowanie i analiza szeregu zagadnień obejmujących podjęty temat, mimo zawartych w recenzji uwag dowodzą, iż Doktorant opanował szeroki zakres wiedzy w sposób, który umożliwi mu korzystanie z niej we właściwy sposób i pozwoli na rozwijanie dalszej działalności badawczej. Podjęta tematyka badawcza jest żywa i aktualna i została wybrana w sposób trafny, a jej zakres spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim. Dysertacja w wielu elementach wnosi treści nowe, a cele pracy zostały osiągnięte w zakresie przyjętym przez Autora. Rozpatrywana rozprawa należy do dyscypliny inżynieria mechaniczna w dziedzinie nauk inżynieryjno – technicznych i zdaniem recenzenta stanowi istotny wkład w jej rozwój.

Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska Pana mgr. inż. Wiktora HARMATYSA.: *Modelowanie dokładności optycznych współrzędnościowych maszyn pomiarowych*, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. z 2016, poz. 882) i może być dopuszczona do publicznej obrony.

Omawiana wyżej dysertacja może zostać wydana w formie monografii przez wydawnictwo Politechniki Krakowskiej w serii Mechanika, wskazana jest jednak jej skierowanie do korekty językowej.



dr hab. inż. Bartosz Gapiński, prof. PP