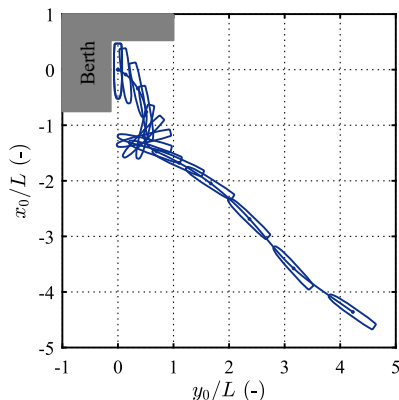


モデル予測制御による船舶の自動着棧

Automatic Berthing Using Model Predictive Control



技術研究所

GREEN & SMART WORKS LABORATORY

流体研究 G

谷口 拓也

TANIGUCHI Takuya

概要

本稿では、当社が開発した低速操縦運動モデルとモデル予測制御を組み合わせた自動着棧手法を紹介する。本手法では、最短時間制御に基づくシミュレーションによって参照経路を生成し、モデル予測制御により逐次追従させることで自動着棧を実現する。モデル予測制御では、独自に構築した低速操縦運動モデルを用いて将来の船体挙動を予測し、アクチュエータ指令値を最適化する。偏差や風外乱を与えた複数のシミュレーションにより制御性能を検証した結果、本手法が自動着棧制御に対して有効であることを確認した。

Summary

This paper presents an automatic berthing method that combines a low-speed maneuvering motion model developed by the authors with Model Predictive Control (MPC). The proposed approach generates a reference trajectory through a minimum-time maneuvering simulation and sequentially tracks it using MPC to achieve automatic berthing. In the MPC framework, the authors' low-speed maneuvering model is used to predict future ship motion and to optimize actuator commands. Several simulation case studies, including those with intentional initial offsets and wind disturbances, were conducted to evaluate the control performance. The results confirm that the proposed method is effective for automatic berthing.

1. 緒言

近年、自動運航技術の研究開発が活発化しており、特に着棧操船の自動化は強く求められている。着棧操船は前進・後進の切り替え、操舵、サイドスラストの使用など、複数のアクチュエータを同時に操作する複雑な作業である。そのため、従来から船の自動操船に広く用いられてきた PID 制御では、状況変化への柔軟な対応や高い追従精度の確保、複数アクチュエータの同時制御が難しいという課題がある。

これに対し、モデル予測制御 (Model Predictive Control, MPC) は、将来の船体運動を予測しながら最

適なアクチュエータの制御指令値を決定する手法であり、これらの課題の解決が期待できる。さらに、アクチュエータの上限・下限や変動速度などの制約を明示的に扱える点も着棧操船に適している。

MPC を着棧操船に適用するには、低速時の操縦運動モデルが不可欠である。しかし、着棧のような低速域では横移動・後進運動・プロペラ逆転・スラストの使用などに伴う複雑な流体现象が重なり、これらを適切に扱える操縦運動モデルは長らく確立されていなかった。

本稿では、この課題に対し、当社が開発した操縦運動モデル¹⁾と MPC を組み合わせた自動着棧手法²⁾に

ついて紹介する。本手法は、最短時間制御に基づくシミュレーションで参照経路を生成し、それを MPC により逐次追従することで自動着棧を実現するものである。ここでは、複数のシミュレーションを通して本手法の有効性を確認する。

2. 対象船と操縦運動モデル

本稿では、1 軸 1 舵に加えてバウスラスタとスターンスラスタを備えるフェリーを対象とする。MPC による予測および最適化には、当社で開発した操縦運動モデルを用いる。本モデルは、船体・プロペラ・舵・サイドスラスタに作用する流体力を計算し、運動方程式に基づいて船体運動を求めるものである。離着棧操船時に生じる横移動・後進運動・プロペラ逆転・スラスタ干渉といった低速域特有の複雑な現象を、総合的に取り扱える点を特徴とする。さらに、MPC の最適化計算で利用できるよう、各種流体力がいずれの船体運動やアクチュエータ作動状態に対しても不連続とならないように構築している。

モデルに含まれる各種流体力は、当社の運動性能水槽で実施した拘束模型試験のデータに基づいている。また、船体運動の計算結果は自由航走模型試験との比較により妥当性を確認している。拘束模型試験と自由航走模型試験の様子をそれぞれ図 1 と図 2 に示す。



図 1 拘束模型試験の様子
Fig.1 Captive model test.

