

Wrocław 30.08.2023

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. Pawła Liberadzkiego

pt.: „Wielokierunkowy system do pomiaru geometrii człowieka w ruchu z zastosowaniem metody z oświetleniem strukturalnym”

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Liberadzkiego pt.: „Wielokierunkowy system do pomiaru geometrii człowieka w ruchu z zastosowaniem metody z oświetleniem strukturalnym”, 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 (numer pisma WMŁ.521.3.2023).

1. Obszar problemowy rozprawy

Mimo rosnącej powszechności skanowania przestrzennego 3D, jego aplikacja do skanowania dynamicznego postaci ludzkich, a nawet wspomagania procesów rehabilitacji pacjentów pozostaje ciągle wyzwaniem badawczo-rozwojowym. Problem wysokorozdzielczej, wielokierunkowej szybkiej digitalizacji nie sprowadza się wyłącznie do wydajnej techniki akwizycji i szybkiego przetwarzania danych. Istotną trudność digitalizacji wynika z dużej zmienności geometrycznej i teksturalnej powierzchni obiektu. Chcąc uniknąć potrzeby specjalnego przygotowania obiektów, poprzez nanoszenie znaczników czy normalizację refleksyjności powierzchni, np. poprzez specjalne pokrycia (spraye), konieczne jest posiadanie odpornych i wydajnych algorytmów przetwarzania danych obrazowych i rekonstrukcji modeli 3D. Ponadto, aby takie wyznaczone modele przestrzenne miały przydatność metrologiczną niezbędne jest rozwiązanie zagadnień kalibracji w różnych konfiguracjach układów współrzędnych oraz walidacja.

W takim kontekście, podjęcie badań przez Pana mgr inż. Pawła Liberadzkiego, nad opracowaniem wielokierunkowego systemu do pomiaru geometrii ciała człowieka w ruchu z zastosowaniem metody z oświetleniem strukturalnym - uważam za aktualne i istotne, z punktu widzenia poznawczego i aplikacyjnego. Badania prowadzone w tym zakresie wymagają interdyscyplinarnej wiedzy i umiejętności optomechatronicznych ze szczególnym rozumieniem informatycznych aspektów przetwarzania i analizy obrazów.



2. Kompozycja i treść rozprawy

Dysertacja obejmuje 98 stron, podzielona jest na 10 rozdziałów, na początku pracy zamieszczono słownik podstawowych pojęć i skrótów, bibliografia to 67 pozycje.

We „**Wstępie**” Autor przedstawia motywację do podjęcia pracy badawczej. Wskazuje, że digitalizacja obiektów dynamicznych i ich powierzchni jest obciążona dużą pracochłonnością i kosztochłonnością. Dostępne bowiem metody i urządzenia nie dostarczają dostatecznych jakościowo wyników. Wskazuje na dwa głównie obszary aplikacji: multimedia i rzeczywistość wirtualną oraz medycyną i rehabilitację. Powszechnie stosowane systemy „*motion capture*”, ze względu na swoje ograniczenia nie wspierają dostatecznie identyfikacji źródeł problemów o deformacjach i niesymetrycznościach ciała ludzkiego. Opracowanie dedykowanego systemu digitalizacji umożliwi monitorowanie, a nawet optymalizację procesu terapeutycznego.

Na podstawie przedstawionego kontekstu Autor formułuje cel pracy, uszczegóławia ilościowo przyjęte kryteria oraz definiuje badawcze cele szczegółowe. Znajdujemy tu również syntetyczne omówienie układu pracy i zawartości poszczególnych rozdziałów.

W rozdziale 2 przedstawiono „**Przegląd aktualnych rozwiązań i metod**” skanowania przestrzennego. Wśród najistotniejszych sposobów przeanalizowano: metodę „struktura z ruchu” SfM (*Structure From Motion*), metodę „kształt z konturu” SfS (*Shape from Silhouette*) oraz metodę „światła strukturalnego” SL (*Structured Light*). Autor rozważył możliwości i ograniczenia rozwiązań komercyjnych, takich jak: Microsoft Mixed Reality Capture Studio, Volucap, Human Engine oraz MOve4D. Dodatkowo ocenił sensory głębi, wraz z najpopularniejszymi niskocennymi przykładami rynku masowego Kinect f. Microsoft. Wyniki wraz z oceną przedstawił w formie tabelarycznego porównania (Tabela 1) z którego wynika, że dostępne rozwiązania nie spełniają oczekiwanych wymagań, zaś rozwój autorskiego systemu powinien bazować na metodzie światła strukturalnego.

