

Prof. dr hab. inż. Jerzy Andrzej Sładek
Laboratorium Metrologii Współrzędnościowej (M10)
Wydział Mechaniczny
Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki

**Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Marcina Adamczyka pt.
„METODA KOMPENSACJI WPŁYWU TEMPERATURY NA ODWZOROWANIE
GEOMETRII 3D Z WYKORZYSTANIEM TECHNIKI OŚWIETLENIA
STRUKTURALNEGO”**

Podstawa opracowania: zlecenie Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej z dnia 4.03.2019

1. Charakterystyka ogólna

W współczesnej metrologii współrzędnościowej coraz częściej systemy optyczne wypierają stykowe maszyny pomiarowe. Ich rosnąca dokładność, w stosunku do już znacznie krótszego czasu pomiaru w stosunku do innych technik pomiaru współrzędnościowego staje się niezbędną w wielu gałęziach przemysłu. Systemy te mogą pracować nie tylko w laboratoriach ale i bezpośrednio na hali produkcyjnej, czy otwartej przestrzeni co jednak wiąże się z dużym wpływem warunków środowiskowych i koniecznością korygowania wyniku pomiaru. Zatem prace nad rozwojem metod optycznych, a szczególnie w zakresie wyznaczania i korygowania czynników wpływających na dokładność pomiaru optycznego należy uznać za jedno z podstawowych zadań współczesnej metrologii. Zadania te przekładają się na programy badawcze. Przykładem takiego zadania był projekt PRELUDIUM finansowany przez NCBiR a zrealizowany w Zakładzie Techniki Rzeczywistości Wirtualnej Instytutu Mikromechaniki i Fotoniki Instytut Politechniki Warszawskiej o tytule.: "Badania wpływu temperatury na jakość kalibracji skanera 3D wykorzystującego metodę projekcji z oświetleniem strukturalnym" 2014/15/N/ST7/00735.

Istotnym efektem tego projektu była recenzowana praca doktorska Mgr inż. Marcina Adamczyka stanowiąc ważny wkład w rozwój nie tylko nauki o pomiarach ale i dyscypliny Budowa i Eksploatacja Maszyn (wchodzącej obecnie w zakres Inżynierii Mechanicznej)

2. Układ i obszar merytoryczny monografii:

Recenzowana praca liczy 216 stron i składa się z 7 rozdziałów w tym podsumowania. Zawiera również spis rysunków, tabel oraz bibliografię, w której zamieszczono 139 pozycji odniesionych w treści pracy. Zamieszczono też streszczenia w języku polskim i angielskim.

Rozdział 1 - Wprowadzenie - W niniejszym rozdziale autor po krótko przedstawił zasadę działania skanerów 3D działających na zasadzie światła strukturalnego oraz scharakteryzował ich budowę. Autor tak sformułował cel pracy:

"Stworzenie jakościowego i ilościowego opisu zjawisk, które zachodzą w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym podczas zmiany temperatury otoczenia, a także zaprezentowanie autorskiej metody kompensacji tego wpływu".

W dalszej części tego rozdziału znajdujemy zadania/ cele jakie postawił sobie w związku z realizacją pracy:

- Przedstawienie metody kompensacji wpływu temperatury na polowe, optyczne przyrządy pomiarowe. Ocena ich w kontekście zastosowania w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym.
- Zaprezentowanie wyników własnych badań i eksperymentów dotyczących wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym oraz ich komponenty składowe (detektor oraz projektor rastra).
- Przedstawieni nowej metody kompensacji wpływu temperatury na skaner 3D z oświetleniem strukturalnym, a także na jego elementy składowe: bazę mechaniczną, detektor oraz projektor rastra.

Rozdział 2 - Przegląd metod kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym -przedstawia przegląd metod kompensacji wpływu temperatury na przyrządy służące do bezdotykowych pomiarów polowych 3D. Przegląd dostępnych metod został podzielony na dwie grupy: kompensację sprzętową oraz programową.

Rozdział 3 – Kompensacja wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera – znajdziemy tu opis symulacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera, następnie model jej kompensacji, a wszystko zakończą eksperymenty weryfikacyjne.