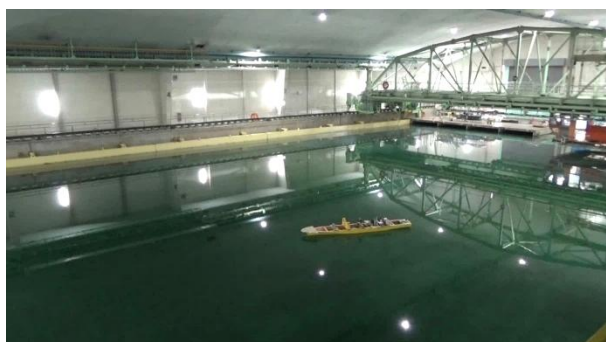


図 2 自由航走模型試験の様子
Fig.2 Free running model test.

3. 着棧航路計画

本章では、MPC で追従するための参照経路の構築方法について示す。追従制御が優れていても、対象船にとって無理のある参照経路では追従は困難である。そのため、参照経路の構築は非常に重要となる。

本稿では、操縦運動モデルを用いた最短時間制御に基づくシミュレーションにより、着棧状態に到達するまでのアクチュエータの制御指令値と船体運動を算出する。そこで得られた船の航跡および方位角の時系列を、MPC が追従すべき参照経路として採用する。

この参照経路は、対象船の操縦運動モデルに基づいて生成されるため、船の操縦性能やアクチュエータ制約を踏まえた実現可能な経路となるように設計されている。また最短時間制御の最適化においては、アクチュエータの上限・下限を最大能力よりも余裕を持って設定し、外乱に対する余力を確保しながら効率的な着棧が達成できるよう配慮している。

今回計画した着棧動作は、大きく 2 つの区間から構成される。1 つ目は岸壁へ向けて減速しながら接近する区間、2 つ目は方位を調整しながら停止させる区間である。

図 3 に、シミュレーションにより得られた着棧経路を示す。縦軸・横軸は船長 L で無次元化しており、岸壁位置と、経路を構成する 2 つの区間を併せて示している。

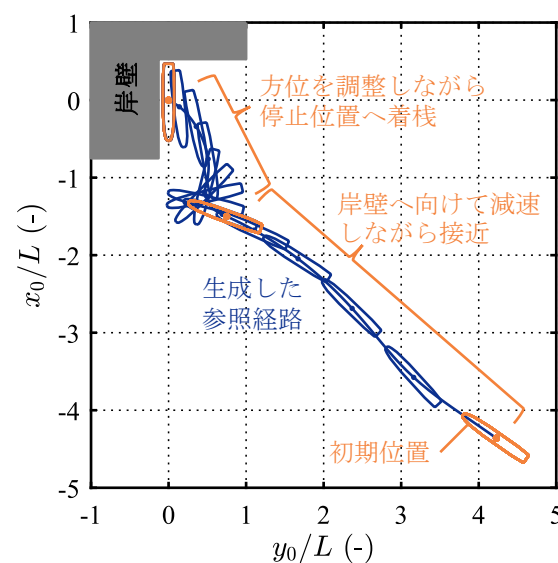


図 3 着棧航路計画の結果
Fig.3 Result of berthing planning.

4. 着棧操船制御手法

本章では、MPC によってアクチュエータの制御指令値を決定する手法について示す。MPC では、現在時刻から一定時間先までの船体運動を操縦運動モデルに基づいて予測し、目的関数が最小となるように制御指令値を探索する。

具体的には、予測ホライズンと呼ばれる将来時間区間を設定し、フィードバックされた現在の船体運動状態を起点として、制御指令値の時系列とそのときの船体運動を予測する。そして、その船体運動が参照経路になるべく近づくように制御指令値を最適化する。その最適化で得られた制御指令値の時系列の内、最初の時刻の値を実際の指令値として用いる。この処理を制御周期ごとに繰り返す。図4に概念図を示す。

