

---

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. Marty Natalii NOWAK pt.**  
***METODA ANALIZY DANYCH POMIAROWYCH***  
***REPREZENTUJĄCYCH GEOMETRIĘ CIAŁA CZŁOWIEKA***  
***W RUCHU DO ZASTOSOWAŃ W ANIMACJI TRÓJWYMIAROWEJ***

**Promotor: prof. dr hab. inż. Robert SITNIK**

**Podstawa opracowania recenzji:**

Uchwała Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej  
NMt.521.12.2021 z dnia 5 listopada 2021r.

**1. Wprowadzenie**

Metrologia jest dziedziną wiedzy pozwalającą na pozyskanie informacji na temat otaczającego nas świata. Co istotne opis ten charakteryzowany jest przez odpowiednie wielkości wzorcowe i definiujące je jednostki. Poprawnie przeprowadzony cykl działań metrologicznych umożliwia ilościowe opisanie otaczającej nas rzeczywistości i jej weryfikację np. pod kątem przydatności do łączenia w większe obiekty, czy prowadzenia rozliczeń finansowych.

Ze względu na liczne zalety, w obecnych czasach, coraz silniej rozwijane są w pomiarach techniki wizyjne. Pozwalają one m.in. na bardzo szybką rejestrację obiektów o relatywnie dużych rozmiarach. Cechy te powodują rozwój metrologii nazywanej 4D, gdzie oprócz danych opisanych współrzędnymi punktów pomiarowych w przestrzeni (3D) rejestrowane są kolejne ujęcia obiektu pozwalające uwzględnić czwarty wymiar, jakim staje się czas. Wadą tego procesu jest rejestracja znacznej ilości danych, co jest wyzwaniem dla oprogramowań komputerowych, jak i samych

---

komputerów. Problematiczna staje się również analiza danych pomiarowych wymagająca pogodzenia odpowiedniej dokładności ich obróbki z czasem.

Wspomniany już rozwój komputerów i oprogramowań pozwala na włączenie świata wirtualnego do coraz szerszego spektrum życia człowieka. Z jednej strony może być to rzeczywistość wirtualna stosowana do szkolenia pracowników – coraz popularniejsze szkolenia z zastosowaniem VR, z drugiej strony stosowanie rzeczywistości rozszerzonej na przykład w najnowocześniejszych rozwiązaniach nawigacji samochodowych, a z kolejnej strony opracowanie obrazów przestrzennych znajdujących zastosowanie w filmach, czy grach komputerowych. Wierność odtworzenia obiektów (w tym ludzi) jest obecnie bardzo wierna, co niejednokrotnie uniemożliwia wręcz odróżnienie obrazów wirtualnych od realnych, ale jednocześnie wymusza dostarczania danych o odpowiednio wysokiej jakości, by ta wierność była możliwa do uzyskania. Z tych powodów wszelkie prace pozwalające na uzyskanie obrazów o lepszej jakości, bądź skrócenie czasu ich analizy, czy redukcji ilości danych pomiarowych są jak najbardziej wskazane, potrzebne i aktualne.

Między innymi z tych powodów podjęta przez Panią mgr inż. Martę NOWAK tematyka, związana z opracowaniem metody analizy danych pomiarowych reprezentujących geometrię ciała człowieka w ruchu do zastosowań w animacji trójwymiarowej jest aktualna, a jednocześnie pokazuje jak wiele jest jeszcze możliwości w tym obszarze. W świetle przedstawionych zagadnień podjęcie tematu rozprawy należy uznać za trafne i w pełni uzasadnione, zarówno pod względem naukowym, jak i użytecznym. To wszystko sprawia, że praca poruszająca omawianą tematykę jest bardzo interesująca, a zaproponowane rozwiązania mają szansę na wdrożenie w praktyce.

## 2. Układ i obszar merytoryczny rozprawy

Recenzowana praca liczy 82 strony i składa się z 7 rozdziałów oraz z nienumerowanego streszczenia w języku polskim i angielskim. W dysertacji zamieszczono również spis pojęć i skrótów stosowanych w tekście. Praca poprzedzona jest spisem treści. Właściwa część rozprawy zawiera następujące elementy:

Rozdział 1 – *Wprowadzenie* – Autorka przedstawia w nim motywację do podjęcia tematu oraz cel rozprawy, jakim było opracowanie metody analizy skanów 4D o dużej rozdzielczości przestrzennej i czasowej reprezentującej ciało człowieka w ruchu dla celów animacji postaci trójwymiarowej. W części został również skrótowo przedstawiony układ rozprawy.