Rozdział 4 - Kompensacja wpływu temperatury na kamerę cyfrową - gdzie znajdujemy opis różnych kamer, które mogą być użyte do budowy skanerów 3D, ich parametry i możliwości. W rozdziale tym autor przedstawił metody symulacyjne wyznaczenia wpływu temperatury na kamerę/ detektor, a następnie przeprowadził jej kompensację i weryfikację. Kolejnym elementem wykonanym w niniejszym rozdziale było przedstawienie zmian zaproponowanych w budowie kamery, które poprawiły stabilność wyników.

Rozdział 5 - Kompensacja wpływu temperatury na projektory rastra. Autor opisał w nim zjawisko rozgrzewania się projektora, wpływ zmiany temperatury zewnętrznej na projektor, a następnie zaproponował model kompensacji wpływu temperatury na projektor. Przeprowadził też szereg testów pozwalających na stwierdzenie iż opracowany model kompensacji daje stabilne wyniki.

Rozdział 6 – Kompensacja wpływu temperatury na skaner 3D – rozdział zawiera opis i schemat stanowiska pomiarowego do badań wpływu temperatury na skaner 3D z oświetleniem strukturalnym jako całościowy system. Autor przedstawił zaproponowane przez siebie metody wyznaczenia wpływu pochodzącego od temperatury, a następnie wyznaczył model kompensacji tego wpływu na dokładność pomiaru.

Rozdział 7 – Podsumowanie - zawiera opis w jaki sposób autor zrealizował postawione przez siebie wcześniej cele. Rozdział zawiera też wytyczne kierunki dalszych badań.

Oceniana praca ma w dużej mierze multidyscyplinarny charakter łącząc m.in. zagadnienia dotyczące metrologii współrzędnościowej, termodynamiki, mechaniki, optyki,

analizy obrazu i algorytmów numerycznych. Jednak ma ona nietypowy układ, brak w niej tezy naukowej, nie ma również klasycznego podziału na część dotyczącą analizy problemu i badania doświadczalne. Co prawda większość oddziaływań związanych z wpływem temperatury na pomiar skanerem 3D światła strukturalnego jest w pracy omawiana, ale niejako niezależnie od pracy doktorskiej, z tego powodu układ i zawartość treści pracy ma raczej charakter sprawozdania z wykonania tematu aniżeli jest klasyczną rozprawą doktorską. Dotyczy to także sposobu prezentacji pracy np. wzorów/ funkcji zaczerpniętych z oprogramowania Matlab, które są przytaczane bez stosownych wyjaśnień, co utrudnia ich zrozumienie. Ten nietypowy charakter treści powoduje, że niekiedy nie wiadomo co jest dokonaniem Autora a co zostało zaczerpnięte z opisywanych w literaturze wcześniejszych badań. Dużym problemem jest też przenikanie się badań empirycznych z eksperymentami zamodelowanymi w różnych oprogramowaniach.

Jako metrologowi nie podoba mi się też forma podawania wyników w pikselach bez koniecznego odniesienia do jednostki długości.

Opisane w rozdziale 6 badania zostały zrealizowane przy zastosowaniu Współrzędnościowego Ramienia Pomiarowego o dokładności porównywalnej do dokładności badanych skanerów 3D (powinna zostać zachowana konieczna różnica dokładności). Na uzyskane zatem wyniki dla skanerów 3D miały wpływ nieskorygowane błędy WRP co widać przy pomiarze wzorca kształtowego - wykonanego z włókna węglowego a więc stabilnego termicznie, kształtując ostateczne wyniki dotyczące wpływów termicznych na dokładność wskazań skanera 3D z udziałem jednak błędów ramienia pomiarowego.

Postępowanie jakie zaproponował Autor byłoby poprawne gdyby jedynie zastosowano system pomiarowy ramienia o wyższej dokładności z pełną korektą wpływów termicznych lub lepiej, stosując w trakcie pomiarów wzorzec np. Ball Bar (zbudowany np. z kul ceramicznych umieszczonych na podstawie np. z Robaxu). Realizacja w tym przypadku badań opierała by się na pomiarach między odniesieniowych takiego wzorca, ramieniem (nawet niższej dokładności) w trakcie weryfikacji badawczej wyników ze skanera 3D. Odniesieniem była by dokładność wzorca typu Ball Bar WRP zaś komparatorem.