W rozdziale 3 znajdujemy opis koncepcji rozwiązania. Obejmuje ona diagram architektury systemu, koncepcję modułu kierunkowego oraz diagram przetwarzania danych obrazowych z pojedynczego modułu kierunkowego.

Rozdział 4 zatytułowano „**Implementacja 4DBody**”. Zawiera on opis opracowanego systemu skanującego, tj. jego konstrukcji wraz z symulacyjną analizą poprawności oświetlenia ciała człowieka. W opracowaniu rozwiązano problem wzajemnego zakłócania jednoczesnej wielokierunkowej akwizycji poprzez zastosowanie separacji widmowej. System generowania świetlnych wzorców strukturalnych zaprojektowano na bazie macierzy FPGA. Generatory te wraz z kamerami sterowanie są poprzez węzły AVR co zapewnia wymagania czasu rzeczywistego. Akwizycja dużych strumieni danych (nawet 16GB/s) i ich przetwarzanie off-line realizowane są na komputerach klasy. Obok elastyczności stanowiska, rozwiązano również problem zakłóceń od światła zewnętrznego. Następnie, znajdujemy szczegółowe opisy dwóch najistotniejszych opracowanych modułów rekonstrukcji powierzchni oraz kalibracji wyników pomiarowych. Rozwiązanie w ramach niniejszej pracy jest rozwinięciem metody Sitnika [2009], gdzie zachowano ciągły cykliczny rozkład intensywności w rastrze, ale opracowano nowy rodzaj markera. Marker ten jest bazą w procesie uciągania fazy, stąd fundamentalnie decyduje skuteczności i odporności metody rekonstrukcji. Opracowane rozwiązanie detekcji markera bazuje na widmowej analizie obrazu, co radykalnie poprawia czułość metody detekcji i poprawność pozycjonowania. W kolejnym z etapów przetwarzania, opracowano algorytm SCPS (*Spatial-Carrier-Phase-Shifting*) wyznaczania rozkładu fazy modulo- 2π , bazujący na siedmiopunktowym podparciu. Wskazano, że takie rozwiązanie jest optymalne wg kryterium minimalizacji podatności na zakłócenia i częstotliwości wzorca przestrzennego. W niniejszym rozdziale Autor omawia poszczególne etapy przetwarzania danych tj. wyznaczenie maski obiektu, algorytm wyliczania mapy okresu prążków, algorytm wyliczania rozkładu fazy modulo-

2 π , algorytm wyznaczania mapy jakości prążków, algorytm uciągania (odwikłania) rozkładu fazy, metodę wyznaczania pozycji markera oraz sposób wyznaczania absolutnego (skorygowanego) rozkładu fazy. W kolejnym podrozdziale przedstawiono wyniki prac własnych nad zagadnieniami kalibracji lokalnej i globalnej. Obejmuje ona kalibrację na poziomie detektorów oraz kalibrację fazową dla relacji detektor-projektor. Ostatecznym zadaniem jest znalezienie transformacji sprowadzającej poszczególne moduły kierunkowe do wspólnego globalnego układu współrzędnych, co daje możliwość wygenerowania pełnego modelu przestrzennego skanowanego obiektu. Obok opracowanych algorytmów, przedstawiono wzorzec kalibracyjny oraz procedurę kalibracji kamery w reżimie statycznym i dynamicznym dla lokalnego i globalnego układu współrzędnych.