Rozdział 2 – *Omówienie istniejących rozwiązań* – Doktorantka dokonała szczegółowego przeglądu literatury w obszarze systemów pomiarowych obejmujący kamery cyfrowe, kamery RGBD, skanery światła strukturalnego, skanery *Structure for Motion*, skanery *Shape from Silhouette*. Zajęła się również zagadnieniem animacji postaci oraz rozwiązaniami bazującymi na danych wideo, sensorach RGBD i metodach, w których stosowane są skany 3D o wysokiej rozdzielczości.

Rozdział 3 – *Metoda transferu ruchu animowanej postaci na podstawie skanów 4D* – w którym Doktorantka prezentuje opracowaną przez siebie metodę transferu ruchu. Opisuje dane wejściowe dla algorytmu, jakimi są sekwencja skanów 3D człowieka w ruchu, szkielet animacji dla

---

ujęcia początkowego oraz siatka bazowa wraz z wagami animacji szkieletowej. Następnie opisuje zasady śledzenia pozy szkieletu człowieka m.in. z użyciem techniki iteracji najbliższego punktu oraz zasady mapowania kształtu i morfowania siatki.

Rozdział 4 – *Ewaluacja i dyskusja* – w rozdziale tym Autorka przedstawiła wyniki walidacji opracowanych przez siebie algorytmów (metody mapowania przez uśrednianie, oraz mapowania z aproksymacją RBF) w odniesieniu do uznanej za referencyjną metody D-Faust. Zaprezentowała również ograniczenia jakie występują podczas stosowania ww. algorytmów.

Rozdział 5 – *Podsumowanie* – zawiera krótkie podsumowanie rozprawy doktorskiej.

Rozdział 6 – *Dodatek A* – zawiera tabelarycznie zestawione pełne wyniki porównania opracowanych algorytmów z metodą D-Faust przedstawione w rozdziale 4.

Rozdział 7 – *Bibliografia* – jest to wykaz zawierający 121 pozycji. Doktorantka jest współautorką jednej spośród wymienionych w wykazie literatury.

### 3. Ocena rozprawy doktorskiej

Poddana ocenie rozprawa doktorska jest interesującym opracowaniem zawierającym szereg informacji na temat digitalizacji obiektów w ruchu oraz związanych z tym metod analizy danych pomiarowych. Przedstawiona treść pozwala pozytywnie ocenić wiedzę i doświadczenie Autorki. Zaprezentowane rozwiązania i wyniki odzwierciedlają, w ocenie czytającego, odpowiednie zgłębienie podjętego tematu. Umożliwiło to przeprowadzenie stosownych badań i uzyskanie satysfakcjonujących rezultatów. Czytając rozprawę odnosi się pozytywne i oczekiwane wrażenie, że Doktorantka zna zagadnienia związane z metodami pomiaru obiektu, jakim jest ludzkie ciało w ruchu oraz metodami analizy takich danych pomiarowych. Pozwoliło jej to na analizę skanów 4D o dużej rozdzielczości za pomocą autorskiej metody mapowania przez uśrednianie oraz mapowania z aproksymacją RBF. Pani mgr. inż. Marta NOWAK ma świadomość realizowanych przez siebie badań i co najważniejsze potrafi wyciągać konkretne wnioski prezentując zalety i wady analizowanych rozwiązań. Świadczy to o Jej dojrzałości naukowej i należy to oceniać pozytywnie.

Analizując założenia ocenianej rozprawy doktorskiej, wyrażone w postaci celu głównego i wytycznych przyjętych dla opracowywanej metody analizy skanów 4D stwierdzam, że zostały one przez Doktorantkę zrealizowane. Opracowane zostały dwie metody mapowania skanów 4D wykorzystujące dane z dynamicznego pomiaru ciała człowieka, umożliwiające transfer ruchu szkieletu na podstawie sekwencji skanów i transfer deformacji głównych segmentów ciała. Pozwalają one na utrzymanie spójnego modelu szkieletu i siatki wyjściowej w całej sekwencji przy zachowaniu założonej dokładności. W tym celu Autorka dokonała przeglądu literaturowego, opracowała stosowne algorytmy oraz przeprowadziła ich walidację.

