

Warszawa, 07.04.2019 r.

Dr hab. inż. Robert Zalewski, prof. uczelni  
Zakład Techniki Komputerowych  
Instytutu Podstaw Budowy Maszyn  
Politechniki Warszawskiej  
ul. Narbutta 84  
02-524 Warszawa

## **OPINIA**

**o rozprawie doktorskiej mgr. inż. Marcina Adamczyka pt.  
„Metoda kompensacji wpływu temperatury na odwzorowanie geometrii 3D  
z wykorzystaniem techniki oświetlenia strukturalnego”**

**Promotor pracy: dr hab. inż. Robert Sitnik, prof. PW  
Promotor pomocniczy: dr inż. Leszek Wawrzyniuk**

### **Podstawa formalna wykonania opinii:**

- pismo Pana prof. dr. hab. inż. Macieja Kościelnego, Prodziekana ds. Nauki Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej, z dnia 04.03.2019 r., znak WMt.521.4.2019,
- umowa o dzieło polegająca na opracowaniu opinii rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Adamczyka pt. „Metoda kompensacji wpływu temperatury na odwzorowanie geometrii 3D z wykorzystaniem techniki oświetlenia strukturalnego”

### **1. CHARAKTERYSTYKA ROZPRAWY**

Przedstawiona do opinii rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Adamczyka została udokumentowana na 216 stronach. Rozprawa została podzielona na 7 rozdziałów poprzedzonych:

- - podziękowaniami,
- - streszczeniem,
- - streszczeniem w jęz. angielskim (Abstract),
- - spisem treści.

Ponadto po ostatnim, siódmym rozdziale w rozprawie zamieszczono:

- - spis rysunków,
- - spis tabel
- - bibliografię (139 pozycji).

## **2. OCENA ROZPRAWY**

Rozważane w opiniowanej rozprawie problemy naukowe to metody kompensacji wpływu temperatury na zróżnicowane przyrządy pomiarowe. Skupiono się na zastosowaniu ich w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym. Problemy te są w sposób prawidłowy i jednoznaczny ujęte, a sama rozprawa stanowi oryginalne ich rozwiązanie. Doktorant realizując kolejne etapy precyzyjnie skonstruowanego i ambitnego programu badań konsekwentnie zmierzał do postawionego celu. Prawidłowo zdefiniował poligon badawczy, dokonał właściwej syntezy funkcjonujących w literaturze metod rozwiązywania problemów kompensacji temperatury oraz zaproponował cztery autorskie metody wspomnianej kompensacji urządzeń skanujących oraz ich komponentów składowych. Realizacja tych prac świadczy o poziomie wiedzy Doktoranta, dobrej znajomości problematyki, wysokich umiejętnościach organizacyjnych, co wymaga specjalnego podkreślenia przy realizacji tak obszernego programu badań. W opiniowanej pracy doktorskiej Doktorant przebadął wpływ temperatury zarówno na podstawę mechaniczną rozważanego urządzenia, jak również na detektory polowe i projektory rastra. Badał także "całościowo" skaner 3D z oświetleniem strukturalnym.

W podejmowanej w rozprawie tematyce Doktorant wykazał się trafnością postępowania badawczego i poprawnością wnioskowania, co świadczy o wiedzy i umiejętności samodzielnego prowadzenia prac naukowych.

## **3. ANALIZA ROZPRAWY**

W rozdziale pierwszym Autor dokonuje wprowadzenia w tematykę pracy. Szczegółowo omawia w nim zasady działania urządzeń typu skaner 3D, wykorzystujących technikę projekcji z oświetleniem strukturalnym. Wprowadzenie zawiera szczegółowy opis budowy popularnych rozwiązań konstrukcyjnych skanerów 3D, z uwzględnieniem ich najważniejszych cech tj. liczba detektorów, rozdzielczość przestrzenna pomiaru, niepewność pomiarowa, objętość pomiarowa, prędkość pomiaru czy pomiar w kolorze. Autor zwraca szczególną uwagę na zagadnienia wpływu zmiennej temperatury na rejestrowane wyniki. W omawianym rozdziale znajduje się także opis motywacji Doktoranta do podjęcia tematyki rozprawy oraz formułowane są także najważniejsze cele badawcze, które autor zamierzał osiągnąć.

