

Wrocław 31.08.2024

dr hab. inż. Jacek Reiner, profesor uczelni
Politechnika Wrocławska
Wydział Mechaniczny
Katedra Technologii Laserowych,
Automatyzacji i Organizacji Produkcji
Wyb. S. Wyspiańskiego 27
50-370 Wrocław
jacek.reiner@pwr.edu.pl

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Łukasza Marcina Markiewicza

pt.: „Metoda pomiaru ciała człowieka w wykorzystaniu chmury punktów na potrzeby przemysłu odzieżowego”

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Marcina Markiewicza, pt.: „Metoda pomiaru ciała człowieka w wykorzystaniu chmury punktów na potrzeby przemysłu odzieżowego”, zrealizowana pod kierunkiem Profesora dr hab. inż. Roberta Sitnika. Recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo Dziekana Wydziału Mechatroniki Politechniki Warszawskiej Profesora dr hab. inż. Gerarda Cybulskiego.

1. Obszar problemowy rozprawy

Oczekiwania estetyczne i funkcjonalne wobec odzieży rosną, jednocześnie koszty wysokiej indywidualizacji, wynikające również ze zmian demograficznych sylwetki człowieka muszą być zredukowane. Stąd konieczność automatyzacji tego obszaru wiedzy i sztuki pomiarów ciała ludzkiego – czyli cyfrowa antropometria. Co jest niezbędne, aby taka rewolucja mogła się dokonać? Digitalizacja ciała ludzkiego, uzyskiwana poprzez skanowanie 3D oraz algorytmy do analizy uzyskanych chmur punktów. Okazuje się jednak, że problemy nie dotyczą wyłącznie dostępności skanerów 3D, czy oprogramowania, bowiem obiekt – ciało ludzkie, jest bardzo niepowtarzalny, zmienny, a nawet podatny na technikę samego pomiaru. Stąd należy oczekiwać, że opracowanie metodyki i algorytmów pomiarów ciała ludzkiego na podstawie modeli cyfrowych jest niezbędnym krokiem do zdefiniowania nowych metryk antropometrycznych.

W takim kontekście wyzwanie badawcze opracowania „Metody pomiaru ciała człowieka w wykorzystaniu chmury punktów na potrzeby przemysłu odzieżowego”, podjęte przez mgr inż. Łukasza Marcina Markiewicza uważam za naukowo uzasadnione, gospodarczo ważne i ambitne.

Badania prowadzone w tym zakresie wymagają interdyscyplinarnej wiedzy i umiejętności optomechatronicznych ze szczególnym rozumieniem aspektów przetwarzania i analizy danych przestrzennych, stąd tematyka tej pracy mieści się w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

2. Kompozycja i treść rozprawy

Dysertacja obejmuje 145 stron, podzielona jest na 7 rozdziałów, na początku pracy znajdujemy Streszczenie i anglojęzyczny Abstract oraz wykaz najważniejszych pojęć i skrótów.

We „**Wprowadzeniu**” Autor przedstawia motywację do podjęcia swojej pracy badawczej, definiując pojęcie Antropometrii, istotę i ciągłą trudność jednoznacznych, odtwarzalnych i efektywnych pomiarów ciała ludzkiego oraz rosnące wymagania użytkowników, jak również ewolucję fizjonomii człowieka.

Na podstawie powyższych wniosków, został sformułowany nadrzędny cel pracy jako, **Opracowanie oraz weryfikacja metody automatycznego pomiaru ciała człowieka, która zostanie dostosowana do potrzeb przemysłu odzieżowego**. Opracowana metoda ma bazować na chmurze punktów 3D pełnej sylwetki człowieka.

W dalszej części przedstawiono szczegółowe cele naukowe i aplikacyjne. Pomocny jest również spis pomiarów antropometrycznych z podziałem na kategorie, a podsumowane jest przejrzystym omówieniem struktury pracy.