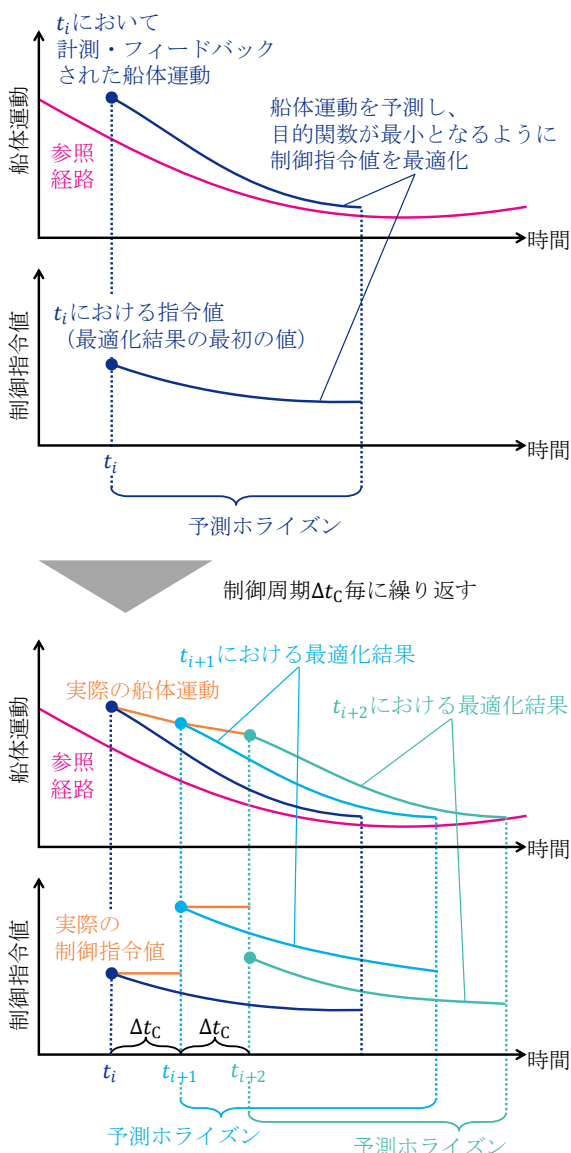


図4 MPCによる制御指令値の算出方法

Fig.4 Computation of control commands in MPC.

このように、フィードバック制御でありながら将来予測に基づく逐次最適化を行う仕組みにより、複雑な船体運動を伴う参照経路に対しても頑健な追従制御が可能となる。また、最適化の際には、アクチュエータの上限・下限や変動速度など、ハードウェア由来の制約を拘束条件として設定しており、MPC が算出する制御指令値によるアクチュエータの動作が現実的な範囲に収まるようにしている。

5. シミュレーション検証

本章では、複数のシミュレーションを通じて、本稿で扱う MPC の追従性や頑健性を検証する。

5.1 初期偏差を与えた場合の追従性の検証

ここでは、参照経路から大きく外れた場合の復帰能力を検証する。本検証の目的は、MPC が大きな偏差に対しても最適化が破綻せず、参照経路へ安定して収束できるかを検証し、その追従性を評価することである。そのために、初期位置を参照経路上に置いた場合と、あえてそこから左右へそれぞれ船長 L 分だけ移動させた場合の自動着棧シミュレーションを実施した。

シミュレーション結果を図5に示す。図5より、船長に相当する偏差があっても参照経路へ自動的に復帰できることが分かる。MPC は先を見越して制御指令値を調整するため、アクチュエータの制限を守りつつ、参照経路を行き過ぎることなく滑らかに追従できる。

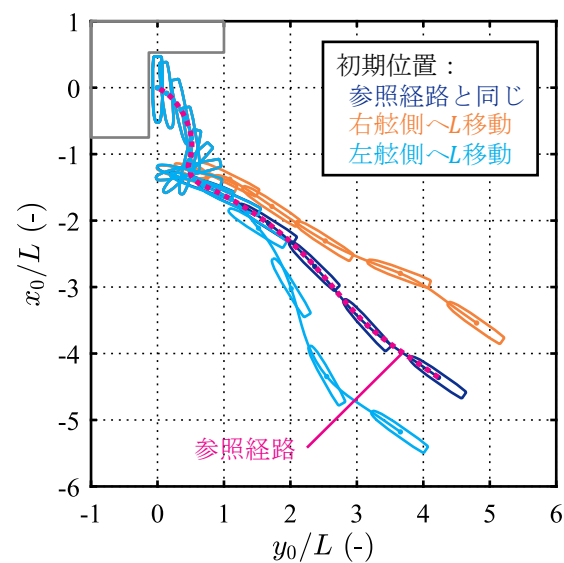


図5 初期偏差を与えた場合のシミュレーション結果

Fig.5 Simulation results with intentional initial offsets.