Wartymi podkreślenia są:

- brak publikacji naukowych zawierających wyniki badań, które opisywałyby wpływ zmian temperatury na wyniki pomiarów wykonanych przy użyciu skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym,
- zbyt mała liczba publikacji, które opisują wpływ zmian temperatury na deformacje obrazów rejestrowanych przez kamery cyfrowe (będące nieodłącznym komponentem skanerów 3D),
- mało reprezentatywna weryfikacja eksperymentalna zaprezentowana w istniejących publikacjach,

- brak prac związanych z budową modeli kompensacji wpływu zmiennej temperatury na obrazy rejestrowane przez kamerę cyfrową,
- brak publikacji opisujących wpływ zmian temperatury na deformacje obrazów wyświetlanych przez projektor rastra,
- niepodejmowanie w literaturze światowej istotnego problemu budowy modelu kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D.

Zasadniczym celem pracy było zbadanie jakościowego i ilościowego wpływu zmiennej temperatury urządzenia skanującego, mającego istotny wpływ na rejestrowane przez skanery 3D oraz jego komponenty składowe wyniki. Równie istotnym celem pracy było podjęcie próby usystematyzowania rozpatrywanego zjawiska, a także ilościowego jego opisanie i skompensowanie.

Rozdział drugi zawiera przegląd metod kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D z oświetleniem strukturalnym. Rozdział ten jest podzielony jest na 3 części:

- opis metod wykorzystywanych, lub mogących być wykorzystanych, do sprzętowej kompensacji wpływu temperatury,
- opis metod wykorzystywanych, lub mogących być wykorzystanych, do programowej kompensacji wpływu temperatury,
- podsumowanie.

W przypadku sprzętowych metod kompensacji, wymienione zostały metody polegające na stosowaniu materiałów o możliwie niskiej wartości współczynnika rozszerzalności cieplnej (znajdują one głównie zastosowania przy kompensacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera), metody zaczerpnięte z konstrukcji układów optycznych (atermalizacja), oraz metody zakładające utrzymywanie skanera w stałej temperaturze. W tym podrozdziale zawarto także ocenę możliwości zastosowania wybranej metody w kontekście kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D i ich elementy składowe.

W przypadku programowanych metod kompensacji, wymienione zostały metody symulacyjne oraz pozwalające na kompensację wpływu temperatury na parametry modelu "kamery otworkowej". Podrozdział ten zawiera także opis metody zastosowany w przypadku bardzo podobnej metody pomiarowej (fotogrametrycznego, dwukamerowego systemu pomiarowego), który pozwala na zbudowanie modelu odchyłki temperaturowej. Rozdział drugi kończy się rozważaniami na temat praktycznej możliwości zastosowania wspomnianych metod, przy zagadnieniu kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D SLS.

Rozdział trzeci recenzowanej pracy zawiera opis czterech różnych autorskich metod kompensacji wpływu temperatury na skanery 3D oraz jego elementy składowe. W rozdziale tym opisana jest metoda kompensacji wpływu zmiennej temperatury na bazę mechaniczną skanera. Rozdział rozpoczyna opis metody kalibracji rzeczywistego skanera 3D zbudowanego na potrzeby przeprowadzenia badań. Opisane są także rezultaty prowadzonych symulacji wpływu zmian temperatury na bazę mechaniczną skanera a także zaprezentowana została metoda przeniesienia wyników symulacji na wirtualny model skanera stworzony w środowisku 3Ds MAX. Na podstawie wirtualnego modelu skanera, uwzględniającego deformacje termiczne bazy, zbudowany został model kompensacyjny, który następnie

weryfikowany był przy użyciu rzeczywistego skanera 3D. W rozpatrywanym rozdziale pokazano wyniki przeprowadzonej weryfikacji działania modelu, przy użyciu wzorca kształtu typu "ball-bar".

Najobszerniejszy rozdział czwarty rozprawy podejmuje problemy wpływu temperatury na jeden z komponentów składowych skanera 3D - kamerę cyfrową. W części tej opisane zostały wyniki eksperymentów dotyczących wpływu procesu rozgrzewania się (warming-up process) kamery na rejestrowane przez nią obrazy. Autor Rozprawy prezentuje wyniki pomiarów deformacji obrazów dla 5 różnych modeli kamer, które stanowią pewnego rodzaju przekrój dostępnych na rynku modeli rozważanych urządzeń. Ciekawostką jest, że jeden z modeli wyposażony jest w zewnętrzny układ do utrzymywania stałej temperatury sensora kamery niezależnie od temperatury zewnętrznej. W dalszej części zaprezentowane zostały wyniki badań wpływu zmiennej temperatury otoczenia na obrazy rejestrowane przez rozpatrywane kamery. Zaprezentowanie w Rozprawie rezultaty badań pokazują "nieprzewidywalność" temperaturowego dryftu rejestrowanego obrazu i skłaniają do modyfikacji konstrukcji kamery. W kolejnym podrozdziale zaprezentowane są różne warianty modyfikacji konstrukcji kamery, prowadzące do uzyskania urządzenia rejestrującego, którego zachowanie w zmiennej temperaturze staje się powtarzalne. W dalszej kolejności przedstawiono model kompensacji wpływu temperatury na rejestrowane przez kamerę obrazy, a także zaprezentowano wyniki walidacji stworzonego modelu kompensacyjnego.

