OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	On the Efficient Trajectory Generation and the Online Control to Realize Automatic Docking: Simulation and Experiment
Author(s)	Rachman, Dimas Maulana
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/92971
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

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

The University of Osaka

Form 3

Abstract of Thesis

Name （RACHMAN DIMAS MAULANA）	
Title	On the Efficient Trajectory Generation and the Online Control to Realize Automatic Docking: Simulation and Experiment （自動着桟制御を実現する自動経路生成とオンライン制御に関する研究）

Abstract of Thesis

This thesis addresses two most common problems that arise when discussing the automatic docking of a ship. The first problem is how to efficiently plan a safe docking trajectory (or path) when the instantaneous environment dynamics is considered and the ship's maneuvering dynamics is highly nonlinear. The second problem is how to control the ship to track/follow the given path/trajectory until stops at the final docking point.

The first problem arises when there is a need to replan a new trajectory due to some changes in the environmental dynamics, e.g., wind force. This implies the necessity of a fast planner that is able to generate an allision-free trajectory that is feasible to the dynamics of the wind. However, the nonlinear maneuvering dynamics of an underactuated ship increases the difficulties of the problem and hence the computational time. This can be attenuated by warm-starting the optimization. It is demonstrated in simulations that the balance between computational efficiency and feasibility of the solution can be achieved by the warm start; quantified by significant computational time speedups. This fast trajectory planner can be integrated into an automatic docking support system from which the shipmaster can decide whether a docking operation can be executed safely or not.

In regard to the second problem, this thesis discusses two topics: (1) a nonlinear model predictive controller (NMPC) and (2) a novel multipurpose low-speed positioning system. For the first topic, the NMPC employs a gradient-free global optimization solver known as covariance matrix adaptation evolution strategy (CMA-ES). The performance of the CMA-ES as a solver in the NMPC was tested in the simulations for trajectory tracking and path following of an underactuated ship under a constant wind disturbance. For the second topic, the thesis introduces a novel positioning system featuring a VecTwin rudder, a bow thruster, and a propeller (at a constant forward revolution). This arrangement enables the ship to execute low-speed operations (dynamics positioning/DP). This makes the positioning system suitable for automating a docking operation. This low-speed positioning system was tested in several scale model experiments where environmental disturbances exist. The performance of the system shows a promising practical implementation. The overall approach when designing the positioning system and the system itself can be an addition to the existing design of a DP system.

This thesis is organized into six chapters as follows:

Chapter 1 introduces the background, the motivation, and a general introduction of the thesis.

Chapter 2 describes the maneuvering dynamics of an underactuated ship at a low speed.

Chapter 3 discusses the first problem: an efficient and fast trajectory planner. Here the Hermite-Simpson collocation method and the point-in-polygon method that are important to generate the necessary constraints are explained. It is demonstrated that one warm start significantly reduced the computational time for the solver to converge to the local optimum in fourteen different cases. This is a huge improvement to the previous research where computational time was the biggest issue.

Chapter 4 discusses the first topic of the second problem: trajectory tracking and path following NMPC controller with CMA-ES. It is shown that with several treatments, CMA-ES can be implemented in real time. This is the first attempt to investigate the real-time implementation of CMA-ES for marine use.

Chapter 5 discusses the second topic of the second problem. It introduces the approach and the design of a novel multipurpose low-speed positioning system with VecTwin rudder. The system employs a PID controller that is practical and can results in stability. The results from several experiments are also discussed here.

Chapter 6 summarize all the main contributions of the thesis and some future work for improvement.

