

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. Piotra FORYSIA pt.**

***METODA AUTOMATYCZNEJ REKONSTRUKCJI
TRÓJWYMIAROWEJ GEOMETRII OBIEKTU DZIEDZICTWA
KULTUROWEGO NA PODSTAWIE WIELU POMIARÓW
KIERUNKOWYCH***

Promotor: prof. dr hab. inż. Robert SITNIK

Promotor pomocniczy: dr inż. Jakub MARKIEWICZ

Podstawa opracowania recenzji:

Pismo Dziekana Wydziału Mechatroniki PW, prof. dr. hab. inż. Gerarda CYBULSKIGO nr WMt.521.8/2023 ws. powołania dr. hab. inż. Bartosza GAPIŃSKIEGO, prof. uczelni na recenzenta w przewodzie doktorskim mgr. inż. Piotra FORYSIA procedowanego przez Radę Naukową Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej.

1. Wprowadzenie

Dzisiejszy świat rozwija się w zawrotnym tempie. Przyczynia się do tego wiele zdobyczy techniki umożliwiając lub ułatwiając realizację coraz to nowych wyzwań. Jednocześnie w wielu przypadkach informacje opisujące przeszłość, jak i teraźniejszość otaczającego nas świata pozwalają na nowo spojrzeć na dokonania człowieka. Zachowanie wiedzy na temat historii osobistej (rodzinnej), czy narodowej pozwala na zrozumienie, bądź wytłumaczenie zjawisk, czy choćby relacji międzyludzkich. Podobnie jest z dobrami materialnymi. Wiedza na ich temat pozwala z

jednej strony na zrozumienie naszych przodków i sposobu ich funkcjonowania, z drugiej daje możliwość zachowania ich dziedzictwa, a z trzeciej wpływa na rozwój tego co tworzymy obecnie.

Działania człowieka w tym obszarze można znaleźć na każdym etapie historii, przywołując choćby obrazy XVIII-wiecznej Warszawy pędzla Bernardo Bellotto zwanego Canalettem. Pozwoliły one na odbudowę stolicy po zniszczeniach wojennych. Podobne prace podejmowane są również obecnie i obejmują szeroko pojętą digitalizację dzieł sztuki stanowiących dziedzictwo kulturowe świata. W zależności do potrzeb stosowana jest fotografia, ale coraz częściej rejestracji dokonuje się w układzie trójwymiarowym z zastosowaniem różnego typu skanerów pomiarowych, bądź tomografów komputerowych.

Równolegle z rozwojem techniki rosną możliwości urządzeń pomiarowych. Pozwala to na poprawę rozdzielczości i wychwytywanie szczegółów, które jeszcze do niedawna byłyby niemożliwe do rejestracji zarówno w zakresie struktury geometrycznej powierzchni lub kolorów, ale również budowy wewnętrznej elementów. Implikuje to kolejne wyzwania, gdyż powstające w ten sposób duże zbiory danych, wymagają odpowiednich mocy obliczeniowej komputerów, co niejednokrotnie i tak przekłada się na znaczny wzrost czasu niezbędnego do realizacji procesów obliczeniowych. Jest to szczególnie zauważalne, gdy ocenie należy poddać wiele obiektów, bądź obiekt opisany jest zbiorem ujęć pomiarowych. W tym obszarze nieustannie trwają prace nad zastąpieniem człowieka zarówno w zakresie akwizycji, jak i obróbki danych. Podejmowane są również próby z użyciem sztucznej inteligencji, czy uczenia maszynowego. Jednak procesy te wymagają zbiorów uczących, które są trudne do pozyskania dla jednostkowych obiektów, jakimi m.in. w większości przypadków są obiekty dziedzictwa narodowego.

