

Wrocław 04.09.2023

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. Krzysztofa Borkowskiego

pt.: „Opracowanie i badania wizyjnego systemu pomiarowego wielkogabarytowych rur giętych z modelem analitycznym rzutu perspektywicznego”

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Borkowskiego pt.: „Opracowanie i badania wizyjnego systemu pomiarowego wielkogabarytowych rur giętych z modelem analitycznym rzutu perspektywicznego”, zrealizowana pod kierunkiem Profesora dr hab. inż. Dariusza Janeckiego oraz promotora pomocniczego dr inż. Jarosława Zwierzchowskiego. Recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, w Politechnice Świętokrzyskiej, dr hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk. (numer pisma MAA-510/71/2023).

1. Obszar problemowy rozprawy

Przemysłowa, optyczna kontrola jakości geometrycznej wyrobów wielkogabarytowych wymaga kosztownych skanerów 3D i pracochłonnego przetwarzania i analizy chmur punktów, co często skutkuje pozostawianiem przy niedokładnych metodach manualnych. Trudność w zastosowaniu powszechnych i tanich systemów wizyjnych 2D do wymiarowania obiektów 3D polega na konieczności skompensowania błędów perspektywicznych obrazowania oraz kalibracji i walidacji stanowiska pomiarowego. Ponadto, metoda wyznaczania cech geometrycznych wielkogabarytowych rur giętych nie jest objęta standaryzacją, stąd jest konieczne wiarygodne wykazanie poprawności metrologicznej opracowanych rozwiązań autorskich, gdy mają zostać zastosowane w procesie produkcyjnym.

W takim kontekście, podjęcie badań przez Pana mgr inż. Krzysztofa Borkowskiego, nad opracowaniem wizyjnego systemu pomiarowego wielkogabarytowych rur giętych z modelem analitycznym rzutu perspektywicznego - uważam za aktualne i istotne, z punktu widzenia poznawczego i aplikacyjnego.

Badania prowadzone w tym zakresie wymagają interdyscyplinarnej wiedzy i umiejętności optomechanicznych ze szczególnym rozumieniem aspektów przetwarzania i analizy obrazów w tym modeli przestrzennych. Tematyka takiej pracy mieści się w dyscyplinie Inżynieria Mechaniczna.

2. Kompozycja i treść rozprawy

Dysertacja obejmuje 129 stron, podzielona jest na 7 rozdziałów, na początku pracy zamieszczono wykaz najważniejszych oznaczeń.

We „**Wprowadzeniu**” Autor przedstawia motywację do podjęcia pracy badawczej, definiując istotę problemu oraz wymagania wobec wizyjnego systemu pomiarowego – określone przez docelowego użytkownika, kielecką firmę Chemar Rurociągi sp. z o.o.

Cele pracy został sformułowany jako **Opracowanie i wykonanie wizyjnego systemu pomiarowego dla wielkogabarytowych rur giętych, umożliwiającego wyznaczenie kąta i promienia gięcia łuku rury, długości prostych odcinków rury oraz jej średnicy**. W dalszej części przedstawiono szczegółowe cele oraz specyfikację zadań prowadzących do realizacji w.w. celów. Wprowadzenie podsumowane jest przejrzystym omówieniem struktury pracy.

Rozdział 1, zatytułowany „**Analiza stanu wiedzy**” rozpoczyna klasyfikacja technik pomiaru kształtu, a następnie przegląd optycznych systemów pomiarowych rur. Dalej Autor zgłębia wybrane problemy w pomiarach wizyjnych takie jak Model perspektywiczny kamery, Dystorsja optyczna i Kalibracja kamery. Zagadnienia te są istotne dla celu i zakresu pracy, a ich analiza jest rzetelna i szczegółowa, wykorzystuje język matematyki.

Rozdział 2, pt. „**Matematyczny model deformacji perspektywicznych rury giętej**”, jest jednym z najistotniejszych zagadnień poznawczych Autora do rozwiązania postawionego celu. Bowiem, w rozważanym przypadku obrazowania, rejestrowany na obrazach przestrzenny obiekt (rura) jest rzutem środkowym na powierzchnię stołu względem punktu środkowego matrycowego detektora kamery. Stąd bezpośredni pomiar zarysu krawędzi nie jest możliwy, bo jest zależny o jej przestrzennej lokalizacji. Na uznanie zasługuje bardzo metodyczne (eleganckie) podejście do rozwiązania tego zagadnienia, polegające na podziale problemu na trzy wstępujące zagadnienia: model rury z jednym łukiem giętym, model rury z dwoma łukami giętymi, w jednej i dwóch płaszczyznach. Po wyprowadzeniu zależności analitycznych dla każdego z przypadków, wspomaganego wizualizacją dwu i trójwymiarową Autor przeprowadził analizę wpływu zniekształceń perspektywicznych na wyniki. Wyznaczył zniekształcenia perspektywiczne względne w zależności od położenia rury i jej średnicy w funkcji odległości kamery od stołu pomiarowego. Przeprowadzone badania symulacyjne potwierdziły poprawność opracowanych modeli analitycznych.