W rozdziale 5, Autor przedstawia opracowaną platformę programistyczną do przetwarzania i analizy danych, a jednocześnie do badania i optymalizacji algorytmów. Oprogramowanie to, wraz ze modułami do oświetlania strukturalnego i akwizycji danych przestrzennych stanowi stanowisko badawcze. Przedstawiona platforma programistyczna umożliwi elastyczną parametryzację algorytmów, wizualizację wyników oraz specyficzne przetwarzanie danych np. manualną filtrację przestrzenną.

W rozdziale 6 zatytułowanym „Walidacja systemu pomiarowego”, przedstawiono wyniki oceny ilościowej i jakościowej. Na bazie zasad walidacji systemów światła strukturalnego (VDI/VDE 2634 Błat 2 i Błat 3) opracowano metodę badania dynamicznego. Polega ona na wprowadzaniu wzorca kalibracyjnego w ruch obrotowy wokół osi prostopadłej do powierzchni bazowej skanowanej przestrzeni. Badania prowadzono przy prędkościach obrotowych: 0, 4, 9 i 14 obr./min. Na podstawie uzyskanych wyników wyznaczono mapy błędów oraz błędy średnie i błędy średniokwadratowe. Walidację jakościową oparto na porównaniu wyników skanowania mężczyzny i kobiety z modelami referencyjnymi uzyskanymi skanerem 3D OGX/MMS oraz algorytmami pomiarowymi Markiewicza i innych [2017]. W tym przypadku analizowano trzy wymiary ciała (obwód w talii, w biodrach i w klatce piersiowej) wyznaczone na bazie pozyskanych chmur punktów. Wskazano, że walidacja wyników na obiektach żywych (ludzie) wprowadzała duże zakłócenie, stąd za miarodajne uznano wyniki uzyskane na manekinach. W tym przypadku uzyskano średnią różnicę między pomiarami 0,27mm i maksymalną 0,37mm. Przeprowadzono również badania na obiektach dynamicznych, uzyskując średnią odległość między punktami, dla przetworzonych danych 1mm. Zwrócono uwagę na istotne błędy lub brak danych w obszarach silnych nieciągłości (np. ciało-bielizna) i obszarach przestłoniętych (np. okolice pach) oraz tych, których normalna powierzchni skierowana jest pod dużym kątem względem osi optycznej kamer.

W rozdziale 7 omówiono zastosowania opracowanego rozwiązania w badaniach naukowych oraz wirtualnej rzeczywistości. Wskazano, że Krasowicz i inni. [2020] zastosowali opracowany system 4DBody do oceny rezultatów rehabilitacji pacjentów z dziecięcym porażeniem mózgowym. Druga z aplikacji dotyczy skanowania 4D aktorów, których modele wirtualne, cyfrowe bliźniaki, wykorzystywane są w przemyśle filmowym i grach komputerowych.

Rozdział 8, to „Podsumowanie”, w którym syntetycznie przedstawiono zrealizowane prace badawcze i rozwojowe w odniesieniu do z celów szczegółowych: opracowania metody pomiarowej, opracowania kalibracji lokalnej i globalnej oraz opracowania środowiska do przetwarzania danych. Autor przedstawił również trzy bardzo wartościowe kierunki dalszych prac. Proponuje bowiem poprawę stabilności rekonstrukcji poprzez filtrację temporalną, wprowadzenie dynamicznego markera oraz rozszerzenie informacji obrazowej o dodatkowy kanał głębi.

Dodatek A – to syntetyczny przegląd najważniejszych funkcji opracowanego oprogramowania Optimizer4D.

3. Ocena wskazanego piśmiennictwa

Bibliografia obejmuje 67 pozycji, w przeważającej większości anglojęzycznych. Jej formatowanie jest prawidłowe. Wśród źródeł internetowych, stanowiących ok. 25%, znajdujemy wiele, które nie są naukowym źródłem wiedzy ze wskazaniem autorstwa, a wyłącznie referencją do pokazanej grafiki lub zdjęć rozwiązań komercyjnych. Bibliografia jest dobrana stosownie do zakresu i celów pracy, choć ilościowo jest ograniczona.