Biorąc pod uwagę powyższe czynniki należy stwierdzić, że podjęta przez Pana mgr. inż. Piotra FORYSIA tematyka, związana z opracowaniem metody automatycznej rekonstrukcji trójwymiarowej geometrii obiektu jest aktualna zarówno pod względem naukowym, jak i użytecznym. Należy również podkreślić, iż podjęte zadanie zostało zrealizowane w oparciu o dane uzyskane z pomiarów bardzo specyficznego i istotnego dla naszego kraju obiektu dziedzictwa narodowego, jakim jest Pałac Króla Jana III w Wilanowie. Dodatkowo należy podkreślić, iż efekty rozprawy doktorskiej mogą być z powodzeniem rozpowszechniane i wdrażane zarówno w badaniach naukowych, jak i w aplikacjach komercyjnych.

2. Układ i obszar merytoryczny rozprawy

Recenzowana dysertacja liczy 123 strony i składa się z 9 rozdziałów. Poprzedzają je nienumerowane streszczenia w języku polskim i angielskim, tabela skrótów i pojęć oraz spis treści. Właściwa część rozprawy zawiera następujące elementy:

Rozdział 1 – *Wstęp* – Autor zaprezentował w tym rozdziale motywację do podjęcia tematu niniejszej rozprawy, przedstawił założenia oraz cele pracy dzieląc je na część naukową oraz użyteczną. Zaprezentował również skrótowo układ pracy.

Rozdział 2 – *Przegląd istniejących rozwiązań* – mgr inż. Piotr FORYŚ szeroko scharakteryzował metody łączenia chmur punktów oparte na cechach charakterystycznych, iteracji oraz głębokim

uczeniu. Zawarł również podsumowanie zawierające tabele zestawieniowe pozwalające na porównanie poszczególnych algorytmów.

Rozdział 3 – *Charakterystyka danych wejściowych* – zgodnie z tytułem rozdziału Doktorant zaprezentował przedmiot badań stanowiący źródło analizowanych danych i opracowanych algorytmów, jakim są pomieszczenia Pałacu Króla Jana III w Wilanowie. Scharakteryzował użyty system pomiarowy oraz dane pomiarowe stanowiące podstawę realizacji badań w dysertacji.

Rozdział 4 – *Koncepcja* – w rozdziale tym Autor przedstawił zgodnie z tytułem ideę opracowanego procesu orientacji chmur punktów – FAMFR – Fast Adaptive Multimodal Feature Registration.

Rozdział 5 – *Implementacja* – zawiera opis podjętych przez Pana mgr. inż. Piotra FORYSIA prac związanych z realizacją kolejnych kroków prowadzących do implementacji metody FAMFR. Przedstawił środowisko implantacji, zasady wyznaczania punktów charakterystycznych oraz korespondencji pozwalających na łączenie chmur punktów. Scharakteryzował również parametry wejściowe do algorytmów.

Rozdział 6 – *Ocena skuteczności metody FAMFR* – jak wskazuje tytuł rozdział zawiera kryteria oceny algorytmu, plan eksperymentu oraz uzyskane wyniki.

Rozdział 7 – *Dyskusja* – zawiera dyskusję nad uzyskanymi wynikami i ich krytyczną analizę.

Rozdział 8 – *Podsumowanie* – Doktorant podsumował swoją pracę opisując poziom realizacji celów w obszarze naukowym i utylitarnym. Podał również dalsze potencjalne obszary zastosowań opracowanej metody i kolejne plany badawcze.

Rozdział 9 – *Bibliografia* – obejmuje 202 publikacje zacytowane w recenzowanej dysertacji. Wśród nich znajdują się 2 publikacje, których współautorem jest Doktorant.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Oceniana dysertacja jest interesującym opracowaniem zawierającym szereg informacji na temat metod stosowanych w analizie danych będących efektem skanowania przestrzennego. Autor szeroko scharakteryzował stosowane obecnie metody, pokazując ich wady i zalety. Na tym tle możliwa była prezentacja własnego opracowania, jakim jest metoda szybkiej adaptacyjnej rejestracji cech multimodalnych – w skrócie z angielskiego FAMFR. Pomimo szeregu podobnych algorytmów, zaproponowane rozwiązanie wypełnia pewną lukę oferując kompilację metod łączenia chmur punktów opartych na gradiencie intensywności oraz zależności geometrycznej między sąsiadującymi punktami, a ich wektorami normlanymi. Pozwoliło to na znaczącą poprawę efektywności procesu łączenia chmur punktów. Dzięki temu możliwa jest również istotne ograniczenie udziału człowieka w procesach obliczeniowych.

