

Warszawa, 06.10.2023

Prof. dr hab. inż. Leszek Sałbut  
Politechnika Warszawska  
Wydział Mechatroniki  
Instytut Mikromechaniki i Fotoniki  
ul. Św. Andrzeja Boboli 8  
02-525 Warszawa  
[Leszek.salbut@pw.edu.pl](mailto:Leszek.salbut@pw.edu.pl)

### **Recenzja rozprawy doktorskiej**

**mgr inż. Krzysztofa Borkowskiego**

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

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska mgr inż. Krzysztofa Borkowskiego pt.: „Opracowanie i badanie wizyjnego systemu pomiarowego wielkogabarytowych rur giętych z modelem analitycznym rzutu perspektywicznego”, zrealizowana pod kierunkiem promotora prof. dr hab. inż. Dariusza Janeckiego i promotora pomocniczego dr inż. Jarosława Zwierzchowskiego. Recenzja została opracowana w odpowiedzi na pismo Dyrektora Naukowego Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Świętokrzyskiej dr hab. inż. Sławomira Błasiaka, prof. PŚk (numer pisma MAA-510/70/2023).

#### **Problematyka naukowo-badawcza rozprawy**

Rurociągi odgrywają bardzo ważną rolę we współczesnej gospodarce i są istotnym elementem infrastruktury energetycznej i przemysłowej. Są częścią składową instalacji rurowych przeznaczonych do transportu płynów i mieszanin, w tym ropy naftowej, gazu ziemnego, paliw płynnych, wody oraz innych płynnych substancji. Transport rurociągowy jest bardziej ekologiczny, tańszy i bezpieczniejszy niż transport kolejowy czy drogowy.

Jednym z elementów rurociągów są rury gięte umożliwiające dopasowanie przebiegu rurociągu do przestrzeni w której jest on wykorzystywany. Sposób ich wytwarzania zależy od materiału, wymiarów oraz wymagań geometrycznych i technologicznych. Rosnące wymagania

jakościowe wymuszają wprowadzenia kontroli kształtowo-wymiarowej na kolejnych etapach produkcji, a w szczególności po procesach gięcia, obróbki termicznej i ewentualnych czynnościach korekcyjnych. Tematyka rozprawy, związana z wykorzystaniem systemu wizyjnego do pomiaru parametrów geometrycznych wielkogabarytowych rur giętych, została zainspirowana przez kielecką firmę Chemar zainteresowaną wdrożeniem zautomatyzowanego systemu kontroli.

W prowadzonych przez siebie badaniach mgr inż. Krzysztof Borkowski skupił się na opracowaniu i wykonaniu wizyjnego systemu pomiarowego bazującego na jednoobrazowej fotogrametrii płaskiej, umożliwiającego wyznaczenie kąta i promienia gięcia łuku rury, długości prostych odcinków rury oraz jej średnicy. Zgodnie z założeniami system pomiarowy został dopasowany do istniejącej infrastruktury i ciągu technologicznego oraz przystosowany do wdrożenia w firmie Chemar Rurociągi.

Praca stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego problemu dotyczącego przemysłu ciężkiego z zakresu metrologii wielkości geometrycznych i wnosi wartościowy wkład użytkowy do dyscypliny naukowej Inżynieria Mechaniczna. Należy podkreślić, że praca jest interdyscyplinarna, a w jej ramach wykorzystano różnorodne metody badawcze oraz narzędzia, w tym: modelowanie matematyczne, projektowanie specyficznych wizyjnych systemów pomiarowych, opracowanie algorytmów do przetwarzania obrazów, analizę i ocenę danych, identyfikację cech geometrycznych, programowanie oraz badania symulacyjne i eksperymentalne.

### **Struktura pracy**

Praca składa się z siedmiu merytorycznych rozdziałów uzupełnionych o wprowadzenie, bibliografię (73 pozycje), spis rysunków, tabel i wykaz ważniejszych oznaczeń.

Rozdział 1 zawiera analizę stanu wiedzy dotyczącej metod pomiaru kształtu oraz wizyjnych systemów pomiarowych rur. Opisano w nim również model kamery typu otworkowego, model dystorsji optycznej oraz metodę kalibracji kamery.

W rozdziale 2 przedstawione zostały opracowane modele deformacji perspektywicznej zarysu rury giętej oraz badania symulacyjne wpływu zniekształceń perspektywicznych na wyniki pomiaru.

W rozdziale 3 opisano opracowany model matematyczny wizyjnego stanowiska pomiarowego z uwzględnieniem jego geometrii, projekcji punktu na płaszczyznę obrazu oraz błędów optycznych soczewki kamery. Przeprowadzono także badania symulacyjne poprawności opracowanego modelu.

