



Title	低速操縦運動モデルを用いた非線形モデル予測制御による自動着桟操船
Author(s)	谷口, 拓也
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	VoR
URL	<a href="https://doi.org/10.18910/103225">https://doi.org/10.18910/103225</a>
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(谷口拓也)	
論文題名	低速操縦運動モデルを用いた非線形モデル予測制御による自動着桟操船
論文内容の要旨	
<p>船舶運航の安全性向上や船員の負担軽減の観点から、船舶の自動運航技術の開発が盛んに進められている。特に、複雑な操船を伴う離着桟作業の自動化は強く望まれており、その実現は船舶運用の効率化と安全性の確保に大きく寄与するものと考えられる。自動運航の実現には、センシング、通信、サイバーセキュリティなど多岐にわたる技術の統合が不可欠であるが、その中核となるのが自動制御技術である。近年、計算機速度の向上などに伴い、非線形性や多入力多出力性を考慮可能な非線形モデル予測制御（以下、NMPC（Nonlinear Model Predictive Control）という。）が応用される機会が増えている。NMPCは、システムの未来挙動を予測しながら、逐次的に最適な操作量を導出する手法である。本手法は操縦運動モデル（以下、モデルという。）の非線形性を陽に考慮でき、制御入力等の制約も直接取り扱うことができる。これらの利点は船舶の離着桟操船にも有用であると考えられる。NMPCの適用には、制御対象である船舶の操縦運動モデルが必須である。離着桟のような低速時に応するモデルについては、これまで様々な研究が行われてきた。しかし、低速時に生じるあらゆる運動を表現可能なモデルの定式化とそれを基にした体系化は、これまで行われてこなかった。この点は、自動着桟操船へのNMPC適用における技術的障壁となっていた。そこで本研究では、低速域での操船に対応可能なモデルを体系化した。その上で、このモデルを用いたNMPCによる自動着桟操船の実現可能性と制御性能の検証を行った。本論文は以下の7章で構成される。</p> <p>第1章は序論であり、研究背景と研究内容について述べた。</p> <p>第2章では、低速域において有効なモデルを新たに定式化した。本モデルは、着桟操船時に見られる大斜航や後進運動、プロペラ逆転、サイドスラスター使用などの低速時特有の複雑な挙動を適切に表現するものである。さらに、全ての船体運動状態とアクチュエータ作動条件において流体力の連続性が保たれるように設計されており、NMPCにおける最適化に適した構造を備えている。また、基本的に明示的な数式によりモデルが記述されており、今後のデータ蓄積により係数の簡易推定への応用も容易な構造となっている。</p> <p>第3章では、構築した操縦運動モデルに含まれる係数を得るために、模型船を用いた拘束模型試験を実施した。その場回頭試験、斜航旋回運動試験、停止・直進試験、荷重度変更直進操舵試験、斜航・旋回操舵試験、サイドスラスター前進速度影響試験を通じて流体力データを取得し、その結果とモデル式による計算結果を比較することで、提案モデルの妥当性を確認した。</p> <p>第4章では、構築したモデルを用いた操縦運動シミュレーションと、自由航走模型試験との比較を行い、提案モデルの妥当性を確認した。比較対象としたのは、加速旋回試験、プロペラ逆転停止試験、およびプロペラ逆転とサイドスラスターを併用した試験であり、プロペラ第1・第3・第4象限の作動状態や、斜航角が<math>0^\circ</math>から<math>180^\circ</math>となるような幅広い運動条件を含んだものとした。これらの比較を通じ、提案モデルが実用的な予測精度を有していることを示した。</p> <p>第5章では、自動着桟操船に必要な参考経路を生成する手法を開発した。本手法は、船体の力学特性やアクチュエータの出力制約を考慮した最短時間制御問題として定式化されており、現実的かつ安全な経路を数値的に導出している。また、waypointに目標船速を設定することで、高い船速上昇を抑制し、実際の運用性を高めた設計となっている。</p> <p>第6章では、第5章で構築した参考経路をNMPCにより追従させることで、自動着桟操船のシミュレーションを実施した。その結果、予測時間を適切に選定すれば高い追従精度が得られることを示した。さらに、NMPCに使用する操縦運動モデルにおいて、流体力を2倍または半分とする大きなモデル誤差を与えて着桟を達成でき、NMPCが高い頑健性を有することが示された。一方で、モデルの誤差の生じ方によっては、追従制御が困難となる例も確認し、モデルの基本的な性能・精度確保が重要であることを明らかにした。</p> <p>第7章は結論であり、本研究のまとめと今後の課題について述べた。</p>	

## 論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 ( 谷口拓也 )	
	(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 准教授 酒井 政宏