Przedstawiona treść rozprawy doktorskiej pozwala pozytywnie ocenić wiedzę i doświadczenie Autora utwierdzając czytającego w przekonaniu, iż posiada On odpowiednie kompetencje do realizacji podjętego tematu. Pozwoliło to również Doktorantowi na sformułowanie końcowego wniosku o poprawności zrealizowanych prac i słuszności założeń podjętych przy opracowywaniu metody FAMFR. Autor przedstawił krytyczną analizę osiągniętych



rezultatów, co świadczy o Jego dojrzałości naukowej i należy oceniać pozytywnie. Analizując założenia ocenianej rozprawy doktorskiej, wyrażone w postaci celu naukowego i użytecznego można stwierdzić, iż zostały one przez Doktoranta zrealizowane. Opracowano metodę łączenia chmur punktów bazującą na cechach geometrycznych oraz intensywności wyznaczonej na bazie koloru obiektu. Poddano ją weryfikacji, co potwierdziło spełnienie przyjętych założeń adekwatnych do procesu digitalizacji obiektu dziedzictwa narodowego. Założenia te dotyczyły zarówno parametrów dokładnościowych, jak i możliwości obsługi dużej liczby chmur punktów. Potwierdzono również znaczne skrócenie czasu łączenia chmur względem prac wykonywanych manualnie.

W przedstawionej do oceny rozprawie doktorskiej Pan mgr inż. Piotr FORYŚ przedstawił bardzo szeroki i dogłębny przegląd literatury, przywołując odpowiednie pozycje we właściwych miejscach treści rozprawy. Pozwoliło to na poprawne przedstawienie poszczególnych zagadnień i dowodzi znajomości podjętej materii. Wszystkie te aspekty niewątpliwie potwierdzają możliwości i umiejętności Autora do prowadzenia badań naukowych i formułowania właściwych wniosków z nich płynących. Jednak pomimo wysokiego poziomu omawianej pracy i jej ogólnego pozytywnego odbioru wskazać można pewne fragmenty i sformułowania, które poniżej prezentuję bardziej szczegółowo w postaci uwag krytycznych i polemicznych:

- Str. 11 – Doktorant używa określenia „*wysokiej jakości wizualizacji i dokumentacji obiektów*”. Brakuje w moim odczuciu określenia choćby zgrubnie granicy tej „*wysokiej jakości*”, a samo stwierdzenie można spotkać również na kolejnych stronach rozprawy.
- Str. 12 – Autor napisał, iż „*jednym z rezultatów skanowania 3D jest możliwość generowania chmury punktów*”. Zastanawiam się, jaki jeszcze może być bezpośredni rezultat rozpatrywanych procesów skanowania, gdyż dalsza obróbka danych jest pochodną digitalizacji, czyli skanowania.
- Str. 16 – prezentując cele naukowe Autor podaje dla poszczególnych parametrów wartości graniczne jakie chciałby uzyskać. Brakuje jednak w mojej ocenie informacji na jakiej podstawie i dlaczego przyjęto takie właśnie wartości.
- Str. 19 / rozdział 2.1.1 – nasuwa się pytanie, czy rozważano wprowadzenie dodatkowych zewnętrznych znaczników pozwalających na efektywne (bardziej efektywne) łączenie chmur punktów?
- Str. 44 / rozdział 2.2 – Autor pisze iż „*Wybór odpowiedniej metody łączenia chmur punktów ma kluczowe znaczenie dla osiągnięcia optymalnej wydajności procesu.*” Brakuje jednak podania informacji nt. kryterium / kryteriów jakie Doktorant przyjmuje za kierunki optymalizacji, np. minimalny czas, graniczna dokładność dopasowania, a może ich połączenie?
- Str. 45 – podano, iż „... błąd dopasowań ... losowo próbkowanych punktów niższy niż 0,2 [m].” Czy 0,2 m to poprawna wartość? Wypadałoby ją również odnieść do wymiarów powierzchniowych łączonych chmur punktów lub oczekiwanej dokładności dopasowania.
- Str. 48 – opisując tabelę 6 Pan Piotr Foryś podaje, że zestawiał metody, dla których zostały osiągnięte „*bardzo dobre wyniki*”. Jednak parametr „Registration Recal” wynosi 1,61% oraz 3,22% dla dwóch parametrów, 35,9% dla jednego parametru oraz powyżej 85% dla 4 parametrów. Zastanawiające jest czy tak znaczące różnice wartości odpowiadają ww. „*bardzo dobrym wynikom*”.

