



Title	Research on Maneuverability Estimation of Autonomous Underwater Vehicle Based on CFD Results of Non-Inertial Coordinate System and Feedforward Neural Network
Author(s)	産, 斯瑜
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/98791
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

Abstract of Thesis

Name (CHAN SIYU)

Title

Research on Maneuverability Estimation of Autonomous Underwater Vehicle Based on CFD Results of Non-Inertial Coordinate System and Feedforward Neural Network (非慣性座標系のCFD結果とフィードフォワードニューラルネットワークに基づく自律型水中ロボットの操縦性推定に関する研究)

Abstract of Thesis

In the realm of expanding resource demands, autonomous underwater vehicles (AUVs) have emerged as groundbreaking assets for ocean exploration. This doctoral research addresses challenges in AUV maneuverability by proposing novel solutions to advance AUV hydrodynamics studies. A new approach employing a non-inertial reference framework within computational fluid dynamics (CFD) was introduced, effectively mitigating grid deformation issues and substantially improving computational efficiency. Traditional studies rely on extensive simulations with dynamic grid systems, often leading to accuracy and efficiency compromises. The proposed methodology integrates Euler, Lagrangian, and centrifugal force terms into the Navier-Stokes equations, ensuring comparable accuracy to dynamic grid-based methods while enhancing efficiency.

Building on this innovative non-inertial frame-based solver, a suite of AUV motion models was developed using hydrodynamic force coefficients obtained from drag tests. To accurately compute the AUV's hydrodynamic response in static water under various conditions, an output model for thrusters was introduced. Recognizing the need to further simplify and accelerate the research process, a machine learning system based on a feedforward neural network (FNN) was applied. This system was trained to link six-degree-of-freedom independent motion modes with their corresponding hydrodynamic responses, effectively replacing traditional hydrodynamic simulations. This approach not only reduced the research cycle but also simplified the process while maintaining accuracy, making it highly suitable for industrial applications in AUV hydrodynamics.

Chapter 1 outlines the foundational background and pertinent prior research relevant to this study, providing a comprehensive context for the subsequent investigation. It delineates the methodological framework and objectives of the current research endeavor.

Chapter 2 delves into the development of a CFD solver within a non-inertial coordinate system. It provides a comprehensive overview of the mathematical foundations, including the composite theorem of velocity and acceleration, as well as the fluid momentum and continuity equations. The chapter also discusses the solver's structure and presents verification results from various simulations, highlighting its correctness and effectiveness.

Chapter 3 focuses on evaluating AUV maneuverability using the newly developed non-inertial coordinate system-based solver and the Hydrodynamic Force Coefficients (HFC) method. This chapter covers the mathematical foundations, model setup, and the results from CFD and motion simulations based on HFC, demonstrating the solver's capability in practical scenarios.

Chapter 4 incorporates a Feedforward Neural Network (FNN) to enhance the simulation process. It details the advantages of FNNs for nonlinear function fitting, the creation of datasets, neural network training, and the subsequent motion simulations. This chapter showcases the integration of machine learning techniques with CFD, providing a robust and efficient framework for AUV maneuverability analysis.

Chapter 5 shows the conclusion and future work. It summarizes the significant advancements presented in this research, offering practical solutions for both academic and industrial applications, and paving the way for more efficient and accurate hydrodynamic studies of AUVs.

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (CHAN SIYU)			
		(職)	氏 名
論文審査担当者	主 査	教 授	鈴木 博善
	副 査	教 授	牧 敦生
	副 査	准教授	千賀 英敬

論文審査の結果の要旨

拡大する鉱物やエネルギー資源需要の中で、水中ロボットは海洋探査のための画期的な手段として登場した。一般に、水中ロボットの建造に当たっては、その適応環境やミッションによって機体形状や搭載機器が決定されることが多く、最終的な機体形状は多様である。このような多様な形状の水中ロボットの操縦性能を推定するためには、実験的手法や数値流体力学 (Computational Fluid Dynamics; CFD) 手法が適用されることが多いが、本研究では、後者に焦点を絞る。これまでのCFDに基づく運動性能評価手法では、多くの計算設定の手間、計算リソースと計算時間が必要であることが知られており、実施には、大きな困難を有する。