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名	（ RACHMAN DIMAS MAULANA ）		
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	教授	箕浦　宗彦

論文審査の結果の要旨

本論文では、船舶の自動離着桟制御の実用化に不可欠な二つの技術的課題に取り組んでいる。まず第１は、時々刻々変化する外乱下で、非線形な力学システムに支配される船舶の操縦運動を考慮したうえで、安全かつ現実的な離着桟経路を再計画する問題である。第２は、最終的な着桟点に停止するまで、第１の結果により得られた離着桟経路を安全かつ安定に追跡もしくは追従するための船舶の制御手法である。

第１の技術的課題は、離着桟経路の最適化問題である。実環境下では、風や潮流などの時々刻々変動する環境外乱が存在するため、離着桟経路を状況に応じて再計画する必要がある。このような計画手法はオンラインで機能する必要があるため、ある程度高速で演算できるものである必要がある。一方、通常船舶ではアクチュエータの能力が必ずしも十分ではなく、また力学システムも非線形であることから、そのような高速な離着桟経路の計画問題は難しいものとして考えられてきた。そこで申請者は、最適化に用いる初期推定解として、オフライン計画問題の解を用いるウォームスタートという新たな方法を提案している。そして数値計算による検証の結果、ウォームスタートが計算速度を向上させ、実行可能解が得られやすくなることを実証している。この離着桟経路の再計画手法は高速であるため、オンラインの自動離着桟制御システムに組み込むことも可能である。

第２の技術的課題は、離着桟経路の追従制御問題である。オフラインで計画した経路には考慮されていない擾乱やモデル化誤差は、オンラインでのフィードバック制御により吸収されなければならない。そこで、申請者は、 非線形モデル予測制御(NMPC)と低速ポジショニングシステムの２つの観点から問題の解決に取り組んでいる。ここで、非線形モデル予測制御については、大域的最適化手法の一つである CMA-ES を採用したアルゴリズムを提案している。申請者はその性能を、数値シミュレーションにより検証している。もう一方の低速ポジショニングシステムについては、特殊舵の一つである VecTwin 舵装備船の流体的性質に着目した全く新しい制御アルゴリズムを確立している。このアルゴリズムでは、商用 CFD ソルバによる結果を基に、VecTwin 舵のホバー角周りで舵を動作させることで、非線形な運動モデルを線形なモデルに近似する実用的アプローチを新たに採用している。このアルゴリズムの採用により、VecTwin 舵装備船の離着桟操船の自動化を可能としている。申請者は、大阪大学実験池で行われた環境外乱下での自由航走模型実験において、その有効性を示している。

本論文は以下の６章で構成されている：

第１章では、自動運航船の研究の動向を概観するとともに、本論の研究背景を述べている。

第２章では、低速航行する船舶の力学システムについて詳述し、その非線形性についても述べている。

第３章では、第１の技術的課題である高速な離着桟経路の計画問題について述べている。ここでは、新たにウォームスタート手法を採用することにより、局所最適解に収束するまでの計算時間が大幅に短縮され、また実行可能解が得られる可能性が高まることを数値的に実証している。これは、計算時間が問題となってきたオフラインの離着桟経路計画問題の欠点を克服する研究成果である。

第４章では、第２の技術的課題のうち、CMA-ES を用いた経路追従 NMPC 制御器について述べている。これは、CMA-ES を船舶分野でのオンライン制御に実装した初の試みであり、数値計算によりその性能を説明している。

第５章では、第２の技術的課題のうち、VecTwin 舵装備船の低速ポジショニング制御について述べている。ここでは、商用 CFD ソルバによる数値計算結果を基に、線形な制御モデルを導くことに成功している。これにより、安全かつ安定な船舶の離着桟制御が可能となることを、数値計算と自由航走模型実験のいずれにおいても確認をしている。

最後に第６章では、本論文の内容を総括するとともに、今後の展望を示し、本論文の結論を述べている。

以上のように本論文は、自動運航船の実現のために必要不可欠な要素技術である自動離着桟制御について、離着桟経路の計画と経路の追跡・追従問題の両面からの検討を行っている。申請者が提案した離着桟経路の再計画アルゴリズムは、従来の大規模な最適化を伴うアルゴリズムに比して大幅に高速化されている。加えて、実行可能解も得られやすく、実用的観点からの利点も大きい。一方、オンライン自動離着桟制御についても、流体力学的考察に基づき、現実的・実用的な制御アルゴリズムとして取りまとめ、外乱下における自動離着桟制御実験に成功するなど、その貢献は著しい。申請者の研究は、将来の自動運航技術の実現に必要な、自動離着桟技術の確立に資するものであるといえる。

よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。