- Str. 50-52 – Autor zaprezentował zdjęcia skanowanych pomieszczeń obrazujące zbiory danych pomiarowych. Czy badania obejmowały lub mogłyby obejmować również sufity poszczególnych sal?
- Str. 53 – prezentując stosowany do badań system pomiarowy Doktorant nie podał żadnych jego parametrów metrologicznych. Jediną informacją techniczną jest maksymalna wysokość robocza wynosząca 5,5 m i ogólny opis układu oświetlającego.
- Str. 54 – Autor podaje, iż błąd geometryczny chmury punktów nie przekracza 0,05 mm. Warto by zdefiniować jak rozumie się ww. błąd.
- Str. 61 – Pan mgr inż. Piotr FORYŚ podał, że wcześniejsze prace których był współautorem, pozwoliły na znaczące skrócenie czasu składania dużych chmur punktów. Warto by podać, choćby zgrubnie, jak duże to były oszczędności czasowe.
- Str. 64 – czy Doktorant jest współautorem oprogramowania FRAMES? Jeśli tak warto by ten fakt pozytywnie zaznaczyć.
- Str. 75 – podano, iż wartość parametry H_b wyznaczono eksperymentalnie i wartość ta wynosi 18. Szkoda, że Autor nie podał jak dokonał określenia tej wartości.
- Str. 76 / rys. 33 – przedstawiono wizualizację dla parametru R_n . Brakuje opisu czemu odpowiadają poszczególne kolorowe wartości przedstawione na rysunkach. Ponadto, jeśli ustalono że $R_n = 7,7 * D_{avg} \approx 5 \text{ mm}$, to wartości przedstawione na ww. rysunku powinny również obrazować, co dzieje się dla wartości $R_n > 5 \text{ mm}$.
- Str. 76-77 – Doktorant prezentuje parametr $K_d = 7,7 * D_{avg} \approx 5 \text{ mm}$. Ma on zatem tę samą wartość i zapis matematyczny jak przedstawiony na str. 76 parametr R_n . Zachodzi zatem pytanie, czy R_n to to samo co K_d i czy jest potrzeba stosowania dwóch tożsamy parametrów? W tym kontekście zastanawiające jest również opisanie jako $K_d * D_{avg}$ na osi odciętych wykresu na rysunku 34. Czy nie powinien to być jedynie parametr K_d ? Podobne pytanie można zadać dla osi odciętych na rysunkach 36 i 37 – czy nie powinno tam być jedynie parametrów H_s i H_g ?
- Str. 85-87 / tab. 9-14 – brakuje omówienia przedstawionych wyników. Na przykład z czego wynika tak znacząca różnica wartość parametru $Recall_C$ (%) lub $RMSE$ względem wartości referencyjnej dla większości innych metod niż opracowana FAMFR. Szkoda również, iż informacje dotyczące czasu podano jedynie dla wartości uśrednionych, gdyż czas wykonania zadania jest jednym z kluczowych parametrów.
- Str. 88 – podano, iż „Jednym ze źródeł błędów jest mała powierzchnia części wspólnej chmur punktów ...”. Warto byłoby jednak wspomnieć jak „małe” są to powierzchnie np. wyrażone w procentach względem ocenianego fragmentu. Może celowe byłoby tworzenie większych „zakładek”?
- Str. 89 / rys. 41 – czy zaznaczone na rysunku wartości gradientów odpowiadają refleksyjności? Może jest to sposób na jej lokalizację i eliminację (odfiltrowanie) z procesu łączenia?
- Str. 90 / rys. 43 – przedstawiono szum pomiarowy napotkany podczas łączenia chmur punktów. Szkoda, że autor nie zaznaczył tych obszarów. Można się jedynie domyslać, że obejmują one brakujące fragmenty ilustracji. W praktyce jednak szum zaburza dane pomiarowe, a nie je eliminuje. Zatem dane powinny być widoczne i charakteryzować się np. znacznie gorszą