3. Ocena przyjętej przez Autora koncepcji naukowej oraz sposobu jej realizacji w treści pracy.

Praca doktorska Mgr inż. Marcina Adamczyka ma formę sprawozdania badawczego, gdzie Autor w oparciu o wcześniejsze analizy oraz metody symulacyjne opracował podstawy modelu kompensacji termicznej skanera 3D światła strukturalnego. Badania prowadzone były w 4 odrębnych blokach. Autor zbadał wpływ temperatury na bazę mechaniczną skanera, na detektory polowe używane w skanerach, na projektory rastra używane w skanerach oraz na cały skaner 3D z oświetleniem strukturalnym. Eksperymenty ukierunkowane były na opisanie oraz skompensowanie efektów zjawisk termicznych, których konsekwencją były deformacje geometryczne skanów, rejestrowanych obrazów bądź też błędy wyników pomiarów. Autor na podstawie przeprowadzonych symulacji w programach graficznych i obliczeniowych zaproponował kompensację wpływu temperatury osobno dla tzw. bazy skanera, osobno dla kamery/ detektorów i osobno dla projektora, a na samym końcu dla całego systemu pomiarowego. Zbudował stanowisko badawcze i przeprowadził weryfikację swoich modeli (w większości przypadków zrobił to poprawnie) oraz opisał wyniki. Można jednak powiedzieć, iż weryfikacja metrologiczna powinna być szersza co pozostawia pewien niedosyt odnośnie jednoznaczności osiągniętych wyników.

Na szczególną uwagę zasługuje również fakt, iż doktorant zaproponował zmianę konstrukcji kamery w celu uniknięcia zbyt dużych rozrzutów błędów, które uniemożliwiały wyznaczenie stabilnego modelu kompensacji.

Oceniając przyjętą koncepcję naukową i sposób jej realizacji należy stwierdzić za przyjętą przez Autora koncepcją naukową zaowocowała metodą kompensacji wpływu temperatury na odwzorowanie geometrii 3D z wykorzystaniem oświetlenia strukturalnego i jej weryfikacją eksperymentalną którą z powodzeniem będą mogli zastosować producenci skanerów. Autor poruszył bardzo istotny problem, którego właśnie producenci zdają z oczywistych względów się nie zauważać, zaś użytkownicy często zgłaszają problemy z dokładnością pomiaru wynikającej z zidentyfikowanego problemu.

Niezależnie od pewnych uwag krytycznych, stwierdzam, że Autor wykazał się konieczną wiedzą i doświadczeniem pozwalającą na podjęcie zaproponowanego tematu, zdefiniowania celu i opracowania planu badań. Szczególnie pozytywnie należy ocenić sformułowanie konstrukcje modeli i autorskie, metody kompensacji wpływu temperatury zarówno na cały system pomiarowy skanera 3D jak i na jego poszczególne elementy. Wszystko to pozwala mi na jednoznaczne stwierdzenie że Doktorant potrafi rozwiązywać problemy naukowe, korzystać z nowoczesnego aparatu badawczego, oraz ma wystarczającą wiedzę by podejmować rozwiązywanie problemów teoretycznych, a szczególnie modelować zjawiska z obszaru nauk technicznych i wybranej specjalności.

4. Uwagi szczegółowe odnośnie opracowania pracy

Recenzentowi nasunęły się pewne uwagi i wątpliwości, które powinny być uwzględnione przez Autora w dalszych pracach a niektóre wyjaśnione. Zaznaczyłem je w tekście rozprawy a poniżej podaje wybrane z zauważonych błędów i nieścisłości.

