



Title	高速滑走艇の運動モデル推定と船外機によるポーポイズの減揺制御
Author(s)	濱田, 暁
Citation	大阪大学, 2024, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/98786
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏 名 (濱 田 暁)

論文題名

高速滑走艇の運動モデル推定と船外機によるポーポイズの減揺制御

論文内容の要旨

近年、船外機の大型化が進み、エンジンが船内にあるスタンドライブを搭載していた大きさのボートに船外機を搭載することが増えてきた。この変化は、エンジンのメンテナンス性の向上や船内の居住空間の拡大につながったが、一方で船外機搭載による重心移動は艇の安定性を悪化させる悪い効果も伴った。高速滑走艇における不安定な挙動の代表例として挙げられるのが、ヒーブとピッチの連成運動であるポーポイズである。ポーポイズを低減させるため、従来ドライバーは船速を減少させて対応していたが、こうした対応は高速化したボートの性能を十分に活かしきれない。この課題に対応するため、船外機の姿勢制御によるポーポイズの低減に関する研究を実施した。

本論文は以下の6章で構成した。

第1章では、緒言として本論文の背景と目的について述べ、関連する研究を整理した。

第2章では、実機試験結果を用いた運動モデルの推定法について提案した。運動モデルは、減揺制御に用いるために、船外機の姿勢を陽に考慮していることが求められる。そこで艇体と船外機に働く力をそれぞれ定義し、それらが艇体の状態と船外機の姿勢に依存する形とした。運動モデルに含まれるシステムパラメータは実機試験結果を基に同定し、その際用いる最適化の手段として、滑らかではなく、多峰性も強い関数景観を有する問題にも適用可能なCovariance Matrix Adaption Evolution Strategy (CMA-ES)を採用した。実機試験では、対象船の船速と船外機トリムを広く変化させながらデータを取得した。推定したシステムパラメータを用いた数値シミュレーションの結果は、実機試験結果とよく一致しており、本手法の妥当性を確認できた。また、CMA-ESを用いた最適化計算に与える乱数シードの影響についても検討を行った。

第3章では、ポーポイズの安定性に関する解析を行った。線形化した運動モデルは、平衡点が不安定化すると、運動が直ちに発散する。しかし実機で生じるポーポイズは、運動が発散せず、最終的に定常状態に落ち着き、安定なリミットサイクルが生じる。本論文ではこの事実を考察するため、平衡点周りで線形化した運動モデルと、非線形な運動モデルの2つを用い、ポーポイズの安定性に関する検討を行った。その結果、線形化した運動モデルが不安定になる点で、安定な固定点が出現する事実を基に、ポーポイズがスーパークリティカルなホップ分岐によって生じることを示した。また、対象船における船外機のスラストおよびトリム角による安定性の変化を、実機試験と解析結果から考察した。さらに、実機試験において、同一条件下においても、運動の初期値に応じてポーポイズの発生と消滅が生じる結果が得られたことを説明し、それについての理論的考察も併せて示した。

第4章では、リヤブノフ安定論に基づき、船外機トリム角をアクティブに制御することで、ポーポイズを低減する制御手法を提案した。船外機のトリム角の平均値を変化させると、ポーポイズは低減するが、同時に船速も低下するため高速化の障壁となる。そこで本研究では、船外機のトリム角の平均値を維持しつつポーポイズも低減するという目標を立てて、制御手法を検討した。制御手法として、運動モデルの不確かさや非線形性に対するロバスト性を持ち、船外機のトリム角の作動特性にも適したスライディングモード制御を採用した。その結果、目標を達成できる新しいアルゴリズムを提案し、数値シミュレーションのみならず実機試験によってもその性能を検証した。

第5章では、より簡素な表現の運動モデルについて検討した。第2章で提案した運動モデルは、精緻ではあるものの、実機での計測が難しいヒーブ項についての運動方程式が含まれていた。そこでヒーブ項を省略すると同時に、運動方程式を単純な展開計算をベースに構成することで、簡易化を行った。その結果得られた運動モデルは、第2章で得た運動モデルと概ね同等の性能を有することを確認し、加えて実機試験結果との一致をも確認した。また、第4章で提案した制御器による減揺効果を有することから、船外機の挙動に対する船体の応答が、第2章の運動モデルと同等であることを確認し、簡易運動モデルの有効性を示した。

第6章では、以上の内容の総括と同時に、本研究の扱う分野の将来の発展性を展望し、本論文の結論とした。

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (濱 田 暁)			
	(職)	氏 名	
論文審査担当者	主 査	教授	牧 敦生
	副 査	教授	鈴木 博善
	副 査	教授	箕浦 宗彦
	副 査	教授	片山 徹 (大阪公立大学 航空宇宙海洋系専攻)

論文審査の結果の要旨

近年、船外機の大型化が進み、エンジンが船内にあるスタンドライブを搭載していた大きさのボートに船外機を搭載することが増えてきた。こうした変化は、エンジンのメンテナンス性の向上や船内の居住空間の拡大につながった。また、艇体形状の改良により艇の高速化や燃費の改善も進んできた。一方で船外機搭載による重心移動は艇の安定性を悪化させるという悪い効果も伴った。高速滑走艇における不安定な挙動の代表例として挙げられるのが、ヒープとピッチの連成運動であるポーポイズである。ポーポイズを低減させるため、従来ドライバーは船速を減少させて対応していたが、こうした対応は高速化したボートの性能を十分に活かしきれない。そこで、この課題に対応するため、本論文では、船外機の姿勢制御によるポーポイズの低減に関する研究を実施している。