jakością. Drugim rozwiązaniem było pokazanie danych obarczonych szumem, a następnie danych po eliminacji tych obszarów.

Podczas opracowania niniejszej dysertacji Doktorant nie ustrzegł się także pewnych błędów edycyjnych i językowych. Przytaczam dla porządku kilka przykładów niezręczności językowych, jakie znalazły się w treści rozprawy:

- Str. 3 w zdaniu „...poprzącz...porównywanie histogramów wybierane są najlepsze korespondencje oraz wyznaczane jest wstępne dopasowanie.” – myślę, że lepiej byłoby w miejsce słowa „korespondencje” użyć słowa „relacje”. Dotyczy to terminologii stosowanej w całej treści rozprawy.
- Str. 5-8 zawierają tabelę skrótów i pojęć. Powinna ona być uporządkowana alfabetycznie wg. skrótu, co znacząco przyspieszyłoby poszukiwanie informacji. Ponadto szkoda, że Autor nie zawarł tłumaczenia pojęć na język polski. Szczególnie jeśli określenia nie funkcjonują w języku ojczystym, można by zaproponować swoją wersję, co byłoby dodatkową korzyścią naukową i utylitarną. W wykazie skrótów wskazane byłoby również umieszczenie stosowanych przez Autora parametrów np. D_{avg} , H_s , H_g itp.
- Str. 11 w zdaniu „Dzięki chmurom punktów 3D możliwe jest tworzenie precyzyjnych rekonstrukcji modeli obiektów, które znacząco ułatwiają analizę ich kształtu, struktury oraz przeprowadzenie wirtualnych pomiarów.” – myślę, że lepiej byłoby napisać „...możliwe jest tworzenie precyzyjnych modeli cyfrowych obiektów...”. Ponadto stwierdzenie „...przeprowadzenie wirtualnych pomiarów.” jest nie do końca poprawne, gdyż pomiar został już zrealizowany w trakcie digitalizacji. Natomiast analiza i obróbka tych danych pomiarowych pozwala na uzyskanie wyników, co jest standardowym działaniem we współrzędnościowej technice pomiarowej.
- Str. 16 w zdaniu „...do opracowania efektywnego i szybkiego procesu do łączenia dużej ilości...” – wyraz „do” jest niepotrzebny.
- Str. 21 / rys. 6 – treść powinna być po polsku, lub przydałoby się dodanie autorskiego tłumaczenia.
- Str. 29 w zdaniu „Coraz to nowsze rozwiązania dobrze radzą sobie również w przypadku...zmiennymi warunkami oświetleniowymi...” lepiej byłoby napisać „...ze zmiennymi warunkami oświetleniowymi...”, bądź „...zmiennych warunków oświetleniowych...”.
- Str. 37 w zdaniu „YOHO ... jest nowatorska metodologia do łączenia chmur punktów...” – słowo „metodologia” jest użyte niepoprawnie, gdyż jest to „nauka o metodach badań naukowych, ich skuteczności i wartości poznawczej”. Wystarczyło powiedzieć „metoda”.
- Str. 44 w zdaniu „Dopiero nowsze publikacje starają się uwzględnić...” – niewłaściwe jest personifikowanie publikacji, bo to ich autorzy „się starają” ...
- Str. 72 – napisano „Wartości promieniu są wyznaczone...” powinno być „promienia” lub „promieni”.
- Rys. 34-37 – opisy osi wykresów powinny być przetłumaczone na język polski.
- Str. 81 – napisano „Problem oszacowania oceny poprawnego ...”. Wystarczyłoby napisać „Problem oszacowania poprawnego ...” lub „Problem oceny poprawnego ...”