Rozdział 2, zatytułowany „**Przegląd metod pomiaru ciała człowieka**” to bardzo solidne kompendium wiedzy o antropometrii, a w szczególności: obowiązujących standardach, metodach tradycyjnych i cyfrowych pomiarów oraz dostępnych rozwiązaniach na rynku. Przegląd ten jest obszerny i rzetelny, bazuje bowiem na większości z 355 aktualnych pozycji bibliograficznych, które są licznie wskazywane w tekście. Stąd, znajdujemy tu informacje i porównanie najważniejszych metod skanowania 3D ciała ludzkiego: (SL) światło strukturalne, (ToF) czas przelotu wiązki, fotogrametria, (LT) triangulacja laserowa oraz metody modelowania parametrycznego i nieparametrycznego ciała ludzkiego. Szczegółowo omówiono proces przygotowania danych 3D (filtracja, uzupełnianie braków, dopasowywanie różnych widoków, segmentacja), detekcja punktów antropometrycznych oraz wymiarowanie (bezpośrednie na danych, pośrednie na modelach parametrycznych, bezpośrednie na podstawie cech obrazów 2D, estymacja za pomocą uczenia maszynowego). Porównanie systemów dostępnych na rynku jest podzielone na systemy 3D, systemy 4D oraz aplikacje mobilne.

Bardzo cenne jest Podsumowanie rozdziału, zawiera bowiem wartościowe wnioski Autora z przeprowadzonych badań literaturowych.

Rozdział 3 pt. „**Materiały**”, omawia stanowiska badawcze używane do akwizycji danych i ich walidacji. Dane były pozyskiwane za pomocą skanera światła strukturalnego (MSP) opracowanego w ramach projektu Formfit. Skaner ten składał się z czterech modułów, po dwa układy projekcyjne i detekcyjne. System ten umożliwiał skanowanie obiektów w przestrzeni 1,5 x 1,5 x 2,5m, z dokładnością <0,3mm i czasem skanowania <3s. Do celów porównawczych użyto skanera Vitronic Vitus Smart XXL (HS: Human Solution) wraz z oprogramowaniem do antropometrycznej analizy danych Anthroscan Scan WorX. Skaner ten umożliwiał skanowanie obiektów w przestrzeni 1,2 x 1 x 2,1m, z dokładnością <1mm i czasem skanowania ok. 10sek.

Rozdział 4, pt. „**Metoda pomiaru ciała w wykorzystaniu chmury punktów**”, przedstawia autorskie algorytmy służące do automatycznego wyznaczania wymiarów ciała człowieka w zastosowaniach konstrukcji odzieży. Przedstawiono kompletny proces przetwarzania, obejmujący: przygotowanie chmury punktów, segmentację, wyliczenie krzywizny Gaussa, wyszukiwanie punktów charakterystycznych oraz pomiary obwodowe, łukowe i liniowe. Poszczególne zagadnienia przedstawione są na szczegółowym poziomie, omawiają i uzasadniają przyjęte podejście analityczne oraz prezentują opracowane algorytmy w formie pseudokodów. Szereg przykładów ilustruje trudne zagadnienia, jak np. analiza konturu sylwetki, różnice wyników analizy sylwetki kobiety i mężczyzny, problem wyznaczania punktów antropomorficznych oraz istotne trudności przy wymiarowaniu obwodowym, łukowym i liniowym, również w kontekście sylwetki człowieka.