5.2 風外乱下における頑健性の検証

実海域では予測モデルに含まれない外乱が存在し得る。ここでは、モデル化されていない外乱下での頑健性を確認する。そのために、風外乱下の自動着棧シミュレーションを実施し、予測モデル内で風を考慮しない場合と考慮する場合を比較した。風速は、アクチュエータ能力に基づく定点保持可能な限界風速の約 80% とした。限界風速は辛うじて停止状態を維持できる境界に相当し、特定の風向でこれを超えると船体は流され制御不能となり得る。したがって、操作余力の確保と外乱条件の厳しさを両立する条件として約 80% を採用した。風向は $0^{\circ} \sim 360^{\circ}$ (45° 刻み) とした。

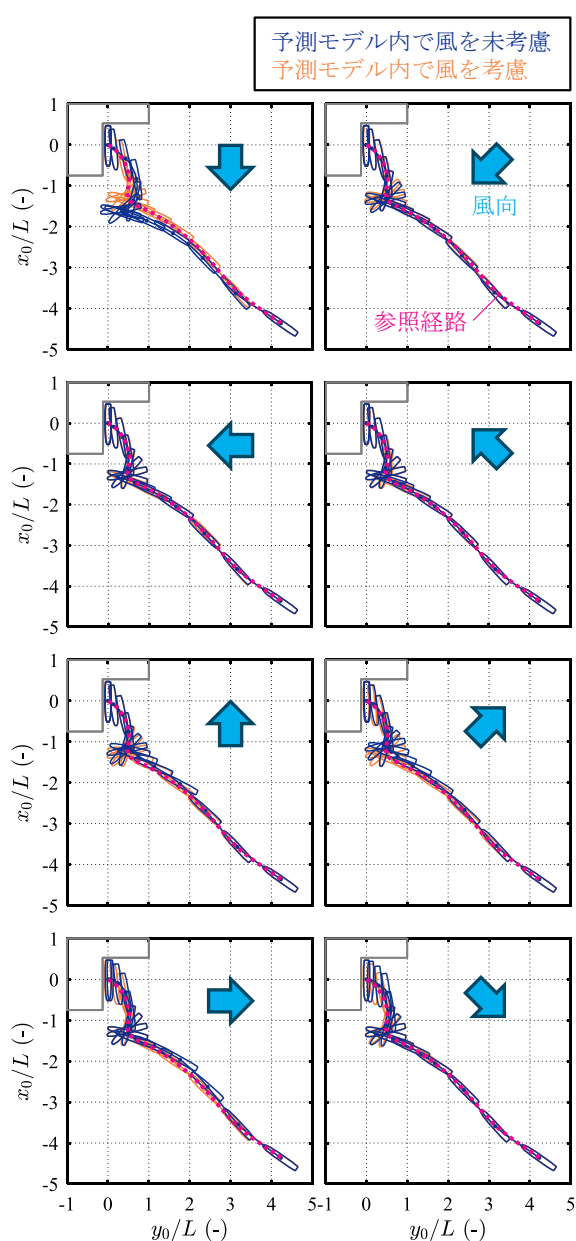


図6 風外乱下におけるシミュレーション結果

Fig.6 Simulation results under wind disturbance.

シミュレーション結果を図6に示す。図6より、予測モデル内で風を未考慮の場合では、外乱に応じて一時的な偏差は生じる箇所があるものの、いずれの風向でも着棧を達成できることが分かる。これより、本稿のMPCは、限界風速の80%程度の外乱であれば、予測モデルに含めていなくとも対応できるだけの頑健性を備えていることが分かる。多少のモデル化誤差があっても制御が破綻しないことは実装上の利点である。一方で、予測モデル内で風を考慮した場合は、参照経路に対する偏差がより小さくなることが分かる。風荷重を予測モデル内で適切に取り扱うことで追従精度がさらに向上すると言える。

6. 結 言

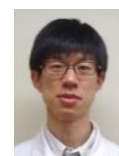
本稿では、当社が開発した低速操縦運動モデルとモデル予測制御(MPC)を組み合わせた自動着棧手法について検討した。最短時間制御によるシミュレーションで生成した参照経路をMPCによって逐次追従させる構成とし、シミュレーションを通じてその有効性を確認した。

その結果、初期偏差を与えたシミュレーションでは、船長に相当する偏差があっても参照経路へ復帰可能であることを示した。風外乱下のシミュレーションでは、限界風速の約80%に相当する外乱程度であれば、予測モデル内で考慮しなくても着棧可能であり、MPCが一定の頑健性を備えていることを確認した。また、予測モデルに外乱影響を含めることで追従精度がさらに向上することも示した。

以上より、本手法は自動着棧制御の基盤技術として有望であり、実装に向けた発展が期待される。今後は、より実用的な自動着棧システムの構築を目指す。

参考文献

- 1) Taniguchi, T., Maki, A.: A proposal of the maneuvering motion model for low-speed operations in harbor, Ocean Engineering, Vol.330, 121172, (2025)
- 2) 谷口拓也、牧敦生：非線形モデル予測制御による自動着棧操船、日本船舶海洋工学会論文集、第41号、pp 35-44、(2025)



谷口 拓也