4. Ocena celu pracy

Autor formułuje cel pracy doktorskiej jako „Opracowanie niskokosztowego systemu pomiarowego, który pozwoli na akwizycję wysokorozdzielczej geometrii ciała człowieka w ruchu”, wskazując jednocześnie dwa główne pola aplikacji: medycynę-rehabilitację oraz grafikę komputerową.

Powyższy cel jest uszczegółowiony, wskazano bowiem, że przestrzeń obrazowania powinna obejmować pełną geometrię człowieka, rozdzielczość do 1mm, częstotliwość akwizycji 120Hz oraz brak potrzeby stosowania specjalnych znaczników.

Następnie znajdujemy cele szczegółowe, obejmujące opracowanie (1) metody pomiarowej, (2) opracowanie metod kalibracji lokalnej i globalnej oraz (3) opracowanie środowiska (algorytmów) do przetwarzania danych i ich weryfikacji. Powyższe uszczegółowienia są zgodne z celem nadrzędnym i wskazują na potrzebę badawczego charakteru prowadzonych prac.

5. Wskazanie i ocena metod badawczych

Niniejsza praca doktorska ma charakter badań rozwojowych, co zostało jednoznacznie określone w jej celu. Pośród zastosowanych metod i technik badawczych w rozprawie doktorskiej znajdujemy

- Sformułowanie celu badawczo-rozwojowego, ograniczeń i celów szczegółowych
- Ocenę różnych metod skanowanie 3D wg. zaproponowanych kryteriów, na podstawie studiów literaturowych
- Użycie metody symulacyjnej propagacji światła do wyznaczenia obszarów wspólnego oświetlenia w układach wielokierunkowych
- Zaprojektowanie i opracowanie stanowiska badawczego do wielokierunkowego oświetlenia strukturalnego i wielokierunkowej akwizycji obrazów, wraz z układami generowania wzorców strukturalnych oraz synchronicznego sterowania wyzwaniem.
- Opracowanie algorytmów przetwarzania i analizy obrazów i rekonstrukcji modeli przestrzennych
- Opracowanie algorytmów kalibracji, w układach lokalnych i globalnych, uzyskanych danych
- Opracowanie i implementację platformy programistycznej do testowania i optymalizacji opracowanym algorytmów przetwarzania i analizy
- Opracowanie procedury i wzorców do walidacji ilościowej i jakościowej
- Przeprowadzenie walidacji wraz ze statystyczną analizą wyników

Zastosowane metody badawcze są interdyscyplinarne, z bardzo dużym zaangażowaniem zaawansowanego przetwarzania danych, są zgodne z zakresem realizowanych prac, obejmują wszystkie typowe działania zgodnie z prawidłową metodologią badawczo-rozwojową.

7. Aplikacyjność wyników

Na uznanie zasługuje, że metody i algorytmy opracowane w ramach niniejszej pracy doktorskiej zostały wdrożone do badań naukowych oraz zastosowań komercyjnych. Krasowicz i inni użyli pomiarów dynamicznych za pomocą systemu 4DBody do oceny rezultatów rehabilitacji pacjentów z dziecięcym porażeniem mózgowym. Podkreślono, że wysokorozdzielcze, dynamiczne dane powierzchniowe umożliwiły identyfikację i wyznaczenie nowych parametrów oceny takiego procesu. Monitorowanie procesu rehabilitacji pozwoliło optymalizować takie trudne zadania procesu rehabilitacji, co jak podkreśla Autor, nie byłoby możliwe z użyciem skanerów znacznikowych. Drugie zastosowanie dotyczy rekonstrukcji 4D postaci aktorów w scenie i zostało zastosowane w firmie Mnemonis. Rozwiązanie takie jest odpowiedzią na rosnące znacznie bliźniaków cyfrowych, nie tylko do kreowania rzeczywistości wirtualnej w grach czy filmach, ale nawet w systemach produkcyjnych – np. w zakresie poprawy ergonomii pracy.