Rozdział 4 zawiera opis zaprojektowanego i wykonanego w skali 1 : 4 stanowiska laboratoryjnego oraz niezbędne obliczenia do doboru właściwego obiektywu. W rozdziale tym przedstawiona została też kalibracja stanowiska wraz z weryfikacją jej poprawności.

W rozdziale 5 opisane są dwa opracowane algorytmy analizy obrazu. Pierwszy algorytm używany jest do przetwarzania i segmentacji obrazu w celu wyznaczenia zarysu konturu

badanej rury. Drugi – służy do wyznaczenia parametrów geometrycznych z uwzględnieniem deformacji perspektywicznych i optycznych.

W rozdziale 6 opisane zostały przeprowadzone badania dokładności i powtarzalności pomiaru. Badania dokładności polegało na porównaniu wyników pomiarów rury giętej wykonanych na zbudowanym stanowisku z wynikami pozyskanymi na maszynie współrzędnościowej. Powtarzalność oszacowano na podstawie wielokrotnych pomiarów rur giętych w zmiennej orientacji i położeniu na stole pomiarowym.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie uzyskanych wyników badań. Rozważono także możliwość wdrożenia opracowanego systemu w przemyśle, sformułowano wnioski końcowe oraz wskazano na możliwe kierunki dalszych badań.

### **Oryginalność zaproponowanego zagadnienia badawczego**

W pracy zaplanowano i zrealizowano proces badawczy, który zawiera aspekty nowatorskie o charakterze badawczo-rozwojowym i stanowi oryginalne osiągnięcie poprzez rozwiązanie wielu zagadnień naukowych:

- Poprzez połączenie w odpowiedniej kolejności znanych algorytmów przetwarzania obrazu i analizy danych z modelowaniem matematycznym uzyskano oryginalną i innowacyjną metodę do wyznaczania cech geometrycznych rury giętej. W opracowanym algorytmie dla wizyjnego systemu pomiarowego wykorzystano informację o znanym, nominalnym kształcie mierzonego przestrzennego obiektu 3D, tj. rury jednokrotnie giętej. Dzięki temu po uwzględnieniu zniekształceń perspektywicznych możliwe było wyznaczenie parametrów geometrycznych rury giętej na podstawie pojedynczego zdjęcia.
- Wyznaczono istotne dla tematyki pracy modele matematyczne zniekształceń perspektywicznych dla rur z jednym i dwoma łukami giętymi.
- Wyprowadzono model do kalibracji stanowiska wizyjnego. Autorski model uwzględniający dystorsje optyczne jest dedykowany do dużych stanowisk pomiarowych, ze względu na uproszczoną strategię kalibracji w jednej płaszczyźnie.
- Zaprojektowano stanowisko laboratoryjne w skali 1:4, na którym testowano algorytmy oraz przeprowadzono badania dokładności i powtarzalności pomiarów dla pozyskanych próbek rur giętych.
- Przeprowadzono badanie eksperymentalne, w którym porównano wyniki pomiarów rur giętych uzyskane z systemu optycznego i maszyny współrzędnościowej. Warto zaznaczyć, że tego rodzaju porównanie nie pojawia się w dostępnej literaturze.

Zaproponowaną przez mgr inż. Krzysztofa Borkowskiego wizyjną metodę pomiaru wybranych parametrów geometrycznych rur giętych oceniam jako oryginalną, pomimo tego, że zastosowano w niektórych etapach istniejące wcześniej rozwiązania. Potwierdzeniem oryginalności są publikacje naukowe ściśle związane z tematyką rozprawy: 3 publikacje w Wydawnictwie Politechniki Świętokrzyskiej i 2 publikacje w monografiach po konferencjach

międzynarodowych (1 ukazała się dopiero po wydruku rozprawy doktorskiej). We wszystkich publikacjach mgr inż. Krzysztof Borkowski jest pierwszym autorem, co wskazuje na jego kluczową rolę w osiągnięciu wyników naukowych.

