

Dr hab. inż. Paweł Flaszynski, prof. IMP PAN
Zakład Aerodynamiki
Instytut Maszyn Przepływowych
im. Roberta Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk
Tel: 58 6995 268
E-mail: pflaszyn@imp.gda.pl

Gdańsk, 2022-10-11

Recenzja pracy doktorskiej

mgr inż. Kamili Stryniewicz

pt.: „Autonomous Underwater Vehicle Dynamics and Predictions of
AUV's Hydrodynamic Characteristic Based on Surrogate Model”

Recenzja pracy doktorskiej została przygotowana na podstawie decyzji Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Politechniki Warszawskiej oraz pisma, nr RNDIM/521/26/2022 z dnia 13.06.2022, przesłanego przez Pana prof. dr hab. inż. Roberta Sitnika, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna.

1. Charakterystyka pracy i uwagi ogólne

Praca doktorska Pani mgr inż. Kamili Stryniewicz została w języku angielskim i zgodnie z tytułem koncentruje się na modelowaniu autonomicznego statku podwodnego. Autonomiczne statki podwodne (AUV) wzbudzają w ostatnich latach coraz większe zainteresowanie i są coraz szerzej stosowane w misjach podwodnych daleko wykraczających poza możliwości człowieka. Oceany pokrywają 71% powierzchni Ziemi, a obszar ok. 12% tej powierzchni jest pokryty lodem przez cały rok lub jego część, co dodatkowo utrudnia jego eksplorację. Ze względu na zmiany klimatu, monitorowanie stanu oceanów było w ostatnich latach przedmiotem wielu projektów badawczych. Odnotowano istotne postępy w rozwoju metod monitorowania wód otwartych, ale obszary podbiegunowe pokryte lodem pozostają znacznie gorzej zbadane z powodu ograniczeń technicznych. Brak danych utrudnia lub uniemożliwia formułowanie modeli prognostycznych. Z tego powodu dotychczasowa wiedza na temat interakcji między oceanem a lodem oraz wykrywania sygnałów zmian klimatycznych w obszarach okołobiegunowych jest ograniczona. Ze względu na podstawową cechę statków autonomicznych, czyli ich niezależność, można zrezygnować z konieczności wykorzystania dedykowanego statku niezbędnego do nadzorowania prac załogowych statków podwodnych.

Autonomiczne statki podwodne są wykorzystywane do prowadzenia misji wojskowych, komercyjnych oraz w realizacji prac badawczych. Przykładem mogą być prace związane z instalacją morskich obiektów, przemysłem wydobywczym, które wymagają inspekcji podwodnych, pobierania próbek i monitorowania obszarów przybrzeżnych, czy już wspomnianych pomiarów środowiskowych. Statki bezzałogowe są w stanie przebywać pod wodą przez długi czas wykonując podwodne misje przy niższych kosztach w porównaniu do statków załogowych.

Zapotrzebowanie na tego typu statki wzrasta wraz z intensywnym rozwojem morskiej energetyki wiatrowej, koniecznością prowadzenia badań podwodnych w fazie planowania i przygotowania inwestycji, budowy konstrukcji wsporczych, a także monitorowania w trakcie

wielu lat eksploatacji. Należy jednak podkreślić, że autonomiczne operowanie AUV w rozległym, nieznanym i dynamicznym środowisku podwodnym jest procesem skomplikowanym zwłaszcza, gdy statki muszą szybko reagować na zmienne warunki środowiskowe. Autonomiczny charakter statków AUV stanowi wyzwanie dla systemów naprowadzania, nawigacji i sterowania obiektem. Niezawodne zasilanie, precyzyjne określanie pozycji i skuteczna komunikacja to kluczowe wymagania stawiane autonomicznym pojazdom podwodnym (AUV) biorącym udział w długotrwałych misjach naukowych lub operacjach poszukiwawczych. Sterowanie ruchem bezzałogowego statku podwodnego wymaga wykorzystania zaawansowanych modeli, które umożliwią odpowiednio szybką reakcję układu na zmiany warunków przepływu lub środowiskowych w jego otoczeniu.

Teza pracy doktorskiej została sformułowana następująco: Włączenie zastępczego modelu oddziaływania hydrodynamicznego do modelu matematycznego ruchu AUV może zaowocować dokładniejszym, ale wciąż wydajnym obliczeniowo narzędziem do przewidywania dynamiki AUV i jego charakterystyk (tłumaczone z języka angielskiego: *Incorporation of the surrogate model of hydrodynamic interaction into the mathematical model of AUV's motion can result in more accurate yet still computationally efficient tool for predicting the AUV's dynamics and performance*).