8) Zagadnienia dyskusyjne i uwagi krytyczne

- a) Autor bardzo swobodnie i czasami nieprecyzyjnie używa pojęć metrologicznych takich jak pomiar, metoda pomiarowa, precyzja.
Przykładowo, w Spisie pojęć i skrótów definiuje Metodę pomiarową, jako Proces odwzorowania mierzonej powierzchni, gdzie dane wejściowe stanowią obrazy z kamer oraz model systemu, a wyznaczana jest geometria powierzchni w postaci chmury punktów. Definicja taka jest autorskim opisem pod kątem pracy, odbiegającym od przyjętych definicji np. z PN-71/N-02050. W konsekwencji tego, często w dysertacji występuje pojęcie pomiaru, np. „... mierzonej osoby...” (s.38), „... ramki z pomiaru mężczyzny...” (s.75), „... ramki z pomiaru kobiety...” (s.76), w znaczeniu „skanowania” czy „digitalizacji”. Ponadto, nie jest jasne, co oznacza stwierdzenie, że „...efektom rekonstrukcji brakuje precyzji...” (s.17), przy wskazaniu na Rys.5, czy Autor rzeczywiście myśli o zmienności ocenionej na podstawie powtórzeń digitalizacji?. Uproszczenia, w kontekście walidacji, że wartość średnia „była na poziomie” lub „w przybliżeniu równa”, nie jest poprawne.
- b) Koncepcja rozwiązania wizyjnego i optycznego przedstawiona jest bardzo ogólne, nie znajdujemy tu szczegółów dotyczących: pola widzenia, parametrów przetwornika, ogniskowej czy przesłony obiektywu, a w konsekwencji głębi ostrości, czy rozmycia obrazu.
- c) W rozdziale 4.1 „Budowa systemu pomiarowego”, pokazano bardzo wartościowe wyniki symulacji propagacji światła, wskazujące części wspólne obszarów oświetlanych przez dwa moduły kierunkowe sąsiadujące ze sobą w zaproponowanym układzie. (Rys. 18). Szkoda, że model ten nie został dalej rozwinięty do bardziej szczegółowej analizy okluzji i rozdzielczości, a nawet oceny niepewności pomiarowych w całej objętości skanowanej.
- d) Pojęcie „niskokosztowości” nie zostało w żaden sposób uszczegółowione. Wielokrotnie znajdujemy komentarze, że „Konstrukcja systemu pomiarowego została opracowana przy uwzględnieniu ograniczeń wynikających z dostępnego budżetu”, „System może być zbudowany ze skończonej, niedużej liczby modułów kierunkowych”. Takie istotne ograniczenie, sformułowane w celu pracy, powinno być mierzalne.
- e) Rozdział 4 jest zatytułowany „Implementacja 4DBody”. Korzystniej, powinien wskazywać na metodyczny i badawczy charakter swojej zawartości np.: Opracowanie algorytmów przetwarzania i rekonstrukcji modelu - co jest faktyczną jego zawartością.
- f) Walidacja systemu jest podzielona na część ilościową i jakościową. W przypadku tej



- pierwszej, Doktorant opracował procedurę badania obiektów dynamicznych na bazie zaleceń VDI/VDE 2634 (Blat 2 i Blat 3). Metoda bazuje wyłącznie na płaszczyźnie referencyjnej, która jest obracana z różnymi prędkościami wokół osi pionowej. Nie jest wyjaśnione, dlaczego nie udało się pokonać technicznych problemów sztywności wzorca.
- g) Zgodnie z opracowaną procedurą walidacji, w pierwszym kroku poszukiwany jest model płaszczyzny dopasowany do chmury pozyskanych punktów, a w kolejnym kroku wyznaczane są wartości niedopasowania. Zachodzi pytanie, czy wynik takiej oceny nie jest nazbyt optymistyczny? Nie wyjaśniono, bowiem czy stosowano metodę kroswalidacji lub użycia danych, które nie były wykorzystywane do modelowania?
- h) Korzystne dla czytelnika pracy byłoby zwarte zebranie wniosków z podziałem na poznawcze i utylitarne w części podsumowującej.

Praca napisana jest starannie, rysunki i wykresy są czytelne, choć pojawiły się drobne błędy redakcyjne, czy stylistyczne.

