Dr hab. inż. Cezary SZCZEPAŃSKI
Profesor Nadzwyczajny Politechniki Wrocławskiej

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Stanisława HOŻYNIA

p.t. „ZASTOSOWANIE STEREOSKOPOWEGO SYSTEMU WIZYJNEGO W PROECSIE STEROWANIA BEZZAŁOGOWYM POJAZDEM PODWODNYM"

Rozprawa doktorska mgr inż. Stanisława Hożynia pod tytułem „Zastosowanie stereoskopowego systemu wizyjnego w procesie sterowania bezzałogowym pojazdem podwodnym" została wykonana na podstawie pisma Dziekana Wydziału Mechaniczo-Elektrycznego Akademii Marynarki Wojennej z dnia 01.03.2018.

Przedstawiona mi do recenzji rozprawa zawiera siedem rozdziałów, wykaz literatury oraz pięć dodatków. Przedstawiona została na 167 stronach, z czego 148 stron to treść części zasadniczej rozprawy. Wykaz zacytowanej literatury liczy 158 pozycji.

W początkowym, rozdziale zatytułowanym „Wprowadzenie", autor przedstawił genezę badanego problemu, opisując typy bezzałogowych pojazdów podwodnych, obszary ich zastosowań oraz pokładowe wyposażenie pomiarowe. W dalszej części skoncentrował się na analizie układów wizyjnych stosowanych w tych pojazdach, odwołując się do własnych doświadczeń ze zrealizowanych wcześniej projektów. Przedstawił także pokrótce zwartość poszczególnych rozdziałów pracy oraz sprecyzował tezę pracy jako: „Zastosowanie stereoskopowego systemu wizyjnego umożliwi automatyzację procesu sterowania ruchem bezzałogowego pojazdu podwodnego przy realizacji zadań utrzymywania ustalonej odległości od dna morskiego oraz ustalonej prędkości pływania przy zadanym kursie". Wyznaczył także cele cząstkowe badań jako:

- „Opracowanie modelu matematycznego pojazdu podwodnego.
- Opracowanie algorytmu pomiaru prędkości bezzałogowego pojazdu podwodnego oraz jego odległości od dna morskiego.
- Synteza regulatora rozmytego.
- Badania symulacyjne oraz badania na obiekcie rzeczywistym."

Do tej części pracy wkradł się pewien błąd. Na stronie 7 autor wprowadza skrótową nazwę urządzenia IMU określając je jako „jednostka nawigacji inercjalnej". Nie jest to poprawna nazwa, gdyż typowe IMU (Inertial Measurement Unit) są zespołem czujników inercyjnych – przyspieszeniomierzy i giroskopów, nie wyznaczających pozycji ani parametrów ruchu obiektu, a jedynie dostarczających danych do takich obliczeń. Jednostki nawigacji inercjalnej, jak nazywa to autor, określane są w literaturze i praktyce realizacji takich układów, jako INS (Inertial Navigation Systems) i oprócz czujników zawierają także układy przeliczające dane dostarczane przez czujniki na konkretne dane nawigacyjne: położenie geograficzne, wysokość lub głębokość oraz parametry ruchu obiektu: prędkości i przyspieszenia.

Rozdział 2 zatytułowany „Model matematyczny pojazdu podwodnego" autor rozpoczyna od wprowadzenia w metodykę modelowania ruchu pojazdów podwodnych i przedstawia przyjęte przez siebie założenia dla tworzonego modelu matematycznego wybranego do badań pojazdu klasy micoROV – VideoRay Pro 4.

W dalszej części rozdziału autor opisuje szczegółowo proces tworzenia modelu pojazdu oraz jego ostateczny efekt. Podczas opracowania modelu pędników stwierdzono niestabilność pracy silników krokowych dla małych prędkości, kluczowych dla planowanych badań. Doktorant opracował więc inną metodę sterowania pędnikami przy małych prędkościach ruchu pojazdu, eliminującą to zjawisko. Opracowane modele matematyczne pojazdu i jego istotnych dla badań modułów, zostały zweryfikowane za pomocą badań eksperymentalnych pojazdu przeprowadzonych w warunkach laboratoryjnych. W pracy przedstawiono szczegółowo sposoby prowadzenia tych testów oraz uzyskane wyniki.

Przeprowadzone testy weryfikacyjne modeli pojazdu i jego istotnych dla badań modułów wykazały poprawność stworzonych przez Doktoranta modeli oraz ich elastyczność i wysoką przydatność do prowadzenia dalszych badań. Należy tu podkreślić, że podczas tych testów wykorzystano wizyjny system pomiarowy, stworzony dla celów niniejszej pracy.