Rozdział 3, pt. „**Matematyczny model stanowiska pomiarowego**”, przedstawiono autorski, dedykowany sposób kalibracji stanowiska pomiarowego na podstawie pozycjonowania wzorca jedynie na płaszczyźnie stołu pomiarowego. Autor wyprowadza model prosty a następnie odwrotny stanowiska i przedstawia wyniki badań symulacyjnych nad poprawnością opracowanego modelu odwrotnego. Procedura badania polega na transformacji współrzędnych punktów wzorca umieszczonego na stole pomiarowym, do układu współrzędnych kamery. Następnie prowadzona jest identyfikacja i minimalizacja parametrów modelu odwrotnego. W dalszej kolejności uzyskany wynik jest transformowany do układu współrzędnych stołu pomiarowego. Miarą oceny poprawności jest błąd średniokwadratowy, który w przeprowadzonych badaniach wyniósł 5,7 μ m przy długości stołu 2m, co pozytywnie weryfikuje opracowane algorytmy, nie reprezentując oczywiście całego procesu pomiaru wizyjnego.

W Rozdziale 4 omówiono „**Stanowisko pomiarowe**”. Ze względu na ograniczenia przestrzenne, stanowisko laboratoryjne jest wykonane w skali 1:4, co pozwala zweryfikować wszystkie charakterystyki geometryczne zachodzące w stanowisku na hali produkcyjnej (prócz zakłóceń). Zgodnie z opracowaną metodą i algorytmami dokonano kalibracji stanowiska przedstawiając uzyskane wyniki oraz wyniki z weryfikacji jego poprawności kalibracji. Uzyskano dokładność 1‰ długości stołu, co satysfakcjonuje założenia projektu.

W Rozdziale 5, pt. „**Pomiar rury giętej**” przedstawiono wyniki prac własnych nad analizą obrazów i algorytmami pomiarów rury giętej. Z zakresie przetwarzania obrazów użyto algorytmów wyrównywania histogramów, arytmetycznych operacji punktowych, filtrowania morfologicznego, konwersji do skali szarości i binaryzacji, filtracji gradientowej Cannyego. W zakresie analizy obrazów opracowano skuteczną metodę dopasowania prymitywów geometrycznych wspomaganych transformatą Hougha. Na bazie uzyskanych danych zaproponowano algorytmy wyznaczania cech obrazowych, takich jak: średnica i kąt gięcia rury, promień gięcia rury, długości prostek rury. Opracowane algorytmy matematyczne zakładają znajomość nominalnych parametrów obiektu.

Rozdział 6 „**Badania eksperymentalne**” przedstawia i omawia wyniki walidacyjne pod kątem dokładności i powtarzalności pomiarów. W pierwszej części zestawiono niezbędną wiedzę dotyczącą analizy statystycznej pod kątem oceny dokładności i powtarzalności. Następnie, na podstawie serii badań wzorcowej rury giętej, podczas której zmieniano jej położenie i orientację wyznaczono dokładność każdej z mierzonych cech. Mimo sporadycznych zakłóceń od oświetlacza jarzeniowego, uzyskane wyniki uznano za zgodne z referencyjnymi z innych publikacji oraz z wymaganiami przemysłowymi. Badanie powtarzalności pomiarowej zaplanowano z użyciem specjalnie przygotowanych próbek, rur o różnym kącie gięcia i różnej długości, których pozycję i orientację na stole pomiarowym zmieniano. Uzyskane wyniki są satysfakcjonujące, zauważone odstępstwa i osobliwości, np. asymetria rozkładu zmienności cechy, zostały krytycznie przedyskutowane wraz ze wskazaniem potencjalnych ich przyczyn.

Rozdział 7, Zawiera syntetyczne „**Podsumowanie**” zrealizowanych prac w odniesieniu do celu głównego i celów szczegółowych. Wartościowa jest dyskusja wyników, zwłaszcza ograniczeń i zakłóceń. Pomimo, że każdy z rozdziałów zakończony jest wnioskami, najwartościowsze z nich zostały tutaj ponownie przywołane. Autor celnie proponuje kierunki dalszych prac nad bardziej odpornymi metodami segmentacji zakłóconych obrazów światłem bocznym, np. słonecznym oraz na algorytmami pomiarów konturów niejednorodnie owalizowanej giętej rury.