Rozdział piąty zawiera opis badań nad wpływem temperatury na projektor rastra, będący komponentem składowym skanera 3D z oświetleniem strukturalnym. Ten rozdział jest skomponowany bardzo podobnie do poprzedniej sekcji. W pierwszej kolejności opisano wpływ etapu rozgrzewania się projektora na wyświetlany obraz. Następnie uwidoczniono wpływ zmian temperatury zewnętrznej. W rozdziale piątym znajduje się także opis proponowanego modelu kompensacyjnego, a także jego walidacja.

Rozdział szósty zawiera wyniki przeprowadzonych badań dotyczących wpływu zmiennej temperatury na urządzenie rejestrujące. W tej części opisana została także metodologia postępowania podczas prowadzenia badań i zaprezentowany został model kompensacyjny. W końcowej części rozdziału zaprezentowano działanie modelu kompensacyjnego. W wyniku zastosowania opracowanego modelu udało się znacznie rozszerzyć zakres rozważanych temperatur, w których skaner może przeprowadzać, poprawne pod względem metrologicznym, pomiary.

Rozdział siódmy zawiera podsumowanie całej rozprawy, a także opis zrealizowanych celów badawczych postawionych we wstępnej części pracy. W tym miejscu zawarto także perspektywiczne kierunki prac związanych z tematyką badań wpływu temperatury na skanery 3D, wykorzystujące metodę projekcji z oświetleniem strukturalnym.

#### 4. UWAGI, SUGESTIE I SPOSTRZEŻENIA

Uwagi, sugestie i spostrzeżenia, które nasuwają się podczas czytania rozprawy mają raczej charakter polemiczny. Najważniejsze z nich to:

1. W pracy założono, że baza mechaniczna skanera jest w formie belki. W skanerach 3D często wykorzystywane są także inne formy bazy mechanicznej np. konstrukcje płytowe, materiały anizotropowe, które pod wpływem zmian temperatury odkształcają się w złożony sposób. Wspomina się także o możliwości stosowania w elementach nośnych konstrukcji urządzenia rejestrującego elementów kompozytowych. Elementy takie mogą wykazywać różne postacie deformacji w wyniku doznawanych naprężeń termicznych.

Czy Doktorant rozważał także użycie zaproponowanej metody kompensacyjnej w kontekście innych form bazy mechanicznej?

2. Czy Doktorant rozważał także inne niż zaproponowana metoda kompensacji w obrazach 2D modele kompensacji wpływu temperatury na deformacje obrazu rejestrowane przez kamery?

3. Czy Doktorant badał wpływ zamocowania projektora na odkształcenia projektowanego obrazu?

4. Czy wpływ orientacji skanera względem pola grawitacyjnego i związane z tą orientacją odkształcenia sprężyste całej struktury konstrukcyjnej skanera i jego komponentów także mają wpływ na jakość odwzorowania powierzchni 3D obiektów przestrzennych?

5. W rozdziale szóstym przedstawiono metodę kompensacji wpływu zmiennej temperatury na skaner 3D z oświetleniem strukturalnym. Metoda zakłada traktowanie skanera jako przysłowiowej „czarnej skrzynki”. W efekcie badany jest wpływ temperatury na deformacje objętości pomiarowej skanera, bez badania wpływu zmiennej temperatury na bazę mechaniczną, kamerę oraz projektor. W poprzednich rozdziałach wpływ ten został wyznaczony, opisany i skompensowany. Skąd zatem wzięło się podejście zakładające traktowanie skanera jako „czarnej skrzynki”?