W Rozdziale 5 zaprezentowano i omówiono procedury i wyniki „**Walidacji algorytmów wymiarowania**”. Autor zaczyna od charakteryzacji demograficznej 40 uczestników badania. Następnie omawia wyniki analizy dokładności pomiarów, zaprezentowanych w formie wykresów pudełkowych Tukey’a dla błędów względnych i bezwzględnych, dla poszczególnych kategorii pomiarów (obwody, łuki, długości liniowe), w trzech ujęciach, kobiety i mężczyźni, mężczyźni, kobiety. Następnie ocenia spójność oraz zgodność absolutną między wynikami analizy danych pozyskanych z dwóch różnych systemów skanowania (MSP i HS). Analizy zostały przeprowadzone nie tylko dla każdego z typów pomiarów, ale również zbiorczo dla grup pomiarów obwodowych, łukowych i krzywizn. Dalej przedstawione są wyniki oceny powtarzalności, co było możliwe dzięki trzykrotnemu powtórzeniu skanowania. Kolejne badanie dotyczyło porównywalności pomiarów manualnych i automatycznych, które prowadzono zgodnie z normą ISO20685. W celu głębszego zrozumienia źródeł dostrzeżonych błędów przeprowadzono pogłębioną analizę dokładności, z podziałem na grupy płci i kategorie pomiarów. Dyskusja przyczyn rozbieżności wyników w tym rozdziale zasługuje na wyróżnienie, jest bowiem niezwykle głęboka, krytyczna i dojrzała. Autor nie upiększa wyników, ale odważnie dyskutuje dlaczego tak jest i co należałoby zrobić aby było lepiej.

Rozdział 6 „**Praktyczne zastosowanie metody w przemyśle odzieżowym**” omawia wyniki prac rozwojowych na bazie opracowanych algorytmów. Znajdujemy tu informacje o użyciu aktualnych technologii informatycznych: C++, wtyczki platformy FRAMES, IPCServer-IPClient, XML, PLY. Opracowane rozwiązanie, zostało zintegrowane z systemem ewidencji i analizy danych antropomorficznych AWiOR oraz aplikacją do obsługi skanera. Umożliwiło to obszerne badania walidacyjne w ramach projektu Formfit, na wielu grupach osób, łącznie ponad 560 funkcjonariuszy i dodatkowo ok. 2800 osób. Zaprezentowano wyniki analizy statystycznej badanej grupy i możliwość optymalizacji tabel rozmiarów spodni służbowych, dzięki opracowanym algorytmom.

Rozdział 7, „**Podsumowanie**” rzeczowo i krytycznie omawia zrealizowane prace oraz uzyskane wyniki. Znajdujemy omówienie każdego z poszczególnych celów naukowych. A na wyróżnienie zasługuje, konstruktywna dyskusja Autora nad problemami trudnymi i niezadowolającymi wynikami. Znajdujemy tu również istotny dorobek bibliograficzny związany z niniejszą dysertacją. Wartościowa jest również analiza wyników w perspektywie korzyści z zastosowania opracowanych metod i ich ograniczeń. Dodatkowo, przedstawione perspektywy dalszych badań i rozwoju opracowanych metod są bardzo ambitne, ale wiarygodne.

W końcowej części pracy zamieszczono „zaskakująco” obszerne piśmiennictwo źródłowe. Bibliografia, obejmuje bowiem 355 pozycji, aktualnych, dobrze dobranych do celu i zakresu pracy jak w monografii.

Redakcja pracy zasługuje na wyróżnienie. Kompozycja rozdziałów, przypisy i odsyłacze nie budzą zastrzeżeń. Praca jest napisana doskonałym językiem, bez błędów stylistycznych czy redakcyjnych. Forma graficzna i edycyjna są na najwyższym poziomie.

3. Ocena celu pracy

Autor jasno i trafnie formułuje cel pracy doktorskiej jako „**Opracowanie i weryfikacja metody automatycznego pomiaru ciała człowieka, która zostanie dostosowana do potrzeb przemysłu odzieżowego**”. Opracowana metoda ma bazować na chmurze punktów kartezyjskich 3D pełnej sylwetki człowieka.

Sformułowano również, że wynikiem powinien być kompleksowy zestaw wymiarów oparty o punkty antropometryczne, który będzie mógł być użyty do projektowania odzieży lub badań antropometrycznych populacji.