- | | |
|---------|--|
| str. 20 | Autor używa niewłaściwie określenia - walidacja mówiąc o wzorcowaniu systemów pomiarowych. „Walidacja” nie jest synonimem „wzorcowania” |
| Str. 21 | Rysunek jest narysowany odręcznie, niestarannie według starego wydania, w nowym wydaniu VDI/VDE ponadto zalecane ustawienia są zmienione. |
| Str.81 | Wyniki podawane w pikselach nie mówią nic użytkownikowi i w zależności od rozdzielczości danego urządzenia mają różne wymiary. |
| Str. 85 | Brak opisu i charakterystyki funkcji użytej do dopasowania wielomianów. Podanie samej nazwy funkcji z programu Matlab jest niewystarczające. |
| Str.88 | Podczas oceny rezultatów kompensacji temperatury dla bazy skanera poprawności metrologicznej. Jednorazowy pomiar nie daje pełnego obrazu, i by był przydatny pomiar należy podać go wraz z niepewnością, którą np. wyznaczamy w wyniku kilkukrotnego pomiaru. |
| Str.92 | W całym rozdziale mówiącym o kompensacji wpływu temperatury na kamerę cyfrową wykorzystywany jest wzorzec, który (według str.95 pierwszego akapitu) był tym samym wzorcem, na którym adjustowany był system (wszystkie normy dotyczące systemów pomiarowych wyraźnie wyraźnie na to zwracają |

Str.110-111	uwagę . Ta sama uwaga co powyżej - wyniki podawane w pikselach.
Str. 136	Ta sama uwaga co powyżej - brak opisu i charakteryzacji funkcji użytej do dopasowania wielomianów. Podanie samej nazwy funkcji z programu Matlab jest niewystarczające.
Str. 136	Ta sama uwaga co powyżej - wyniki podawane w pikselach.
Str. 140	Jak powyżej wykorzystany podrozdział 4.3.3 opisuje weryfikację kompensacji na tym samym wzorcu na którym był adjustowany system. Patrząc na rysunek 4.35 ułożenie wzorca pokrywało się z ustawieniem wzorca podczas wyznaczania skoku faz, podczas adjustacji systemu, co również jest niezgodne z wymogami norm (wyniki mogą zawierać nieskorygowane błędy systematyczne)
Str.158	Ta sama uwaga co powyżej - wyniki podawane w pikselach.
Str. 168	Ta sama uwaga co powyżej - wyniki podawane w pikselach.
Str. 170-175	Ta sama uwaga co powyżej - wyniki podawane w pikselach.
Str.172	Ta sama uwaga co powyżej -brak opisu i charakterystyki użytej funkcji. Podanie samej nazwy funkcji z programu Matlab jest niewystarczające.
Str.182	Wykorzystywane w badaniach Współrzędnościowe Ramię Pomiarowe Sigma jest systemem starszej generacji, nie posiadały one kompensacji co miało istotny wpływ na wyniki pomiaru (firma ROMER nie mogła ominąć wówczas kluczowego patentu, który wygasł w 2015 roku). Dlatego dla użytego w badaniach WRP był dołączany zewnętrzny czujnik temperatury, jednak służył do uniemożliwienia realizacji pomiarów gdy była ona zbyt wysoka.

Wybrane uwagi szczegółowe o charakterze „literówki” lub znaki interpunkcji:

Jest ich stosunkowo dużo, a więc korekta tekstu była zbyt pobieżna.

Ogólna uwaga: podpis pod rysunkami jest bardzo często zbyt długi i niestety pisany tą samą wielkością czcionki co tekst, co powoduje niekiedy nieczytelność.