Pani mgr inż. Marta NOWAK dokonała szerokiego przeglądu literatury światowej, przywołując ją we właściwych miejscach w treści dysertacji. Pozwoliło to na syntetyczne przedstawienie poszczególnych zagadnień i dowodzi znajomości materii u Doktorantki. Wszystkie te aspekty niewątpliwie potwierdzają możliwości i umiejętności Autorki do

---

przewodzenia badań naukowych i formułowania właściwych wniosków z nich płynących. Szkoda jednak,

że w przeglądzie literatury powołała się jedynie na jedną swoją publikację, gdy tymczasem przynajmniej dwie inne dostępne w bazie SCOPUS dotyczą omawianego zagadnienia: Nowak, M., Michoński, J., Sitnik, R.: *Filling cavities in point clouds representing human body surface using Bezier patches. Multimedia Tools and Applications*, 2021 oraz Sitnik, R., Nowak, M., Liberadzki, P., Michoński, J.: *4D scanning system for measurement of human body in motion. IS and T International Symposium on Electronic Imaging Science and Technology*, 2019, 2019(16), 3DMP-002. Byłoby to dodatkowe potwierdzenie efektów pracy Doktorantki.

Pomimo wysokiego poziomu omawianej pracy wskazać można jednak fragmenty i sformułowania, które poniżej prezentuję bardziej szczegółowo w postaci uwag krytycznych i polemicznych:

Na stronie 7 Autorka podaje *wykaz używanych w pracy pojęć i skrótów* – jest on bardzo przydatny, jednak można było go rozbudować choćby o wszystkie nazwy i skróty metod analizy obrazu

i danych pomiarowych stosowane w treści pracy. Pojęcia te pojawiają się w tekście, a zebranie ich w jednym miejscu ułatwiłoby zrozumienie treści.

Na stronie 10 Doktorantka podaje, że: „*Celem przedstawionej pracy jest opracowanie metody analizy skanów 4D...*”. Takie metody istnieją, o czym można choćby przeczytać na tej samej stronie w „*Motywacji*”. Lepiej było napisać o opracowaniu: „*nowej*”, „*ulepszonej*”, bądź „*alternatywnej*” metody.

Na tej samej stronie w wymaganiach dla opracowywanych metod znaleźć można informację, że powinny one „*odzworowywać geometrię z dokładności większą niż pięciokrotność średniej odległości pomiędzy punktami wejściowego skany*”. W pracy nie można jednak znaleźć informacji dlaczego przyjęto takie kryterium, natomiast jest ono z powodzeniem weryfikowane podczas walidacji algorytmów.

Na stronie 11 Autorka prezentuje zdjęcie kamery FLIR. Myślę, że zamiast podawać w tym miejscu adres źródła, tj. strony internetowej, lepiej było podać to jako przypis literaturowy, a adres ten umieścić w bibliografii.

Na stronie 12 można znaleźć informację „*...uzyskanie obrazu 2D obserwowanego obiektu z dużą rozdzielczością czasową...*”. Czy nie lepiej było nazwać ten parametr częstotliwością rejestracji / obserwacji? Dalej w tym samym fragmencie pracy pojawia się informacja „*... zaletą tych urządzeń cyfrowych jest niski koszt i stosunkowo duża rozdzielczość obrazu*”. Szkoda, że Doktorantka nie podała przybliżonego zakresu tej rozdzielczości.

Na rysunku 3 (str. 13) przedstawiono schemat zasady działania skanera światła strukturalnego. Rysunek ten powinien być przetłumaczony na język polski. Wskazane byłoby również jego powiększenie, gdyż w obecnej postaci nie jest w pełni czytelny. Uwaga ta dotyczy również rysunku 4, a w zakresie czytelności rysunków: 11, 12 i 16.

Na stronie 13 Autorka podaje informację, iż skanery światła strukturalnego cechuje – „*duża rozdzielczość pomiarowa oraz duża dokładność, skan z pojedynczego kierunku może zawierać nawet do 100 tysięcy punktów pomiarowych, a dokładność sięga 0,5 mm*”. Myślę, że należało dodać, że wymagania te dotyczą skanerów do pomiaru ludzkiego ciała lub pomiarów w określonym reżimie czasowym. W

---

praktyce pomiarowej / przemysłowej skanery pracujące w oparciu o światło strukturalne cechują się dużo korzystniejszymi parametrami.