Cel badawczy tj. opracowanie metodyki i algorytmów cyfrowego wyznaczania

wymiarów antropometrycznych jest mierzalny, tj. jest ilościowo określony przez dokładność, powtarzalność i spójność oraz zgodność. Cele aplikacyjne są ambitne i uzasadnione.

Tematyka niniejszej pracy leży w zakresie inżynierii mechanicznej, obszarze metrologii wielkości geometrycznych, metrologii współrzędnościowej i optycznej. Jej realizacja wymaga wiedzy i umiejętności w zakresie modelowania i projektowania systemów pomiarowych wraz opracowywaniem i implementacją algorytmów przetwarzania i analizy danych.

4. Wskazanie i ocena metod badawczych

Niniejsza praca doktorska dowodzi bardzo dobrego opanowania przez Autora zastosowania metod i narzędzi naukowych w pracach badawczych, tj.

- Studium literaturowe - jest bardzo obszerne, obejmuje 355 pozycji, wnioski są wartościowe.
- Sformułowanie celu badawczo-rozwojowego, ograniczeń i celów szczegółowych, na podstawie przeprowadzonych badań literaturowych.
- Zgłębienie podstaw teoretycznych do rozwijanych zagadnień przetwarzania danych pomiarowych.
- Zaplanowanie i przeprowadzenie i ocena akwizycji danych pomiarowych – skanów 3D.
- Implementacja algorytmów i opracowanie stanowiska badawczego.
- Opracowanie architektury i procesu przetwarzania danych pomiarowych oraz poszczególnych metod i algorytmów:
 - Przetwarzanie wstępne chmury punktów,
 - Segmentacja,
 - Obliczanie krzywizny Gaussa,
 - Automatyczna detekcja punktów antropometrycznych,
 - Wymiarowanie: obwodowe, łukowe i liniowe.
- Walidacja algorytmów wymiarowania (planowanie eksperymentów, analiza dokładności, ocena spójności i zgodności między metodami, ocena powtarzalności, porównanie wyników metod manualnych i automatycznych)
- Krytyczna dyskusja i pogłębiona analiza niezgodności

Zastosowane metody badawcze są interdyscyplinarne, z bardzo dużym udziałem zaawansowanego przetwarzania danych. Są odpowiednie do zakresu realizowanych prac, obejmują wszystkie typowe działania zgodnie z prawidłową metodologią badawczo-rozwojową.

5. Aplikacyjność wyników

Na uznanie zasługuje wykorzystanie wypracowanej wiedzy i opracowanych algorytmów w ramach projektu Fitform. Po obszernej fazie badań wstępnych, w przypadku straży Granicznej, wykazano, że wymiary prawie połowy osób nie mieszczą się w żadnym z przedziałów tabel rozmiarów. W ten sposób wyodrębniono nowe typy sylwetek, co poprawiło komfort użytkowania takiej funkcjonalnej odzieży, jak również pozwoliło zoptymalizować koszty produkcji dostosowywania i przechowywania odzieży. Ostatecznie zeskanowano 32 funkcjonariuszy Policji, co umożliwiło przygotowanie dla nich ubrań szytych na miarę, bez potrzeby wykonywania pomiarów ręcznych.

Na podstawie przeprowadzonych badań przemysłowych Autor postuluje, że zwiększenie dostępności mobilnych systemów skanowania, tj. opartych na smartfonach, wyraźnie wpłynie na upowszechnienie cyfrowej antropometrii.