## 論文審査の結果の要旨

船舶運航の安全性向上や船員の負担軽減の観点から、船舶の自動運航技術の開発が盛んに進められている。特に、複雑な操船を伴う離着桟作業の自動化は強く望まれており、その実現は船舶運用の効率化と安全性の確保に大きく寄与するものと考えられる。自動運航の実現には、センシング、通信、サイバーセキュリティなど多岐にわたる技術の統合が不可欠であるが、その中核となるのが自動制御技術である。近年、計算機速度の向上などに伴い、非線形性や多入力多出力性を考慮可能な非線形モデル予測制御（以下、NMPC (Nonlinear Model Predictive Control) という。）が応用される機会が増えている。NMPC は、システムの未来挙動を予測しながら、逐次的に最適な操作量を導出する手法である。本手法は操縦運動モデル（以下、モデルという。）の非線形性を陽に考慮でき、制御入力等の制約も直接取り扱うことができる。これらの利点は船舶の離着桟操船にも有用であると考えられる。NMPC の適用には、制御対象である船舶のモデルが必須である。離着桟のような低速時に対応するモデルについては、これまで様々な研究が行われてきた。しかし、低速時に生じるあらゆる運動を表現可能なモデルの定式化とそれを基にした体系化は、これまで行われてこなかった。この点は、自動着桟操船への NMPC 適用における技術的障壁となっていた。そこで本研究では、低速域での操船に対応可能なモデルを体系化している。その上で、このモデルを用いた NMPC による自動着桟操船の実現可能性と制御性能の検証を行っている。本論文は以下の 7 章で構成されている。

第 1 章は序論であり、研究背景と研究内容について述べている。

第 2 章では、低速域において有効なモデルを新たに定式化している。本モデルは、着桟操船時に見られる大斜航や後進運動、プロペラ逆転、サイドスラスター使用などの低速時特有の複雑な挙動を適切に表現するものである。さらに、全ての船体運動状態とアクチュエータ作動条件において流体力の連続性が保たれるように設計されており、NMPC における最適化に適した構造を備えている。また、基本的に明示的な数式によりモデルが記述されており、今後のデータ蓄積により係数の簡易推定への応用も容易な構造としている。

第 3 章では、構築したモデルに含まれる係数を得るために、模型船を用いた拘束模型試験を実施している。その場回頭試験、斜航旋回運動試験、停止・直進試験、荷重度変更直進操舵試験、斜航・旋回操舵試験、サイドスラスター前進速度影響試験を通じて流体力データを取得し、その結果と計算結果を比較することで、モデルの妥当性を確認している。

第 4 章では、構築したモデルを用いた操縦運動シミュレーションと、自由航走模型試験との比較を行い、モデルの妥当性を確認している。比較対象としたのは、加速旋回試験、プロペラ逆転停止試験、およびプロペラ逆転とサイドスラスターを併用した試験であり、プロペラ第 1・第 3・第 4 象限の作動状態や、斜航角が  $0^\circ$  から  $180^\circ$  となるような幅広い運動条件を含んだものとしている。これらの比較を通じ、モデルが実用的な予測精度を有していることを示している。

第 5 章では、自動着桟操船に必要な参考経路を生成する手法を開発している。本手法は、船体の力学特性やアクチュ

エータの出力制約を考慮した最短時間制御問題として定式化されており、現実的かつ安全な経路を数値的に導出している。また、参照点に目標船速を設定することで、急な船速の変化を抑制し、実際の運用性を高めた設計となっている。

第6章では、第5章で構築した参照経路をNMPCにより追従させることで、自動着桟操船のシミュレーションを実施している。その結果、予測時間を適切に選定すれば高い追従精度が得られることを示している。さらに、NMPCに使用するモデルにおいて、流体力を2倍または半分とするような大きなモデル誤差を与えることでも着桟を達成でき、NMPCが高い頑健性を有することを示している。一方で、モデルの誤差の生じ方によっては、追従制御が困難となる例も確認し、モデルの基本的な性能・精度確保が重要であることを明らかにしている。

第7章は結論であり、本研究のまとめと今後の課題について述べている。

以上のように、本論文は、自動運航技術の実現に必要な、モデルとそれを用いた制御のいずれについても、新しい方法論を提案している。前者においては、大斜航時やプロペラ逆転時など、あらゆる低速操縦運動にも対応可能な連続かつ普遍性の高いモデルを提案しており、これは船舶操縦制御分野における今後の標準にもなりうるものである。後者においては、表現力が高いモデルに対しても、ロバストかつ高い制御成績を有する制御手法を簡便に構築する方法論を提案しており、このアプローチは同じく船舶操縦制御分野の標準となることも期待される。これらのモデルと制御に対する有効な方法論を示したことは、今後の工学の発展に対して、裨益するところ大なるものと考える。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。