W końcowej części pracy zamieszczono, spis rysunków, spis tabel i bibliografię. Bibliografia obejmuje 73 pozycje, głównie anglojęzyczne, aktualne, dobrze dobrane do celu i zawartości pracy.

Redakcja pracy zasługuje na wyróżnienie. Kompozycja rozdziałów, przypisy i odsyłacze nie budzą zastrzeżeń. Praca jest napisana bardzo poprawnym językiem, bez błędów stylistycznych czy redakcyjnych. Forma graficzna i edycyjna są na najwyższym poziomie. Docenić należy również użycie przez Autora takich profesjonalnych narzędzi badacza jak LaTeX i Wolfram Mathematica.

4. Ocena celu pracy

Autor jasno formułuje cel pracy doktorskiej jako „**Opracowanie i wykonanie wizyjnego systemu pomiarowego dla wielkogabarytowych rur giętych, umożliwiającego wyznaczenie kąta i promienia gięcia łuku rury, długości prostych odcinków rury oraz jej średnicy**”, co wskazuje na aplikacyjny charakter przedsięwzięcia. Jednakże, szczegółowe cele jednoznacznie potwierdzają potrzebę prac badawczych dla osiągnięcia postawionego celu. Są to:

- Opracowanie analitycznego modelu zniekształceń perspektywicznych,
- Opracowanie matematycznego modelu zniekształceń dla stanowiska pomiarowego,
- Opracowanie algorytmu do wykrycia konturu wybranej rury giętej na cyfrowym obrazie,
- Opracowanie algorytmu do wyznaczania parametrów rury giętej,
- Zaprojektowanie i wykonanie fizycznego stanowiska pomiarowego,
- Zbadanie dokładności i powtarzalności pomiarów.

Przedstawiono również specyfikację konkretnych zadań prowadzących do realizacji w.w. celów, a w dalszej części przejrzyste omówienie struktury pracy.

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.

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, na podstawie studiów literaturowych,
- Opracowanie matematycznych modeli
 - zniekształceń perspektywicznych dla rur z jednym i dwoma łukami giętymi,
 - kalibracyjnego stanowiska pomiarowego, uwzględniającego zniekształcenia kamery oraz geometrię stanowiska,
- Opracowanie algorytmów:
 - wykrywania leżących na stole traserskim rur przeznaczonych do pomiarów
 - wyszukiwania par prostych, reprezentujących proste odcinki rur – na bazie transformaty Hougha,
 - wyznaczania cech rur giętych (średnica rury, kąt gięcia, promień gięcia, długość prostki 1 i 2, długość linii środkowej,
- Opracowanie badawczego stanowiska pomiarów wizyjnych w skali 1:4
- Implementacja algorytmów widzenia maszynowego do pomiarowych parametrów bryły 3D, rury giętej,
- Ocena wyników pomiarów opartych na opracowanych modelach z pomiarami kontrolnymi uzyskanymi z certyfikowanej maszyny współrzędnościowej.

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.

7. Aplikacyjność wyników

Na uznanie zasługuje ambitne wyzwanie aplikacyjne. Bowiem wynik prac jest adresowany do trudnych zadań metrologii obiektów wielkogabarytowych, w warunkach przemysłowych przy minimalizacji kosztowej aparatury. Parterem przemysłowym podczas opracowywania (definiowanie wymagań i dostarczenie próbek) oraz zainteresowanym wdrożeniem jest firma Chemar Rurociągi sp z o.o. z Kielc. Firma jest producentem prefabrykowanych elementów rurociągów, w tym wielkogabarytowych rur giętych na giętarkach indukcyjnych, o maksymalnych średnicach 1020mm.