Rozdział 3, zgodnie ze swoim tytułem „Właściwości optyczne środowiska wodnego", zawiera krótkie wprowadzenie w zagadnienie akwizycji obrazów w środowisku wodnym. Szczególnie istotne są tu zjawiska utrudniające identyfikację obiektów podwodnych w kanale wizyjnym pojazdu podwodnego. Autor podzielił te zjawiska na dwie grupy:

- wpływające negatywnie na jakość odbieranych obrazów (zdjęć, obrazów video),
- wpływające negatywnie na odwzorowanie perspektywy.

Służy to dobraniu odpowiednich metod kompensacji tych oddziaływań na jakość zobrazowania scen podwodnych, niezbędnych do sterowania pojazdem. Autor, po analizie czynników zakłócających, przyjął do zastosowania metodę kompensacji wpływu środowiska wodnego wykorzystującą cyfrowe przetwarzanie obrazów. Dzięki temu uniezależnił się od charakterystyk akwenu i mógł opracować układ sterowania z wykorzystaniem informacji obrazowych niezależny od typu i charakterystyk akwenu. Doktorant wybrał także metodę kalibracji w celu określania geometrii układów optycznych kamer i wyznaczania współczynników zniekształceń obrazów przez nie przekazywanych.

Rozdział 4 „Przetwarzanie obrazów cyfrowych" poświęcony jest podstawom teoretycznym oraz metodom przetwarzania obrazów. Autor dokonuje selekcji metod przydatnych do przetwarzania obrazów scen podwodnych, charakteryzujących się niską kontrastowością i małą szczegółowością. Ponadto, idąc z najnowszymi trendami w tej dziedzinie, zajmuje się algorytmami detekcji, opisu i porównywania punktów charakterystycznych obrazów oraz zmianami ich położeń na kolejnych scenach.

Kolejna część rozdziału poświęcona została metodom wstępnego przetwarzania obrazów podwodnych. Omówiono tu badania wstępne przeprowadzone w celu określenia technik przetwarzania obrazów, które mają największy wpływ na liczbę wykrywanych punktów charakterystycznych, a więc także na stopień złożoności obliczeniowej.

W części końcowej rozdziału autor przedstawił wyniki dogłębnej analizy efektywności metod dopasowania punktów charakterystycznych pod względem możliwości wyznaczania parametrów ruchu pojazdu podwodnego. Rozdział kończy omówienie przeprowadzonego eksperymentu, na podstawie którego Doktorant wybrał najlepszą metodę cyfrowego przetwarzania obrazów maksymalizującą liczbę

wykrywanych punktów charakterystycznych, przy utrzymaniu rozsądnego czasu przeprowadzenia tych obliczeń. Wybrana w ten sposób metoda ORB będzie stosowana przez autora w dalszych badaniach.

Rozdział 5 zatytułowany „Synteza systemu stereoskopowego do pomiaru parametrów ruchu pojazdy podwodnego" rozpoczyna przedstawienie podstaw przetwarzania obrazów stereoskopowych dla potrzeb sterowania ruchem pojazdu podwodnego.

Kolejny podrozdział zawiera opis modelu kamery perspektywicznej, stosowanej w badaniach oraz charakterystyki jej parametrów wewnętrznych i zewnętrznych. Podano tu także algorytmy przekształceń rzutowych obrazów jakie stosowano w badaniach oraz kalibracji kamery.

Dalsza część rozdziału zawiera opis podstaw akwizycji obrazów za pomocą układu stereoskopowego kamer. Oprócz rozważań teoretycznych Doktorant przedstawił także eksperyment przeprowadzony w ramach badań oraz jego wyniki. Zrealizował on usunięcie zniekształceń wprowadzanych przez optykę kamer i rektyfikację całego zestawu stereowizyjnego w warunkach laboratoryjnych.

Następny podrozdział autor poświęcił opisowi algorytmu pomiaru prędkości pojazdu podwodnego i jego odległości od dna morskiego oraz weryfikacji eksperymentalnej algorytmów przyjętych do sterowania ruchem pojazdu podwodnego. Podczas badań porównywano prędkość postępową pojazdu, jego kurs i odległość od obiektu podwodnego, jakim było w tym przypadku dno basenu laboratoryjnego. W ramach obszernych badań laboratoryjnych Doktorant zweryfikował algorytmy pomiaru wymienionych parametrów ruchu pojazdu oraz zaproponował szczegółowe rozwiązania układów realizujących pomiary tych parametrów. W następnej części rozdziału autor przedstawił analizę wpływu parametrów zestawu stereowizyjnego na proces sterowania ruchem pojazdu podwodnego. Doktorant przeprowadził tu szczegółową analizę parametrów geometrycznych zestawu stereowizyjnego, w celu określenia doboru tych parametrów zapewniających maksymalną widoczność analizowanych scen tak dla obrazów stereopary jak i dla obrazów pozyskiwanych przez układ akwizycji podczas ruchu pojazdu. Przedstawiono tu także obszerne badania dokładności pomiaru odległości w zależności od wartości parametrów układu stereowizyjnego i odległości od przedmiotu. Analogiczne badania przeprowadzono także dla parametru widoczności obrazu.

