



Title	自動運航船の実現を加速する特殊舵と可変ピッチプロペラを組み合わせた自動制御手法
Author(s)	小池, 弘顕
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101675
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

論文内容の要旨

氏 名 (小 池 弘 顕)	
論文題名	自動運航船の実現を加速する特殊舵と可変ピッチプロペラを組み合わせた自動制御手法
論文内容の要旨 近年我が国では、内航船員不足や船員の高齢化問題、それに伴う労働環境の改善の必要性が認識されるようになった。これら船員不足問題の一方、環境負荷の低減を目指したモーダルシフトの推進も強く求められている。これらの問題の解決策として、自動運航船が注目されるようになった。自動運航技術の中でも、特に自動離着桟は、依然として解決すべき問題が多い技術の1つである。1980年代後半の時点で、既に実船実験において離着桟の自動化に成功しているが、外乱や不確実性へのロバスト性の確保についての課題が当時より指摘されている。最近、離着桟の自動化に関する研究が再び活発となり、様々な国で、実証実験が行われるようになった。それらの報告では、かねてより指摘のあった外乱やロバスト性への対応に関する問題に加え、制御に用いる操縦運動モデルの精度が浅水域等では担保されないなど、いくつかの課題が指摘されるに至った。世界初の自動離着桟制御実験から30年以上が経過した今もなお、これらの問題が、離着桟制御の自動化及び実用化の障害となっている。そこで、本研究では、操縦運動モデル、状態量推定技術及び制御技術の3つの要素技術について実用的観点から検討し、自動運航船の実現を加速する制御手法を提案することとした。 本論文は、以下の5章で構成した。 序章では、諸言として、本研究の研究背景と目的を述べ、先行研究について整理をした。 第2章では、自動離着桟制御に適用可能な、低速下の操縦運動シミュレーション用のモデルを提案した。ここでは、特にアクチュエータが発生する力のモデリングについて詳細に検討し、少数のパラメータで可変ピッチプロペラ (CPP) により発生する前後力を区分線形近似するなど、自動制御に適用しやすい簡便な操縦運動モデルを示した。提案したモデルにより、任意のプロペラ翼角での前後力や不平衡流体力を実用的精度で推定可能となり、模型船を用いた自由航走試験でも定量的な推定精度が確認した。さらに、特殊舵の1つであるベクツイン舵とCPPを組み合わせたシステムについても検討し、舵角とCPP翼角のあらゆる組み合わせについても船体に働く前後力と不平衡流体力を推定できるモデルを提案した。 第3章では、第2章で提案した操縦運動モデルを適用した状態量推定手法について検討を行った。まず、無香料カルマンフィルタ (UKF) とアンサンブルカルマンフィルタ (EnKF) の状態空間モデルにMMGモデルを適用した状態量推定手法の有用性を検討し、フィルタ選択の指針を示した。ここでは、モデル化誤差が状態量推定に与える影響を詳細に調査し、モデルの精度の重要性を明らかにした。さらに、システムノイズの共分散行列のパラメータの適切な設定が、状態量推定の精度向上に資することも改めて確認した。次に、UKFを用いて、第2章で提案した実時間処理による不平衡流体力モデルの推定を行い、モデル推定が高い精度で行うことを示した。さらに、第2章で提案したベクツイン舵とCPPを組み合わせたシステムについても、本章の手法で操縦運動モデルを推定し、時間や費用を要する拘束模型試験や大規模なCFDに頼ることなく、自動制御に必要な操縦運動モデルの構築が可能となった。 第4章では、第2章と第3章で提案した手法を基に、実時間最適制御手法の1つであるC/GMRES法を用いた低速操縦下の自動制御手法を提案した。ベクツイン舵とCPPを組み合わせたシステムは、発生させる力の指示値に対し、アクチュエータの組み合わせが必ずしも一意ではない可能性があった。一方、そのような複数解の存在は滑らかなアクチュエータの動作を阻害するため、好ましくない。そこで、連続したアクチュエータ指示を可能とする、C/GMRES法に基づくスラストアロケーション手法を提案した。この手法では、最適化の際の評価関数に操作量のペナルティを考慮し、これをC/GMRES法でリアルタイムに最適化することで、操作量の抑制を可能とした。比較のために行ったNewton法に基づくスラストアロケーション手法と比較しても、アクチュエータの速い動作が低減され、安定した制御が行えるようになり、提案した手法の優位性を確かめられた。最後に、実システムへの適用性を見るため、大阪大学実験池における模型実験も行い、自動船位保持装置の試験などでも用いられる4-cornerテストにも成功し、本手法が実用的手法であることを確認した。 第5章では、本論文の内容を総括し、結論および今後の展望を述べた。	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏 名 (小 池 弘 顕)				
論文審査担当者	(職)		氏 名	
	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