## 5. PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

Podsumowując recenzowaną pracę stwierdzam, że do szczególnych osiągnięć Autora można zaliczyć:

- opis oraz ocenę możliwości zastosowania w skanerach 3D z oświetleniem strukturalnym, istniejących metod kompensacji wpływu temperatury na polowe, optyczne metody pomiaru kształtu geometrii powierzchni,
- zaproponowaną metodę kompensacji wpływu temperatury na bazę mechaniczną skanera 3D; działanie metody i jej korzystny wpływ na rezultaty pomiarów zostało ukazane także w eksperymencie oraz opisane liczbowo; w mojej ocenie przedstawiona metoda kompensacji ma duże szanse wdrożeniowe w skanerach, w których wpływ temperatury objawia się głównie w postaci deformacji bazy mechanicznej skanera (np. skanery do zastosowań medycznych);
- uświadomienie powszechności występowania problemu braku powtarzalności wyników pomiarów podczas rejestracji obrazów przez kamery cyfrowe w różnych temperaturach; przedstawienie zmodyfikowanej konstrukcji kamery, która prowadzi do osiągnięcia pożądanej powtarzalności; zaprezentowana metoda kompensacji wpływu temperatury na deformacje obrazów rejestrowanych przez kamery cyfrowe, która jest przeprowadzana w dziedzinie obrazów 2D może znaleźć wdrożenie w bardzo wielu aplikacjach pomiarowych 2D i 3D, niezależnie od przyjętego modelu kamery; zaprezentowanie wyników testów eksperymentalnych, które potwierdzają działanie zaproponowanej metody;
- ukazanie wpływu zmiennej temperatury na projektory rastra, wykorzystywane w budowie skanerów 3D z oświetleniem strukturalnym; wedle mojego aktualnego stanu wiedzy są to oryginalne wyniki badawcze opisujące wpływ temperatury na projektowane przez projektor obrazy;
- zaproponowanie metodologii przeprowadzania pomiarów temperaturowego dryftu obrazu (zarówno dla projektorów jak i kamer cyfrowych) na zbudowanych samodzielnie stanowiskach pomiarowych.

Autor w ramach rozprawy podjął się wielowątkowego i dość ambitnego zadania badawczego. Przegląd literaturowy świadczy o dobrym rozeznaniu tematyki w podejmowanych obszarach. Stanowił on punkt wyjścia do formułowania celów pracy dotyczących badań empirycznych i modelowania wpływu kompensacji temperatury na odwzorowanie geometrii 3D. Praca jest dość dobrze umocowana teoretycznie. Autor swobodnie i umiejętnie przeplata własne przemyślenia z doniesieniami literaturowymi. Materiał ilustracyjny jest na ogół dobrze dobrany. Autor przygotował wielowariantowy, szczegółowy i obszerny plan badań, który konsekwentnie realizował. Reprezentatywne wyniki badań zostały zamieszczone w tekście głównym rozprawy. W sposób syntetyczny została zaprezentowana metodyka badań empirycznych. Przyjęte metody badań świadczą o dobrym opanowaniu przez Doktoranta warsztatu badawczego. Rozprawa jest wartościowym opracowaniem zawierającym oryginalne rozwiązanie zagadnienia naukowego o dużych walorach poznawczych.

Całość pracy oceniam pozytywnie, a sama rozprawa stanowi wartościowe dzieło. Przedstawione w powyższych punktach pytania mają charakter stricte dyskusyjny i nie wpływają na ogólną, wysoką ocenę rozprawy doktorskiej mgr. inż. Marcina Adamczyka. Mogą być tym niemniej uwzględnione przez Niego przy przygotowywaniu publikacji z zakresu objętego rozprawą. Podejmowane problemy naukowe Doktorant rozwiązał w sposób oryginalny.

Zatem stwierdzam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr. inż. Marcina Adamczyka pt. „Metoda kompensacji wpływu temperatury na odwzorowanie geometrii 3D z wykorzystaniem techniki oświetlenia strukturalnego” spełnia z nadmiarem wszystkie wymogi stawiane rozprawom doktorskim, określone Ustawą o Stopniach i Tytule Naukowym oraz o Stopniach i Tytule w Zakresie Sztuki. Uwzględniając znaczenie aplikacyjne recenzowanej rozprawy oraz wyróżniający, na tym etapie rozwoju naukowego, dorobek publikacyjny Doktoranta, wnioskuję o wyróżnienie jego rozprawy doktorskiej.

Podsumowując niniejszą recenzję wnioskuję do Rady Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie Pana mgr. inż. Marcina Adamczyka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

*Robert Zalewski*