Na stronie 16 Autorka napisała: „Mając danych kilka kamer o znanych pozycjach, orientacjach oraz ich ostrosłupach widoku, część wspólna ostrosłupów widoku określa przestrzeń zajmowaną przez obiekt”. Myślę, że raczej powinno się mówić o „przestrzeni obserwacji” lub „przestrzeni pomiarowej”, gdyż obiekt może być mniejszy, niż zdolność pomiarowa systemu. Dalej na tej samej stronie czytamy: „W tej metodzie przestrzeń, w którym można znajdować się obiekt, jest dzielona na siatkę za pomocą promieni skierowanych w 3 kierunkach (zgodnie z osiami).” Autorka nie definiuje jednak ww. osi oraz ich położenia.

Na stronie 18 Doktorantka podaje, że „Każda gałąź w drzewie może mieć dowolną głębokość, przez co transformacja danego węzła z układu modelu do układu świata stanowi złożenie transformacji węzłów pośrednich”. W świetle wcześniejszych zapisów korzystniej byłoby „układ świata” nazwać „układem głównym”.

Na stronie 25 / rozdział 2.4 Autorka w pierwszym zdaniu przywołuje szereg pozycji literaturowych. Lepszym rozwiązaniem byłoby powołanie się na poszczególne pozycje w treści rozdziału adekwatnie do źródeł. Osobną sprawą jest kwestia edycyjna, jeśli pozostajemy przy takiej prezentacji, to literatura powinna być przywołana w kolejności [6,7,8,71,83-91], a nie chaotycznie tj. [6,7,89-91,8,71,83-88].

Na rysunku 12 (str. 33) przedstawiono śledzenie pozy szkieletu animacyjnego. Czy dla danych „ramka ( $t+1$ )” nie powinna odbyć się również segmentacja danych jak dla „ramki ( $t$ )”? Jaki wpływ na wynik tego procesu ma zmienność kształtu ludzkiego ciała wynikająca choćby z napięcia mięśni podczas ruchu?

Na stronie 34 Doktorantka podaje, że stosuje „...filtrację medianową w celu uzupełnienia nieprzypisanych wierzchołków...”. Warto by dodać komentarz dlaczego zdecydowano się na taką metodę filtracji.

Na stronie 48 Autorka przedstawia dwa zestawy danych użytych do ewaluacji. Szkoda, że nie dodano komentarza dlaczego wybrano właśnie te sekwencje pochodzące ze skanowania przestrzennego.

Na rysunkach 32 i 34 graficznie przedstawiono efekty działania poszczególnych metod rekonstrukcji. Uważam, że bardziej właściwe byłoby zachowanie chronologii i jako pierwszego od lewej przedstawienie zbioru wejściowego, do którego odnoszą się pozostałe wyniki. Obrazy te można było przedstawić w powiększeniu, gdyż nie łatwo jest dostrzec niektóre istotne szczegóły. Ponadto można było spróbować pokazać ww. różnice np. w postaci kolorowych map odchyłek, co ułatwiłoby dostrzeżenie zalet i wad poszczególnych z nich.

Na stronie 59 Doktorantka wspomina, iż opracowana metoda „...zapewnia prawie dwukrotnie mniejszy błąd rekonstrukcji...”. Można było to stwierdzenie wzbogacić o informacje na temat źródeł powstawania błędów rekonstrukcji. Jak silny wpływ ma kształt obiektu np. promienie krzywizn, jaka jest możliwość odtworzenia niewielkich obiektów, czy i jaki jest wpływ dynamiki jego ruchu? W tym przypadku cenną informacją byłyby nie tylko wartości obrazujące zmiany globalne odnoszone do całych ujęć wyrażonych liczbowo, ale również zmiany wynikające z rekonstrukcji poszczególnych fragmentów rekonstruowanego obiektu pokazujące ich rozkład na obiekcie.