### **Uwagi o charakterze krytycznym i dyskusyjnym**

1. Autor stwierdza (m.in. w podsumowaniu), że opracowany system umożliwia automatyczną ocenę z wystarczającą dokładnością podstawowych parametrów mierzonych rur giętych. Chciałbym prosić o wyjaśnienie co znaczy automatyczna ocena, a przede wszystkim jakie dokładności są wymagane w pomiarach rur wielkogabarytowych. Rozumiem, że jak to autor wspomina na początku pracy, wymagania były ustalane z konkretnym zakładem przemysłowym, ale niestety nie zostały zamieszczone w pracy! Sugerował bym przedstawienie tych wymagań w czasie obrony w celu potwierdzenia uzyskania „wystarczającej dokładności”.
2. W podrozdziale zatytułowanym „Przegląd optycznych systemów pomiarowych rur” przytoczonych jest kilka przykładów optycznych systemów pomiarowo-kontrolnych wraz z uzyskiwanymi dokładnościami pomiaru. Problemатyczne jest, moim zdaniem, podawanie wartości błędów bez podania wymiarów mierzonych obiektów lub zakresów pomiarowych. Uniemożliwia to ocenę i porównanie przytoczonych w przykładach metod. Czy nie byłoby lepiej postugiwać się błędami względnymi?
3. W pracy brak jest merytorycznego uzasadnienia wyboru metody fotogrametrii płaskiej jednoobrazowej w odniesieniu do współcześnie rozwijanej fotogrametrii wielokamerowej umożliwiającej kalibrację przestrzeni pomiarowej i pomiar dowolnych obiektów 3D. Autor zauważa, że fotogrametria płaska to prostszy i co za tym idzie tańszy system, ale bez podania konkretnych danych.
4. Uwaga podobna do powyższej dotyczy wyboru wzorca kalibracyjnego. Brak jest uzasadnienia dlaczego wybrany został wzorzec typu „szachownica” w przypadku którego na dokładność wyznaczenia narożników znacząco mogą wpływać aberracje polowe obiektywu takie jak koma czy astygmatyzm? Czy nie lepszy byłby wzorzec złożony np. z matrycy kół?
5. Proszę o dyskusję jakie praktyczne ograniczenia opracowanej metody może wprowadzić przyjęcie niezbędnego założenia „że mierzony przedmiot jest połączeniem powierzchni cylindrycznych i toroidalnych o stałym promieniu przekroju poprzecznego”.
6. Na rysunku 4.2 pokazana jest fotografia stanowiska pomiarowego z pierścieniowym oświetlaczem. Fotografie powierzchni stołu pomiarowego na rys. 4.5, 4.7, 4.10, 5.2 i 5.3 wskazują na zupełnie inne oświetlenie, a na rys.6.3 jeszcze inne. Proszę o wyjaśnienie oraz dyskusję wpływu oświetlenia na dokładność pomiaru.
7. Zbudowany na potrzeby pracy system pomiarowy jest czterokrotnie pomniejszony. Jeżeli chodzi o sprawdzenie samego działania metody i algorytmów nie powinno mieć to znaczenia. Czy jednak wartości niepewności pomiarowej uzyskane w badaniach

dokładności i powtarzalności (tabela 6.6) z wykorzystaniem pomniejszonego systemu są miarodajne i wystarczające w przypadku większego, docelowego stanowiska oraz pomiaru przedmiotów o dużych gabarytach (średnice rur rzędu 1 m)?

### **Poprawność językowa i redakcyjna**

Rozprawa jest napisana w języku polskim, a styl wypowiedzi jest dobry. Drobne pomyłki pisarskie i błędy interpunkcyjne występują sporadycznie. Jedyna uwaga dotyczy braku opisu oznaczeń na rysunkach, co trochę utrudniało czytanie pracy.

### **Podsumowanie**

W rozprawie przedstawiono systematyczne, szczegółowe i wieloetapowe podejście do zagadnienia badawczego, ukazujące, w jaki sposób można projektować wizyjne systemy pomiarowe. Końcowym rezultatem przeprowadzonych badań jest rozwiązanie przez autora złożonego problemu pomiarów rur wielkogabarytowych, dotychczas nierozwiązanego (brak takich systemów pomiarowych na rynku). Ponadto opracowany system charakteryzuje się: minimalizacją kosztów sprzętowych, szybkością akwizycji danych pomiarowych, niskim kosztem użytkowania, łatwą obsługą, możliwością automatyzacji oraz pomiaru wielu rur jednocześnie leżących na stole.

Warto zaznaczyć, że wyniki przedstawione w niniejszej rozprawie niosą ze sobą potencjalnie istotne implikacje praktyczne, zwłaszcza w kontekście zadowalających wyników badań, a w konsekwencji zainteresowanie wdrożeniem opracowanych algorytmów przez firmę przemysłową. Świadczy o tym przede wszystkim zaangażowanie firmy w prace przygotowawcze projektu, w ramach którego jedno z zadań jest bezpośrednio związane z efektami tej pracy.

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

**Stwierdzam, że opiniowana praca mgr inż. Krzysztofa Borkowskiego 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 Świętokrzyskiej o dopuszczenie jej Autora do dalszych etapów postępowania.**