本論文は以下の6章で構成されている。

第1章では、緒言として本論文の背景と目的について述べ、関連する研究を整理している。

第2章では、実機試験結果を用いた運動モデルの推定法について提案している。運動モデルは、減揺制御に用いるために、船外機の姿勢を陽に考慮していることが求められる。そこで艇体と船外機に働く力をそれぞれ定義し、それらが艇体の状態と船外機の姿勢に依存する形としている。運動モデルに含まれるシステムパラメータは実機試験を基に同定し、その際用いる最適化の手段として、滑らかではなく、多峰性も強い関数景観を有する問題にも適用可能なCovariance Matrix Adaption Evolution Strategy (CMA-ES) を採用している。実機試験では、対象船の船速と船外機トリムを広く変化させながらデータを取得している。このような実機試験から推定したシステムパラメータを用いた数値シミュレーション結果は、実機試験結果とよく一致しており、本手法の妥当性を示している。また、CMA-ES を用いた計算に乱数シードが与える影響についても詳細な検討を行っている。

第3章では、ポーポイズの安定性に関する解析を行っている。線形化した運動モデルは、平衡点が不安定化すると、運動が直ちに発散する。しかし実機で生じるポーポイズは、運動が発散せず、最終的に定常状態に落ち着き、安定なリミットサイクルが生じる。本論文ではこの事実を考察するため、平衡点周りで線形化した運動モデルと、非線形な運動モデルの2つを用い、ポーポイズの安定性に関する検討を行っている。その結果、線形化した運動モデルが不安定になる条件で、安定な固定点が発現する事実を基に、ポーポイズがスーパークリティカルなホップ分岐によって生じることを結論付けている。また、対象船における、船外機のスラストおよびトリム角による安定性の変化を、実機試験と解析結果からも考察している。さらに、実機試験において、同一条件下においても、運動の初期値に応じてポーポイズの発生と消滅が生じる結果が得られたことを説明し、それについての理論的考察も併せて示している。一方、数値計算におけるタイムステップの選択によっては、平衡点と固定点が併存する可能性があることも示しており、これは実機試験で生じる現象に対応している可能性を示唆している。

第4章では、リヤプノフ安定論に基づき、船外機トリム角をアクティブに制御することで、ポーポイズを低減させる制御手法を提案している。船外機のトリム角の平均値を変化させると、ポーポイズは低減するが、同時に船速も低下するため高速化の障壁となる。そこで本研究では、ポーポイズを低減すること、及び、その際に船外機のトリム角の平均

値を維持すること、という2つの目標を立てて、制御手法を検討している。制御手法として、運動モデルの不確かさや非線形性に対するロバスト性を持ち、船外機のトリム角の作動特性にも適したスライディングモード制御を採用している。その結果、2つの目標を達成できる新しいアルゴリズムを提案している。本制御アルゴリズムは、数値シミュレーションのみならず、実機試験によってもその性能を検証している。またスライディングモード制御における重要な制御設計パラメータの影響を、数値シミュレーションと実機試験により検証し、理論的な側面から考察も行っている。

第5章では、より簡素な表現の運動モデルについて検討している。運動モデルの推定方法の汎用性を検証するため、第2章で提案した運動モデルとは異なる簡易運動モデルにも適用できることを示している。第2章で提案した運動モデルは精緻ではあるものの、実機での計測が一般に難しいヒープ項についての運動方程式が含まれている。そこでヒープ項を省略すると同時に、運動方程式は単純な展開計算をベースに構成することで、簡易化を行っている。その結果得られた運動モデルは、第2章で得た運動モデルと概ね同等の性能を有することを確認し、加えて実機試験結果との一致をも確認している。また、船外機の挙動に対する船体の応答が、第2章の運動モデルと同等であることを示すため、第4章で提案した制御器による減揺効果も確認し、制御開発における簡易運動モデルの有効性を示している。これらの検証により、提案手法を他の運動モデルに対して適用できる可能性も示している。

第6章では、以上の内容を総括すると同時に、本論文の扱う分野についての将来の発展性を論じ、本論文の結言としている。

以上のように、本論文は、滑走艇の高速化の障壁となってきたポーポイズを、船型を変更するなどの流体的手段に頼ることなく、船外機のトリム角制御のみで抑制する技術の開発に成功している。運動方程式のモデリングと制御は対であり、本論文は両者について、これまでの常識にとらわれない方法でアプローチをしている。前者については、大域的な最適化に基づく運動モデルの逆推定手法を適用し、非線形現象であるポーポイズの発生と消滅をも予測できる運動モデルを推定している。この成功は、水槽試験などのコストの大きな方法に頼ることなく、高精度な運動モデルを獲得することが可能となることを示唆している。後者については、得られた運動モデルを基にしたモデルベース制御則を提案し、安定性の解析も詳細に行っている。その結果、このアルゴリズムにより、実機試験でのポーポイズの減揺制御が実現できており、この点は特筆に値する。これらの成功は、運動モデルの逆推定を基にしたモデルベース制御の今後の発展性を示唆している。この手法への有効なアプローチについての方法論を示した点で、本論文は、今後の工学の発展に対し、裨益するところ大なるものである。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。