Wobec powyższego można stwierdzić, że wybrana tematyka ma istotne znaczenie poznawcze i aplikacyjne oraz spełnia kryteria prac w ramach dyscypliny „inżynieria mechaniczna”.

Doktorantka wyszczególniła kilka celów pracy:

- 1) wyprowadzenie równań ruchu (tłumaczone z języka angielskiego: *derivation of equation of motion*),
- 2) budowa modeli obliczeniowych CFD i zdefiniowanie przypadków referencyjnych dla modelu zastępczego/uproszczonego (surrogate model)
- 3) budowa modeli zastępczych w oparciu o sieci neuronowe (ANN – *artificial neural network*) i przygotowanie przypadków wykorzystywanych w procesie „uczenia”
- 4) włączenie zastępczego modelu sił i momentów hydrodynamicznych do pełnego (*complete*) modelu dynamiki AUV
- 5) implementacja modelu w środowisku Matlab i wykonanie obliczeń.

Praca doktorska Pani mgr inż. Kamili Stryniewicz została zredagowana na 121 stronach. Materiał diskutowany w pracy ujęto w 12 rozdziałach, gdzie ostatni jest spisem literatury zawierającym 58 pozycji. Pierwszy rozdział poprzedzony jest spisem rysunków i tabel wykorzystanych w pracy. Spis zawiera także listę załączników, których treść zamieszczonych na ostatnich 21 stronach pracy.

W pierwszym rozdziale „Introduction” Doktorantka przedstawia ogólne informacje i historię rozwoju statków podwodnych. Kolejne dwa rozdziały, „Research objective and hypothesis” oraz „Applied research methodology and content of the thesis” prezentują przedstawioną powyżej tezę pracy, jej cele, a także poszczególne elementy realizowanej pracy. Oba rozdziały zajmują w sumie ok. 1.5 strony i ze względu na ich treść można było je scalić w jeden.

Przegląd literatury został przedstawiony w kolejnym rozdziale. W bardzo zwięzłym przeglądzie, bo ok. 1.5 strony, Doktorantka koncentruje się na dostępnych metodach i modelach wykorzystywanych do analizy ruchu statków podwodnych, podkreślając konieczność integracji różnych metod modelowania przepływu i wykorzystania możliwości sieci neuronowych. Wykorzystanie zalet różnych modeli umożliwia budowanie metod umożliwiających szybkie wyznaczanie wartości sił i momentów działających na statek podwodny i budowanie odpowiednich systemów sterowania. W tej części wymienione są możliwości metod RANS

(Reynolds Averaged Navier Stokes) i zastosowania technik „sliding mesh”. Do tego typu zagadnień mogą być z sukcesem stosowane metody obliczeniowe oparte na siatkach typu „chimera”, co nie zostało wspomniane w przeglądzie literatury. Doktorantka na wstępie pisze, że badania i rozwój autonomicznych statków podwodnych są prowadzone od dwóch dekad i intensywnie się rozwijają. Wobec tego stwierdzenia zastanawiające jest dlaczego większość cytowanych publikacji jest z okresu do 2014 roku, a jedynie kilka nowszych prac. Przyznam, że zastanawia także brak przywołania prac prowadzonych w Katedrze Technik Głębinowych Politechniki Gdańskiej, gdzie projektowano i prowadzono badania statków podwodnych.

W rozdziale piątym została przedstawiona klasyfikacja bezzałogowych statków podwodnych, co umożliwi zapoznanie się z rodzajem stosowanej nawigacji, napędu, kształtu kadłuba, czy zakresu masy całkowitej. Z kolei rozdział szósty „Autonomous Underwater Gliders” (AUG) zawiera interesujące informacje dotyczące statków podwodnych bez klasycznego napędu, czyli tzw. podwodnych szybowców. Przedstawione są przykłady zastosowań oraz scharakteryzowane metody wydłużania misji, czyli czasu przebywania pod wodą. Przedstawione są także przykłady konstrukcji szybowców podwodnych.

W rozdziałach 7 i 8, została przedstawiona geometria analizowanego bezzałogowego szybowca podwodnego, model obliczeniowy oraz wyniki obliczeń. Obliczenia wykonano programem Ansys Fluent 18.2 z modelem turbulencji SST k- ω . Opisując cechy modelu turbulencji Doktorantka odwołuje się do strony internetowej. Strona cfid-online.com, zawiera szereg wartościowych informacji, ale w pracy doktorskiej warto przywołać publikacje źródłowe. Wyniki obliczeń przedstawiono na rys. 24-32 w postaci rozkładu ciśnienia absolutnego, wartości prędkości i wektorów prędkości dla kątów napływu i prędkości przepływu. Niestety wyniki nie są w żaden sposób omówione, czy skomentowane, co szczególnie byłoby przydatne w przypadku wektorów prędkości, gdzie widoczne są różnice pomiędzy poszczególnymi przypadkami, ale czytelnik pozostaje sam w interpretacji obrazu.