8) Zagadnienia dyskusyjne i uwagi krytyczne

- a) Jak należy przewidzieć wpływ zastosowania obiektywu o wyższym MTF?
- b) W podsumowaniu (s113) Autor proponuje zastosowanie przemysłowej kamery pełnoklatkowej o wyższej rozdzielczości 24MPx, konkludując, że wpłynie to na zwiększenie dokładności pomiarowej całego systemu oraz na zmniejszenie dystorsji obiektywu. Czy rzeczywiście dystorsja układu obrazującego (detektor-obiektyw) zostanie zminimalizowana? Czy jakieś dodatkowe wymagania dot. modyfikacji obiektywu zostały przyjęte i niedopowiedziane?
- c) Autor zauważa, że dodatkowe lampy jarzeniowe wprowadziły powstanie cieni na obrazie, które zakłóciły detekcję faktycznej krawędzi rury. Czy główny oświetlacz pierścieniowy nie będzie wprowadzał takich cieni, szczególnie przy rurach z górnego zakresu pomiarowego (1020mm)? Jakie inne metody oświetlania należałoby rozważyć dla takich scen?
- d) Opracowane algorytmy wyznaczenia cech pomiarowych kolana rury zakładają znajomość nominalnej jej średnicy (rozdział 5.3) – czy rzeczywista zmienność średnicy wpłynie na wynik pomiaru?
- e) Opracowana procedura kalibracji kamery zakłada uproszczenie polegające na braku konieczności manipulowania przestrzennego wzorcem. Czy niedokładność wyznaczenia/wyjustowania parametrów zewnętrznych stanowiska będzie miała wpływ na parametry metrologiczne?
- f) Podczas badania dokładności pomiarów opracowanego systemu użyto kolana giętego o nominalnej średnicy zewnętrznej 60,8mm – co weryfikuje jakość pomiarów w dolnym zakresie pomiarowym. Czy użycie dodatkowego wzorca do oceny w zakresie górnym jest potrzebne/konieczne?
- g) Pomiar rury wzorcowej został przeprowadzony na maszynie WMP, tak aby odpowiadał on rzutowi prostemu, a uzyskane dane zostały przetworzone uproszczonymi algorytmami opracowanymi w ramach 5.2. Przyjmując takie wyniki za wartości referencyjne, nie wykazano ich zmienności (Tab 6.2), czy nie narażamy się na błąd metody podczas walidacji metrologicznej na całej powierzchni pomiarowej?
- h) Jakie są tolerancje cech określone przez producenta i czy zastosowanie Analizy zdolności pomiarowej MSA nie byłoby akceptowalne przez firmę wdrażającą?

10. Konkluzja

Recenzowana praca mgr inż. Krzysztofa Borkowskiego pt.: „Opracowanie i badania wizyjnego systemu pomiarowego wielkogabarytowych rur giętych z modelem analitycznym rzutu perspektywicznego” ma charakter badań aplikacyjnych nad opracowaniem dedykowanej metody, a w konsekwencji aparatury optycznej/wizyjnej wraz z algorytmami przetwarzania danych pomiarowych oraz ich ocena metrologiczna. Praca została zainspirowana potrzebą gospodarczą zgłoszoną przez Chemar Rurociągi Spółka z o.o., zainteresowaną wdrożeniem.

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 przestudiował i opisał matematycznie model perspektywiczny obrazowania kamerą otworkową, rozwinął go o dystorsje wprowadzane przez rzeczywiste układy optyczne – obiektywy, omówił szczegółowo zagadnienie kalibracji kamer.

Bardzo metodycznie i gruntownie rozwiązał problem zniekształceń perspektywicznych, który jest kluczowym wyzwaniem jednokamerowego pomiaru 3D obiektów wielkogabarytowych. W przypadku kalibracji stanowiska pomiarowego opracował model matematyczny bazujące na uproszczonej procedurze kalibracyjnej. Opracowane modele zweryfikował symulacyjnie, czym potwierdził ich przydatność do podjęcia dalszych badań przemysłowych. W pierwszym ich etapie opracował modelowe stanowisko badawcze w skali 1:4 i przeprowadził kalibrację zgodnie z własnym opracowaniem, uzyskując bardzo zadowalające wyniki dokładności. Istotnym oryginalnym wkładem Autora, jest opracowanie algorytmów do wyznaczania cech geometrycznych rur giętych. Jest to znaczące, gdyż obecnie nie ma norm regulujących ten sposób kontroli jakości. Opracowane algorytmy są znacznie odporniejsze na zakłócenia obrazowe, co osiągnięto, poprzez zastosowanie transformaty Hougha. Walidacja metrologiczna opracowania w zakresie dokładności i powtarzalności, przeprowadzona na podstawie licznych badań różnorodnych próbek, potwierdza osiągnięcie założonych celów.

Szczególnie doceniam krytyczną dyskusję Doktoranta, nad zaobserwowanymi osobliwościami i ograniczeniami podczas realizowanych badań. To właśnie taka dojrzałość Autora, zainicjowała moją docieklivość i polemikę, która w żaden sposób nie umniejsza osiągniętych wyników niniejszej pracy – a wręcz przeciwnie stanowi esencją podejścia badawczego. 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. Krzysztofa Borkowskiego 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 Świętokrzyskiej o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów postępowania.

Ponadto **wnioskuję o poddanie pod głosowanie wyróżnienia niniejszej pracy doktorskiej mgr inż. Krzysztofa Borkowskiego**, za wyróżniające przeprowadzenie i udokumentowanie całego procesu badawczo-rozwojowego opracowania wizyjnego systemu pomiarowego dla wielkogabarytowych obiektów i opracowanie autorskich algorytmów analizy obrazów.

dr hab. inż. Jacek Reiner, profesor uczelni

Politechnika Wrocławska