(s.7) Definicja „Dane 4D” – czy rzeczywiście dane te reprezentują zmiany geometrii, czyli wartości względne czy bezwzględne w czasie?

(s.7) Zawarcie w spisie pojęć i skrótów, takich pozycji jak LED, Matryca CMOS, Matryca CCD, PC, IR, DSLR, LAN – nie uważam za potrzebne, gdyż nie są one wielokrotnie stosowane podczas omawiania metodologii badawczej czy wyników.

(s.7) Moduł -> Moduł kierunkowy

(s.14) Wprowadzono algorytm SIFT – bez objaśnienia, również brak w spisie pojęć i skrótów

(s.15) Do objaśnienia rysunku 3 – użyć pojęć polskich i angielskich np. w nawiasach, „bundle adjustment”

(s.17) „... sama częstotliwość akwizycji może nie dać zadowalających rezultatów ...” – objaśnić

(s.21) „konieczne jest wykorzystanie przynajmniej kilku układów” -> kilku widoków

(s25 – Tabela 1) „niski czas” -> krótki czas

(s25 – Tabela 1) nagłówek kolumny TL -> LT

(s.31, s.32) – „problem z zaświecaniem się”; „zaświecanie” - styl

(s.35) – „... jednoramkowej wersji metody SL” – wymaga objaśnienia/wprowadzenia

(s.39) – „zmienia się z mniejszej na większą od mediany lub odwrotnie” – styl

(s.39) – „pięć wartości opisanych odległości” – wymaga wyjaśnienia

(s. 97) – pozycję [55] usunąć

(s.86 is.93) Dodatki i spis literatury (Bibliografia) nie powinien być numerowanymi rozdziałami

10. Konkluzja

Recenzowana praca mgr inż. Pawła Liberadzkiego pt.: „Wielokierunkowy system do pomiaru geometrii człowieka w ruchu z zastosowaniem metody z oświetleniem strukturalnym” ma charakter badań eksperymentalnych i aplikacyjnych nad opracowaniem dedykowanej aparatury optycznej/wizyjnej wraz z algorytmami przetwarzania danych pomiarowych.

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

Zakres przeprowadzonych prac jest obszerny, Doktorant wykazał się umiejętnością użycia i opracowania wielu różnych metod i technik badawczych. Opracował dedykowane stanowisko badawcze, zawansowane algorytmy przetwarzania danych i rekonstrukcji modeli 3D oraz ich kalibracji, co wymagało istotnego pogłębienia wiedzy, umożliwiającej ich zapis w postaci równań matematycznych i diagramów oraz ich implementację. Opracował oryginalny wzorzec strukturalny oraz metodę detekcji markera metodami analizy widmowej, co zwiększyło poprawność rekonstrukcji modelu 3D. Opracował metodę oceny ilościowej i jakościowej

opracowanych rozwiązań, czym potwierdził osiągnięcie zakładanego celu.

Na szczególne uznanie zasługuje aplikacyjność uzyskanych wyników. Bezznacznikowy, dynamiczny, skaner światła strukturalnego 4DBody znalazł bowiem zastosowanie do oceny rezultatów rehabilitacji pacjentów z dziecięcym porażeniem mózgowym. Kolejne jego wykorzystanie umożliwiające tworzenia bliźniaków cyfrowych postaci, nie jest ograniczone do obiektów statycznych.

Cele poznawcze i użytkowe postawione przez Doktoranta zostały z sukcesem osiągnięte, w sposób zgodny z metodyką prac badawczych, co mimo zgłoszonych przeze mnie uwag krytycznych i polemicznych, potwierdza przygotowanie Autora do prowadzenia badań naukowych i przemysłowych.

Stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Pawła Liberadzkiego spełnia warunki stawiane pracom doktorskim przez obowiązującą ustawę z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (t. j. Dz. U. z 2017 r. poz. 1789 z późn. zm.) oraz ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę - Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. poz. 1669 z późn. zm.) i wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna w Politechnice Warszawskiej o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów postępowania.

dr hab. inż. Jacek Reiner, profesor uczelni

Politechnika Wroclawska