Kolejne 3 rozdziały, 9 – 11 zawierają opis zastosowanej metody sieci neuronowych, szczegóły modelu opisującego ruch podwodnego szybowca w płaszczyźnie pionowej i na końcu wyniki przeprowadzonych symulacji po wcześniejszym opracowaniu procedury w programie Matlab. Obliczenia z wykorzystaniem sieci neuronowych zostały wykonane programem Alyuda NeuroIntelligence. W pracy przedstawiono cechy metody i procedury obliczeniowej. Ze względu na ograniczoną licencję obliczenia umożliwiły wyznaczenie tylko siły oporu przy założeniu czterech zmiennych parametrów: prędkości, liczby Reynoldsa i dwóch kątów napływu. W świetle tych ograniczeń można dyskutować, czy stwierdzenie na wstępie rozdziału 9 o satysfakcjonującej dokładności przewidywania reakcji hydrodynamicznych w szerokim zakresie ruchu statku nie jest zbyt optymistyczne. Nasuwa się pytanie o dokładność przewidywania np. pozostałych składowych sił i momentu. W rozdziale 10 zostały przedstawione i omówione równania ruchu umożliwiające modelowanie podwodnego szybowca. Doktorantka charakteryzuje poszczególne człony sił działających na pływający obiekt. Jednym z celów pracy jest „wyprowadzenie równań ruchu”, ale przyznam, że trudno zorientować się co oznacza to stwierdzenie, czy nie powinno być „przekształcenie istniejących równań i ich późniejsza implementacja w środowisku Matlab”. Dodatkowo, czytelność rozdziału można byłoby poprawić dodając spis symboli. Wyjaśnienie wielu z nich jest w tekście, ale zdarzają się symbole podwójnego znaczenia jak np. w równaniu (27), gdzie jest symbol gęstości. Na rys. 44-47 pokazane są współczynniki siły nośnej, oporu i momentu uzyskane w wyniku obliczeń programem Ansys Fluent. Widoczny jest brak wpływu prędkości na wartości poszczególnych współczynników przy różnych kątach napływu. Niewielka zmiana jest widoczna przy kącie ok. 25 stopni. Brakuje komentarza co powoduje taki przebieg krzywych. Czy w tym obszarze jest oderwanie lub strefa recyrkulacji przepływu? Czy ona pojawia się dopiero przy kącie 25 stopni?

W ostatnim rozdziale Doktorantka zamieściła wyniki obliczeń w postaci wykresów prędkości, położenia i działających sił na podwodny szybowiec w funkcji czasu. Obliczenia zostały wykonane dla ruchu w płaszczyźnie XZ. Dane wejściowe są określone w oparciu o wyniki obliczeń programem Ansys Fluent. Na wykresach przedstawiono wyniki dla prędkości 1.5 m/s, ale obliczenia wykonano także dla różnych prędkości w zakresie 0.5 do 1.5 m/s, przy czym w pracy nie ma tych wyników. Wykresy prezentują interesujące wyniki, ale niestety brak jest dyskusji tych wyników i przyczyn zmienności przedstawionych wielkości. Interpretację wyników i porównanie przypadków, na przykład wpływ kąta *pitch*, ułatwiłoby zamieszczenie krzywych dla stanu $W < B$ lub $W > B$ na jednym wykresie. To tylko przykład, ale dowolna konfiguracja krzywych (przypadków) poprawiłaby czytelność i łatwiejsze zrozumienie wyników.

Podsumowanie i wnioski są zamieszczone w rozdziale bez numeru „Summary and Outlook”, który jest dość krótki i zawiera ogólnikowe stwierdzenia. Praca koncentruje się na integracji metod obliczeniowych i sieci neuronowych, więc trudności z tym związane i zalety takiego podejścia powinny być uwypuklone i szerzej podsumowane.

2. Uwagi szczegółowe

Poza ogólnymi uwagami i komentarzami w pierwszej części recenzji nasuwają się poniższe spostrzeżenia i pytania.