6. Zagadnienia dyskusyjne i uwagi krytyczne

- a) Czy na podstawie przeprowadzonych danych można sformułować jakieś wnioski na temat rozdzielczości skanowania 3D? Odpowiedź taka jest kluczowa w kontekście oceny, czy mobilna fotogrametria za pomocą smartphone (np. PolyCAM), lub kamery 3D (iPhone) jest wystarczającym rozwiązaniem.
- b) Czy nie byłoby korzystniejsze, z punktu widzenia metodycznego, najpierw przeanalizowanie powtarzalności, a dopiero później dokładności pomiarów podczas procedury walidacji metrologicznej?
- c) Czy miałby Pan pomysł na procedurę walidacyjną badania odtwarzalności pomiarów? Co mogłaby ona ujawnić?
- d) Opracowana metoda analizy antropomorficznej daje możliwość zdefiniowania nowych metryk pomiarowych. Jakie przykładowe cechy można by zaproponować, czy znajdują akceptację, jeśli skanery o dostatecznych parametrach będą w smartfonie?
- e) Uważam, że rozdział 3. jest zatytułowany niefortunnie „Materiały”, ponadto korzystny byłby „wgląd” w dane surowe.
- f) Parametry metrologiczne skanera HS wydają się być gorsze niż MSP – czy rzeczywiście jest on optymalnym urządzeniem referencyjnym?

7. Konkluzja

Recenzowana praca mgr inż. Łukasza Marcina Markiewicza pt.: „Metoda pomiaru ciała człowieka w wykorzystaniu chmury punktów na potrzeby przemysłu odzieżowego” podejmuje ważny, przyszłościowy temat pomiarów antropometrycznych bazujących na cyfrowych danych przestrzennych. Ciało ludzkie jest obiektem trudnym do odtwarzalnego wymiarowania, a ponadto, metrologicznie poprawny pomiar nie gwarantuje komfortu noszenia odzieży, zwłaszcza funkcjonalnej.

Autor poprawnie postawił cel badawczo-rozwojowy, uszczegółowił ilościowo kryteria jego osiągnięcia i zdekomponował go na cele cząstkowe.

Zakres przeprowadzonych prac jest bardzo obszerny. Autor rzetelnie i obszernie przestudiował i opisał zagadnienia metody pomiaru ciała człowieka, w zakresie monograficznym, bazując na 355 pozycjach literaturowych.

Opracował i przeprowadził eksperymenty akwizycji danych – skanowania osób. Opracował oryginalne algorytmy przetwarzania i analizy chmur punktów powierzchni ciała człowieka, zgodnie z kanonem antropometrii. Opracowane algorytmy poddał rzetelnym i kompleksowym badaniom walidacyjnym. Szczególnie doceniam krytyczną dyskusję Doktoranta, nad zaobserwowanymi osobliwościami i ograniczeniami opracowanych metod podczas walidacji. Dyskusja tutaj prowadzona jest merytoryczna i konstruktywna. To właśnie taka dojrzałość Autora, zainicjowała moją dociekliwość i pytania o charakterze poszerzającym. Moje uwagi w żaden sposób nie umniejszają osiągniętych wyników niniejszej pracy. Na pochwałę zasługuje również niezwykle staranna edycja i bardzo dojrzały język przedłożonej rozprawy.

Wobec powyższego, stwierdzam, że Doktorant z wyróżnieniem wykazał się przygotowaniem do prowadzenia badań naukowych i przemysłowych.

Stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. mgr inż. Łukasza Marcina Markiewicza, pt.: „Metoda pomiaru ciała człowieka w wykorzystaniu chmury punktów na potrzeby przemysłu odzieżowego” spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę z dnia 20 lipca 2018 roku "Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce" (Dz.U. 2022 poz. 574 z późniejszymi zm.) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna w Politechnice Warszawskiej o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów postępowania.

Ponadto wnioskuję o poddanie pod głosowanie wyróżnienia niniejszej pracy doktorskiej mgr inż. **Łukasza Marcina Markiewicza**, za wyróżniające przeprowadzenie i udokumentowanie całego procesu badawczo-rozwojowego, opracowania metody i algorytmów pomiarów antropomorficznych wraz z ich walidacją metrologiczną i bardzo rzetelną ich oceną.

dr hab. inż. Jacek Reiner, profesor uczelni

Politechnika Wroclawska