Ponadto w zakresie uwag edycyjnych dla całej rozprawy warto zwrócić uwagę, iż nazwy tabel zwyczajowo podaje się nad, a nie pod taką tabelą. Równie ważne jest unikanie tzw. tekstów wiszących, co ma miejsce praktycznie na początku każdego rozdziału.

Pewien niedosyt budzi również strona edycyjna i graficzna rozprawy. W wielu przypadkach wskazane byłoby umieszczenie większych ilustracji, bądź pokazanie fragmentów w powiększeniu. Praca dotyczy w pewnym ujęciu analizy obrazów, a zatem byłoby to szczególnie cenne. Ponadto można było w sposób ładniejszy graficznie wyróżnić poszczególne rozdziały i podrozdziały lub istotne fragmenty pracy. Takim przykładem może być opis poszczególnych parametrów w rozdziale 5.6.

Podsumowując jednak można stwierdzić, iż wskazane drobne błędy gramatyczne i edycyjne nie wpływają negatywnie na jej treść. Jest ona napisana starannie, poprawnym językiem polskim. Zawarte w pracy rysunki obrazują zagadnienia związane z prezentowanymi treściami, przeprowadzonymi badaniami oraz uzyskanymi wynikami stanowiąc ich odpowiednie uzupełnienie.

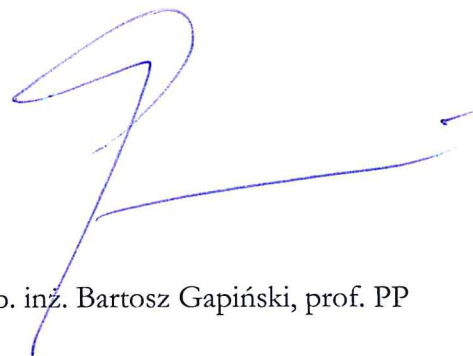
4. Wnioski

Mimo uwag krytycznych i zasygnalizowanych problemów ujętych w niniejszej recenzji stwierdzam, że Autor przedstawił koncepcję naukową, co dowodzi, że opanował podstawy metodologii i metodyki pracy badawczej, niezbędne do prowadzenia badań. Oceniana praca jest dziełem zawierającym szereg informacji na temat analizy chmur punktów będących efektem skanowania. Obróbka danych pomiarowych jest praktycznie nieodzowną częścią procesu pomiarowego. Możliwość skrócenia czasu analizy i wspomaganie lub zastąpienie operatora są niezmiernie cennymi efektami takich prac. Jest to szczególnie istotnie w obecnych czasach, gdy pozyskiwane są bardzo duże zbiory informacji, a ich rozdzielczość niejednokrotnie jest na tyle wysoka, iż zdolności percepcji ludzkiej nie są wystarczające. Z tych powodów opracowaną metodę FAMFR należy uznać za cenną i mającą wpływ na rozwój w różnych dziedzinach życia.

Należy również podkreślić, iż przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgra inż. Piotra FORYSIA cechuje się właściwym ułożeniem treści oraz bogatym materiałem graficznym. Dowodzi to, iż Doktorant opanował szeroki zakres wiedzy w sposób, który umożliwia mu korzystanie z niej we właściwy sposób i pozwoli na dalsze rozwijanie własnej dalszej działalności badawczej. Podjęta tematyka badawcza jest żywa i aktualna. 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 Pana mgr inż. Piotra FORYSIA pt.: „*Metoda automatycznej rekonstrukcji trójwymiarowej geometrii obiektu dziedzictwa kulturowego na podstawie wielu pomiarów kierunkowych*”, spełnia wymagania ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym (Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 t.j. ze zm.) i może być dopuszczona do publicznej obrony.



dr hab. inż. Bartosz Gapiński, prof. PP