W dysertacji znalazły się również drobne błędy gramatyczne i edycyjne nie wpływające negatywnie na jej treść. Dla porządku wymieniam kilka przykładów:

- Na str. 3 Autorka używa słowa „kontrybucja”, co w kontekście zdania jest kalką z języka angielskiego „contribute”. Lepiej było napisać po polsku „wnosi wkład” lub „przyczynia się”.
- Na tej samej stronie podaje, iż stosowana jest „metoda Iteracyjnego Najbliższego Punktu”. Lepiej byłoby ją nazwać metodą „Najbliższego Punktu Iteracyjnego”.
- Na stronie 7 w tłumaczeniu „average minimum distance” podano „...średnia odległość między punktami...”, a powinno być „...średnia minimalna odległość...”.
- Na str. 11 Autorka podaje, iż „...przedyskutowano wyniki wizualne...”. Raczej mówi się o wynikach graficznych / przedstawionych graficznie lub wizualizacji wyników.
- Na str. 16 – zapisano: „W tej metodzie przestrzeń, w którym może znajdować się...” – powinno być: „W tej metodzie przestrzeń, w której może znajdować się...”.
- Na str. 26 – we fragmencie „... dopasowania walca do fragmentu skanu pomocą analizy...” brakuje słowa „za”.
- Na str. 43 (rys. 20) zapisano „...dla segment lewego ramienia...”, a powinno być „...dla segmentu lewego ramienia...”.
- Na str. 47 – sekwencje pomiarowe nazwano „jumping jacks” i „punching” – można było użyć polskich określeń „pajacyk” i „cios” lub „bicie”.
- Na str. 49 – powołano się dwukrotnie na rozdział 3.2.2. W pierwszym przypadku powinien być to rozdział 3.2.1.
- Podpisy tabel zawartych w tekście powinny być umieszczone nad tabelą.

W pracy Autorka używa również wielu angielskojęzycznych nazw. Niektóre z nich tłumaczy. Można było pokusić się o opracowanie polskich wersji poszczególnych określeń. Jednak ze względu na nowość materii, w której porusza się Doktorantka i jej ogólnościowy zasięg takie podejście do poszczególnych określeń można uznać za uzasadnione.

Oceniając stronę edytorską analizowanej pracy należy podkreślić, że jest ona napisana starannie, 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. Pewien niedosyt jednak pozostawia strona graficzna pracy, gdyż całość została napisana czcionką o jednakowej wielkości. Utrudnia to odszukanie poszczególnych rozdziałów i podrozdziałów pracy.

#### 4. Wnioski

Mimo uwag krytycznych i zasygnalizowanych problemów ujętych w niniejszej recenzji stwierdzam, że Autorka przedstawiła koncepcję naukową, co dowodzi, że opanowała podstawy metodologii i metodyki pracy badawczej, niezbędne do prowadzenia badań. Oceniana praca jest dziełem zawierającym szereg informacji na temat systemów pomiarowych umożliwiających skanowanie obiektów w technice 4D oraz metod analizy takich danych pomiarowych. Opracowane zostały dwie autorskie metody mapowania przez uśrednianie oraz mapowania z aproksymacją RBF. Ponadto Autorka potwierdziła ich poprawność prowadząc stosowną walidację odnosząc wyniki do uznanej za referencyjną metody D-Faust. Właściwe ułożenie treści,

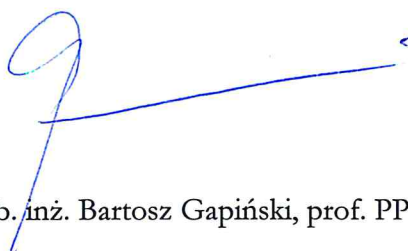


---

podział poszczególnych rozdziałów, a także bogaty i ciekawy materiał graficzny powodują, iż dysertacja napisana jest w sposób czytelny. Uporządkowanie i analiza szeregu zagadnień obejmujących podjęty temat, mimo zawartych wyżej uwag, dowodzą, iż Pani mgr inż. Marta NOWAK opanowała szeroki zakres wiedzy w sposób, który umożliwia korzystanie z niej we właściwy sposób i pozwoli na rozwijanie własnej 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.

## 5. Podsumowanie

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Marta Natalii NOWAK.: „*Metoda analizy danych pomiarowych reprezentujących geometrię ciała człowieka w ruchu do zastosowań w animacji trójwymiarowej*”, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. z 2017, poz. 1789 t.j. ze zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony.



dr hab. inż. Bartosz Gapiński, prof. PP