近年我が国では、内航船員不足や船員の高齢化問題、それに伴う労働環境の改善の必要性が認識されている。これら船員不足問題の一方、環境負荷の低減を目指したモーダルシフトの推進も強く求められている。これらの問題の解決策として、自動運航船が注目されている。自動運航技術の中でも、特に自動離着陸は、依然として解決すべき問題が多い技術の 1 つである。1980 年代後半の時点で、既に実船実験において離着陸の自動化に成功しているが、外乱や不確実性へのロバスト性の確保についての課題が当時より指摘されている。最近、離着陸の自動化に関する研究が再び活発となり、様々な国で、実証実験が行われるようになってきている。それらの報告では、かねてより指摘のあった外乱やロバスト性への対応に関する問題に加え、制御に用いる操縦運動モデルの精度が浅水域等では担保されないなど、いくつかの課題が指摘されている。世界初の自動離着陸制御実験から 30 年以上が経過した今もなお、これらの問題が、離着陸制御の自動化及び実用化の障害となっている。そこで、本研究では、操縦運動モデル、状態量推定技術及び制御技術の 3 つの要素技術について実用的観点から検討し、自動運航船の実現を加速する制御手法を提案している。

本論文は、以下の 5 章で構成されている。

第 1 章では、緒言として、本研究の研究背景と目的を述べ、先行研究について整理をしている。

第 2 章では、自動離着陸制御に適用可能な、低速下の操縦運動シミュレーション用のモデルを提案している。ここでは、特にアクチュエータが発生する力のモデリングについて詳細に検討し、少数のパラメータで可変ピッチプロペラ (CPP) により発生する前後力を区分線形近似するなど、自動制御に適用しやすい簡便な操縦運動モデルを示している。提案したモデルにより、任意のプロペラ翼角での前後力や不平衡流体力を実用的精度で推定可能となり、模型船を用いた自由航走試験でもその高い推定精度を確認している。さらに、特殊舵の 1 つであるベクツイン舵と CPP を組み合わせたシステムについても検討し、舵角と CPP 翼角のあらゆる組み合わせについても船体に働く前後力と不平衡流体力を推定できるモデルを提案している。

第 3 章では、第 2 章で提案した操縦運動モデルを適用した状態量推定手法について検討を行っている。まず、無香料カルマンフィルタ (UKF) の状態空間モデルに MMG (Maneuvering Modeling Group) モデルを適用した状態量推定手法の有用性を検討し、フィルタ選択の指針を示している。ここでは、モデル化誤差が状態量推定に与える影響を詳細に調査し、モデルの精度の重要性を明らかにしている。さらに、システムノイズの共分散行列のパラメータの適切な設定が、状態量推定の精度向上に資することも改めて確認している。次に、UKF を用いて、第 2 章で提案した実時間処理による不平衡流体力モデルの推定を行い、モデル推定が高い精度で行うことを示している。さらに、第 2 章で提案したベクツイン舵と CPP を組み合わせたシステムについても、本章の手法で操縦運動モデルを推定し、時間や費用を要する拘束模型試験や大規模な CFD に頼ることなく、自動制御に必要な操縦運動モデルの構築を可能としている。

第4章では、第2章と第3章で提案した手法を基に、実時間最適制御手法の1つであるC/GMRES法を用いた低速操縦下の自動制御手法を提案している。ベクトル舵とCPPを組み合わせたシステムは、発生させる力の指示値に対し、アクチュエータの組み合わせが必ずしも一意ではない可能性があった。一方、そのような複数解の存在は滑らかなアクチュエータの動作を阻害するため、好ましくないと考えられる。そこで、連続したアクチュエータ指示を可能とする、C/GMRES法に基づくスラストアロケーション手法を提案している。この手法では、最適化の際の評価関数に操作量のペナルティを考慮し、これをC/GMRES法でリアルタイムに最適化することで、操作量の抑制を可能としている。比較のために行ったNewton法に基づくスラストアロケーション手法と比べ、アクチュエータの動作が滑らかな制御が実現され、提案した手法の優位性を確認している。最後に、実システムへの適用性を検証するため、大阪大学構内の犬飼池における模型実験も行い、自動船位保持装置の試験などでも用いられる4-cornerテストにも成功し、本手法が実用的手法であることを確認している。

第5章では、本論文の内容を総括し、結論および今後の展望を述べている。

以上のように、本論文は出入港頻度の高い内航船舶で採用される、可変ピッチプロペラと特殊舵を組み合わせた操縦システムについて、詳細な水槽試験により明らかにした流体特性から操縦運動モデルを構築し、それを基にした自動制御アルゴリズムの開発に成功している。計測と制御は不可分であり、両要素いずれについても提案した操縦運動モデルが有効に用いられている。加えて、外乱のある野外試験環境下で、モデル予測制御手法に基づく複雑な誘導制御を行いえたことは特筆に値する。操縦運動モデルの適度な精緻さを有するモデリングを通じ、状態量等の計測の性能を向上させ、その上で高い性能を有する制御へと結び付ける有効な方法論を示した点で、本論文は、今後の工学に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。