str.13 nie powinna występować kropka po tytule podrozdziału,

- str. 15 tytuł podrozdziału został na końcu strony, dodatkowo występuje po nim kropka ,
- str.20 nie powinna występować kropka po tytule podrozdziału, nie domknięto nawiasu po wyjaśnieniu skrótu CRF (trzeci myślnik),
- str.21 rysunki 1.6 a i b, są rysunkami odręcznymi i zeskanowanymi, co znacznie sprawia wrażenie niestaranności edycyjnej
- str.24 drugi akapit jest *doświadczenia*, powinno być *doświadczenie*,
- str.42 dwie kropki po opisie rysunku 2.6,
- str.47 wiersz 12-ty od góry; jest *czasy*, ma być *czasu*,
- str.82 wiersz 11-ty od góry; jest *pomierzonej*, ma być *pomierzonych*,
- str.89 wiersz 6-ty od góry; jest *nić*, ma być *niż*,
- str.92 akapit 2-gi, pierwsze zdanie; jest*stosuje się cyfrowe* powinno być....*stosuje się kamery cyfrowe*,
- str.96 wiersz 7-my od dołu; jest dodatkowe słowo *ma*, którego nie powinno być,
- str.100 nie powinna występować kropka po tytule podrozdziału,
- str.105 tytuł podrozdziału został na końcu strony,
- str. 130 wiersz 12 –ty od dołu; jest ... gradientu temperatury na wewnątrz i na zewnątrz...., powinno byćgradientu temperatury wewnątrz i na zewnątrz...
- str. 142 wiersz 3 –ci od dołu; nie domknięto nawiasu po (Rys. 4.32... ,
- str. 164 w opisie rysunku 5.15: jest *Kolejne przesunięcia zostały przeskalowano...*, powinno być: *Kolejne przesunięcia zostały przeskalowane...*,
- str. 165 ostatnia linijka; jest *pomiar* ma być *pomiaru*,
- str. 166 akapit 2 –gi od dołu; jest *W przypadku projektora Casio XJ-A252 miejsce to nie zostało poprawnie dobrane i w efekcie podczas eksperymentów wysnuto.....* ma być *W przypadku projektora Casio XJ-A252 miejsce to nie zostało poprawnie dobrane w efekcie czego podczas eksperymentów wysnuto.....*
- str. 177 akapit 2 –gi; występuje dodatkowo słowo *oraz*,
- str. 187 wiersz 13 –ty od góry; jest *był* ma być *była*.

Bibliografia jest źle sformatowana, ponieważ w kilku podpunktach zaczyna się imieniem autora, innym razem nazwiskiem, a jeszcze innym razem jest tylko inicjał imienia przed lub za nazwiskiem.

5. Ocena rozprawy doktorskiej i wniosek końcowy

Oceniając znaczenie oraz sposób postawionego zadania naukowego mimo uwag krytycznych - dość typowych dla młodych badaczy, a ujętych w punkcie 2,3 i 4, recenzji stwierdzam, że Autor przedstawił spójną koncepcję naukową, co dowodzi, że opanował podstawy metodologii i metodyki pracy badawczej, niezbędne do prowadzenia badań. Dobór bibliografii z zakresu jest w pełni adekwatny do omawianych zagadnień i uzasadnia podjęcie tematu. Uporządkowanie zaś, analiza obszaru tematycznego, mimo zawartych w rozdziale 3 recenzji uwag dowodzą, że doktorant opanował szeroki zakres wiedzy w sposób, który umożliwia właściwe z niej korzystanie i rozwijanie własnej działalności badawczej.

Praca została napisana poprawnym językiem przyjęta forma prezentacji wyników jest ogólnie zrozumiała. Powtarzam tu uwagę z rozdziału 2 recenzji a dotycząca układu pracy - szkoda, że praca nie miała postawionej tezy i nie została zakończona konkretnymi wnioskami, a jedynie ogólnym podsumowaniem wykonanych prac. Przydałyby się bowiem wnioski podzielone na naukowe, ściśle użyteczne oraz szczegółowe dotyczące wyników konkretnych a zauważonych sytuacji bądź rezultatów badań.

Zauważone błędy stylistyczne, literówki oraz pewne braki redakcyjne odnośnie sposobu prezentacji w pracy osiągnięć własnych doktoranta nie umniejszają pozytywnej oceny strony formalnej pracy.

Recenzowana rozprawa należy do dyscypliny naukowej – Budowa i Eksploatacja Maszyn i zdaniem recenzenta stanowi istotny wkład w jej rozwój.

Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że główne osiągnięcia pracy zostały opublikowane w renomowanych czasopismach: *Applied Optics* oraz *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* oraz w *Journal of Forensic Sciences* oraz *Sensors*.

Recenzent stawia zatem wniosek o wyróżnienie pracy uzasadniąc go znaczeniem podjętej tematyki jej oryginalnym rozwiązaniem oraz uznaniem przez środowisko naukowe co potwierdzają publikacje w renomowanych czasopismach.

Powyższe konkluzje upoważniają mnie do stwierdzenia, że recenzowana praca mgr inż. Marcina Adamczyka spełnia wymagania stawiane przy ubieganiu się o stopień naukowy doktora nauk technicznych a zawarte w ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65 Poz.595 z dnia 14.03.2003 r. z późniejszymi zmianami).

Wnoszę zatem o dopuszczenie recenzowanej pracy do publicznej obrony.

Kraków 11 kwietnia 2019 r.

