



Politechnika Świętokrzyska  
Wydział Mechatroniki i Budowy Maszyn

# **ROZPRAWA DOKTORSKA**

mgr inż. Krzysztof Borkowski

## **OPRACOWANIE I BADANIE WIZYJNEGO SYSTEMU POMIAROWEGO WIELKOGABARYTOWYCH RUR GIĘTYCH Z MODELEM ANALITYCZNYM RZUTU PERSPEKTYWICZNEGO**

Promotor:  
prof. dr hab. inż. Dariusz Janecki

Promotor pomocniczy:  
dr inż. Jarosław Zwierzchowski

Kielce 2023

# Streszczenie

W rozprawie przedstawiono całościowe opracowanie gotowego do użycia, wizyjnego systemu pomiarowego dla przemysłu ciężkiego. System jest dedykowany do pomiaru wielkogabarytowych rur giętych w jednej płaszczyźnie.

W opracowanym systemie pomiarowym zastosowano jedną nieruchomą kamerę do dokładnych i powtarzalnych wyników pomiarów obiektów przestrzennych, jakimi są rury gięte. Cel ten osiągnięto poprzez uwzględnienie deformacji perspektywicznego zarysu rury na podstawie przewidywanego kształtu rury giętej. Do tego zadania opracowano model matematyczny oraz dedykowany algorytm pomiarowy. Pomiar ciężkiej, wielkogabarytowej rury wymaga tylko jednego zdjęcia rury swobodnie leżącej na stole pomiarowym w dowolnym miejscu i orientacji. Dodatkowo opracowano własny model kalibracji stanowiska, dedykowany do pomiarów na przemysłowym stole traserskim. Kalibracja stanowiska polega na wykonaniu kilku zdjęć płaskiego wzorca pomiarowego układanego tylko na płaszczyźnie stołu pomiarowego.

W rozprawie opisano kolejne etapy prac począwszy od pomysłu, badań symulacyjnych, poprzez projektowanie i wykonanie fizycznego stanowiska, opracowanie algorytmów oraz ich testy, a zakończywszy na badaniach eksperymentalnych.

Główny cel pracy został osiągnięty — opracowano i wykonano wizyjny system pomiarowy dla wielkogabarytowych rur giętych. System umożliwia automatyczną ocenę z wystarczającą dokładnością podstawowych parametrów: kąta gięcia i promienia gięcia łuku rury, długości walcowych odcinków rury oraz średnicy rury.

W badaniach uzyskano niepewność pomiarową wynoszącą  $0,29^\circ$  dla kąta gięcia,  $0,46$  mm dla średnicy rury oraz  $0,87$  mm w przypadku promienia gięcia. Uzyskane dokładności pomiarowe są zadowalające i w pełni akceptowalne w przemyśle wielkogabarytowych rur giętych.

# Abstract

The thesis presents a comprehensive development of a ready-to-use vision measurement system for the heavy industry. The system is dedicated to measuring large bent pipes in a single plane.

The developed measurement system uses a fixed camera to achieve accurate and repeatable measurement results of spatial objects, such as bent pipes. This goal was achieved by considering the perspective deformations of the pipe outline based on the predicted shape of the bent pipe. A mathematical model and a dedicated measurement algorithm were developed for this purpose. Measuring a heavy, large pipe only requires taking a single photograph of the pipe freely placed on the measurement table in any position and orientation.

Additionally, a custom calibration model was developed specifically for measurements on an industrial tracer table. The calibration of the setup involves taking several photographs of a flat measurement pattern placed only on the plane of the measurement table.

The thesis describes the successive stages of work, starting from the idea, through simulation studies, design and construction of the physical setup, development of algorithms, their testing, and concluding with experimental research.

The main objective of the work has been achieved - a vision measurement system for large bent pipes has been developed and implemented. The system enables automatic assessment of fundamental parameters with sufficient accuracy, including the bending angle, bending radius of the pipe arc, length of cylindrical sections of the pipe, and pipe diameter.

In the research, measurement uncertainties of  $0.29^\circ$  for the bending angle, 0.46 mm for the pipe diameter, and 0.87 mm for the bending radius were obtained. The achieved measurement accuracies are satisfactory and fully acceptable in the industry of large bent pipes.