本研究は、水中ロボットの流体力学的研究を推進するための新しいCFD手法を提案することにより、水中ロボットの操縦性能推定におけるこれらの困難さの解決に取り組むものである。

この手法では、CFD手法の支配方程式として非慣性系座標で定義したNavier-Stokes (NS) 方程式を用いる新しいアプローチを導入している。これは結局、機体座標系で計算を実施することとなるため、動かないメッシュを用いて水中ロボットの機体運動時の流れを表現することができる。これにより、ダイナミックメッシュ法などの動的な計算格子を用いた場合の、時間的なメッシュ変形に起因する問題点を効果的に解決し、計算効率を大幅に改善している。これまで、CFDを援用した水中ロボットの運動に関する解析手法では、ダイナミックメッシュ法を用いた大規模シミュレーションを実施する必要があり、多くの場合、計算精度と計算効率のトレードオフとなっていた。以上のように、今回提案している手法では、NS方程式に、水中ロボットの機体運動に起因するオイラー項、ラグランジュ項、遠心力項を付加し、計算を実施することで、計算メッシュを動かすことなく、ダイナミックメッシュ法など同等の精度を確保しつつ、効率性を向上させている。

この革新的な非慣性系座標でのCFD (NSソルバー) をベースに、数値的な抵抗試験から得られた流体力微係数を使用して、一連の水中ロボット運動モデルを開発している。様々な条件下で静水中の水中ロボットの流体力学的応答を正確に計算するために、スラストの数値モデルを導入している。これらをもとに、水中ロボットの運動性能推定のさらなる簡素化と高速化を目指し、フィードフォワード・ニューラル・ネットワーク (Feedforward Neural Network ; FNN) に基づく機械学習システムを適用している。このシステムは、6自由度の独立した運動モードと、それに対応する流体力学的応答をリンクさせるようにニューラルネットワークをトレーニングすることにより、従来の流体力学的シミュレーションを効果的に置き換えている。このアプローチは、研究サイクルを短縮するだけでなく、精度を維持しながらプロセスを簡素化しているため、水中ロボットに対する流体力学の産業応用に非常に適している。

第1章では、この研究に関連する基礎的な背景と関連する先行研究の概要を述べ、この研究に対する包括的な背景を提供している。すなわち、基礎的背景と関連する先行研究を概説し、本研究の包括的な背景および方法論的枠組みおよび本研究の目的を示している。

第2章では、非慣性座標系におけるCFD (NSソルバー) の開発について述べている。この章では、速度および加速度の合成定理、流体の運動量と連続の方程式を含む数学的基礎の包括的な概要を説明している。また、ソルバーの構造に

ついて説明し、様々なシミュレーションによる検証結果を示し、その正しさと有効性を示している。

第3章では、新たに開発した非慣性座標系におけるCFDの結果と、この結果から流体力微係数 (Hydrodynamic Force Coefficient ; HFC) を導出するHFC法を用いた、水中ロボットの操縦性評価に焦点を当てている。この章では、HFC法に対する数学的基礎、モデルの設定、HFCに基づくCFDと運動シミュレーションの結果について説明し、実用的なシナリオにおけるソルバーの能力を実証している。

第4章では、FNNの導入による、シミュレーションプロセスの効率向上を図っている。この章では、非線形関数のフィッティング、データセットの作成、ニューラルネットのトレーニング、およびその後の水中ロボット機体の運動シミュレーションにおけるFNNの利点について詳しく説明している。この章では、機械学習技術とCFDの統合を紹介し、水中ロボットの操縦性解析にロバストで効率的な枠組みを提供している。

第5章では、結論と今後の課題を示している。本研究で提示された重要な進歩を要約し、学術的および産業的アプリケーションの両方に実用的なソリューションを提供し、水中ロボットのより効率的で正確な流体力学的研究への道を開いている。

以上のように、本論文は、CFDによる水中ロボットの運動性能推定に対する作業量の低減、高速化および高度化を達成しており、結果的に水中ロボット建造の生産性向上に大きく貢献することが期待できる。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。