1. Siatka obliczeniowa (rys.16-18) została zagęszczona przy ścianie tak, aby y^+ był mniejszy od 1. Proszę o podanie ilości elementów wewnątrz warstwy i pokazanie przykładowego profilu prędkości w połowie długości kadłuba. Czy w całym zakresie warstwy przyściennej ilość elementów jest odpowiednia?
2. Wymiar obszaru obliczeniowego w kierunku Y jest $2.6L$. Czy odległość opływającego obiektu od warunków „symmetry” nie jest zbyt mała? Proszę o pokazanie prędkości (jak na rys. 26) dla kąta 24° w widoku z całym obszarem obliczeniowym.
3. Wykres współczynnika ciśnienia C_p na rys. 23 przypuszczalnie jest przedstawiony dla wszystkich elementów powierzchni kadłuba, a przez to jest nieczytelny. Proszę o pokazanie rozkładu na górnej i dolnej powierzchni wzdłuż krzywej w płaszczyźnie symetrii, co ułatwi interpretację wykresu.
4. Na str. 50 podano, że danymi wejściowymi są „velocity, Reynolds number, pitch and yaw angle”. Czym różni się wpływ prędkości od liczby Reynoldsa w tym przypadku? Czy zmienia się wymiar obiektu pływającego?
5. Na rys. 38 i 39 pokazano wyniki dla 0.8 m/s. Czy można pokazać podobne krzywe dla prędkości 1.5 m/s?
6. Ze względu na ograniczoną licencję Alyuda NeuroIntelligence obliczenia wykonano dla czterech parametrów wejściowych i siły oporu jako wynik. Czy były wykonywane obliczenia dla innej konfiguracji danych wejściowych/wyjściowych? Czy podobne obliczenia wykonano dla siły nośnej albo momentu? Jeśli tak, to jaka jest zgodność?
7. Wyniki na rys. 44-47 wskazują na brak wpływu prędkości. Proszę o wyjaśnienie z czego to wynika?
8. Na rys. 50 przedstawiono położenie statku w trakcie zanurzania. Co oznacza obszar zaznaczony niebieską linią między 7 i 9 s?
9. Na rys. 51-70 pokazano krzywe reprezentujące zmianę wybranych wielkości w trakcie zanurzania lub wypływania będące wynikiem obliczeń w Matlabie. Model był budowany w oparciu o wyniki obliczeń przepływu trójwymiarowego, stacjonarnego. Proszę o

wyjaśnienie w jaki sposób można zweryfikować poprawność przewidywanych zmian w czasie?

10. Na rysunkach (51-60) wyniki przedstawione dla zanurzania lub wypływania wskazują na symetrię rozwiązania, tzn. wartości bezwzględne przedstawionych wielkości są bardzo zbliżone, różnią się znakiem (siły, moment, *pitch rate*). Pewne różnice widoczne są w przypadku momentu i prędkości wychylenia. W przypadku „pitching up 24 deg” sytuacja jest podobna za wyjątkiem sił, w szczególności składowej Z. Przebieg momentu jest zbliżony w obu przypadkach. Proszę o wyjaśnienie tych podobieństw/różnic.

Ponadto w pracy dostrzeżono pewne błędy edytorskie lub brak odwołania do rysunków w tekście, np.:

- brak numeru rysunku na str. 37, albo rysunek jest częściowo na str. 37 i 38,
- brak odniesienia w tekście do rys. 36, do rys. 37 brak komentarza,
- brak odwołania w tekście do rys. 43,
- na str. 43 powinno być „hydrodynamic characteristics”, nie „aerodynamic characteristics”
- nasuwa się wątpliwość, czy tytuł rozdziału 11.3.1 “Vertical plane dynamics” jest poprawny.

3. Podsumowanie

Podsumowując recenzowaną pracę uważam, że Pani mgr inż. Kamila Stryniewicz przedstawiła interesującą pracę, zbudowała model i opracowała program obliczeniowy umożliwiający analizę ruchu autonomicznego statku podwodnego. Rozwiązanie takiego zagadnienia jest istotne ze względu na potrzebę skutecznego modelowania i przewidywania ruchu autonomicznych statków podwodnych w trudno dostępnych obszarach. Wprawdzie wyniki obliczeń zostały przedstawione dość skrótowo, ale z pewnością są inspiracją dla dalszych badań prowadzących do rozwoju modelu, a w przyszłości poprawy sterowania tymi obiektami. Pracę oceniam pozytywnie, ale przed publiczną obroną proszę o przesłanie odpowiedzi na sformułowane pytania.

Uważam, że praca doktorska Pani mgr inż. Kamili Stryniewicz pt.: „Autonomous Underwater Vehicle Dynamics and Predictions of AUV's Hydrodynamic Characteristic Based on Surrogate Model”” odpowiada warunkom określonym w Ustawie o Stopniach Naukowych i Tytule Naukowym stawiane rozprawom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie jej do publicznej obrony.