Na podstawie tych badań autor doszedł do szeregu ciekawych wniosków, popartych przedstawionymi wynikami eksperymentu. Pozwoliło to wyznaczyć najlepsze parametry zestawu stereowizyjnego dla warunków prowadzonych badań i możliwości ruchowych badanego pojazdu. Zaprezentowana metodyka pozwala na uzyskanie takich informacji dla innych zestawów stereowizyjnych oraz innych typów pojazdów podwodnych, z uwzględnieniem warunków prowadzonych badań czy też eksploatacji.

W rozdziale 6, pod tytułem „Synteza układu sterowania pojazdem podwodnym VideoRay Pro 4", autor przedstawia założenia do tej syntezy oraz przyjmuje do zastosowania dwa typy regulatorów: PID oraz rozmyty PD. Następnie przeprowadza syntezę regulatora PID oraz rozmytego PD typu Mamdaniego-Zadeha, uzyskując w obu przypadkach skuteczne sterowanie ruchem pojazdu podwodnego, zgodne z założeniami.

Przedstawione wyniki badań symulacyjnych w środowisku Matlab Simulink, a także badania eksperymentalne przeprowadzone w basenie laboratorium wskazują na większą skuteczność metody stereowizyjnej sterowania ruchem pojazdu podwodnego niż dla metody referencyjnej, stosowanej dla pojazdów nie posiadających sensorów umożliwiających zamknięcie pętli sprzężeń zwrotnych. Przeprowadzone przez autora obszerne badania eksperymentalne potwierdziły to zarówno dla opracowanego systemu sterowania jak i metody referencyjnej, dla regulacji programowej i stałowartościowej. Autor przeanalizował możliwe przyczyny przewagi zaproponowanego układu sterowania w stosunku do metody referencyjnej, która i tak ma ograniczenia zastosowania w stosunku do opracowanej przez Doktoranta.

Na podstawie uzyskanych wyników można jednoznacznie stwierdzić, że opracowana metoda sterowania ruchem pojazdu podwodnego za pomocą stereoskopowego systemu wizyjnego umożliwia sterowanie tym ruchem w trybie automatycznym. Zakresy tej automatyzacji autor określa jako utrzymanie stałej odległości od dna morskiego oraz utrzymanie prędkości postępowej przy zadanym kursie.

Ostatni, 7 rozdział zatytułowany jest „Podsumowanie" i zgodnie ze swoim tytułem zawiera uogólnione wnioski dotyczące osiągnięcia zakładanych szczegółowych celów naukowych, planowane dalsze badania i kierunek rozwoju zaproponowanej metody.

W tym miejscu należy stwierdzić, że autor zrealizował w pełni założone badania osiągając planowane cele naukowe.

Praca została napisana jasno i zwięźle, bez niepotrzebnych komentarzy. W treści pracy pojawia się kilka nieistotnych błędów redakcyjnych, które nie zaburzają zrozumienia myśli autora oraz nie umniejszają wysokiej oceny merytorycznej przedstawionej mi do oceny rozprawy doktorskiej. Oceniam jej poziom jako bardzo dobry i spełniający w całym zakresie wymagania stawiane przed rozprawami doktorskimi. Autor w pełni wykazał się umiejętnością formułowania celu naukowego badań, znajomością metodyki prowadzenia badań naukowych oraz zdolnością do wyciągania wniosków, popartą znajomością wiedzy w obszarach objętych przedstawioną rozprawą.

Na tej podstawie wnioskuję o dopuszczenie autora do publicznej obrony przedstawionej pracy jako rozprawy doktorskiej.

Ze względu na istotną nowość, jaką jest zastosowanie zaproponowanego stereoskopowego systemu wizyjnego do sterowania ruchem pojazdu podwodnego w trybie automatycznym, a także opracowanie metodyki oraz procedur realizacji tego systemu, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgra inż. Stanisława Hożynia.

Dr hab. inż. Cezary Szczepański
Profesor Nadzwyczajny Politechniki Wrocławskiej