

モデル予測制御による水中曳航体の運動制御

進藤, 祐太
九州大学大学院工学府

山口, 悟
九州大学大学院工学研究院

福田, 雄
九州大学大学院工学府

<https://hdl.handle.net/2324/7178730>

出版情報 : 日本船舶海洋工学会講演会論文集. 36, pp.237-242, 2023-06-01. The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers

バージョン :

権利関係 : © The Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineers



モデル予測制御による水中曳航体の運動制御

正 会 員 進 藤 祐 太*
学生会員 福 田 雄*

正 会 員 山 口 悟**

Motion Control of Towed Underwater Vehicle Using a Model Predictive Control

by Yuta Shindo, Member

Satoru Yamaguchi, Member

Yu Fukuda, Student Member

Key Words: Model Predictive Control, Underwater Towed Vehicle, Ocean Exploration

1. 緒 言

海底の状態を詳細に観察しようとするとき、水中ビークルに搭載した光学カメラを用いて静止画や動画を撮影することが有用である¹⁾。海中では光の減衰や散乱の影響によって可視距離が数メートル程度に限定される場合が多く、太陽光が届かない水深においては照明を使用して撮影するため、特にマリンスノーによる後方散乱による影響が強く、可視距離が短くなる²⁾。したがって、海底を広範囲に撮影するためには、海底の起伏や勾配に追従し、障害物を回避しながら海底との距離を近く保ったまま水中ビークルを高速で移動させることができる高い運動性能が求められる。

本報告では、光学カメラによって海底を撮影する水中曳航体の運動制御について調査し、その課題を検討する。

2. 光学カメラによる海底探査手法

海底を光学カメラで撮影する手法として、水中曳航体の他に AUV(Autonomous Underwater Vehicle)、ROV(Remotely Operated Vehicle)、HOV(Human Occupied Vehicle)、潜水士を用いる手法などがある。それぞれの手法は水深や地形などの環境条件、撮影する対象やその範囲、費用対効果などから総合的に評価して選択することになる。

水中曳航体はビークルが曳航ケーブルを介して母船によって曳航される形態のシステムであり、ビークルが移動するための推進力を母船に担わせることでビークル自身が推進力を持つ必要がなく、また曳航ケーブルに電源線を設け、母船からビークルに電源を供給することで動翼などのアクチュエータや観測機器を駆動することができるため、長時間連続して高速航行が可能で、曳航ケーブルに通信線を設けることでビークルと母船の間でリアルタイムに通信が可能であるなどの特徴がある。

3. 水中曳航体の運動制御

水中曳航体は古くから研究開発が行われ、様々な海洋観測に用いられてきた³⁾。従来の水中曳航体は大別すると、次のように 2 つに分類できるように思われる。高度(海底面とビークルの距離)と航行速度を指標にとると、1 つ目は高高度で、比較的高速で航行するもの(高高度・高速型)、2 つ目は低高度で比較的低速で航行するもの(低高度・低速型)である。

高高度・高速型の水中曳航体の例として九州大学応用力学研究所によって開発された「FLYING FISH」がある⁴⁾。「FLYING FISH」は空間連続的に海洋物理・化学観測を行うことを目的に開発されており、最大深度は 200m、最大速度は 10knot とされている。観測対象が海水の物理・化学観測であり、海底面を観測対象にしていないことから海底面に接近する必要がなく、結果的に高高度で運用されることが推察される。また、参考文献中にあるとおり、観測機器の制約によって、ビークルの姿勢を安定させながら航行することが非常に重視されているため、低高度で海底地形の変化に追従して高度を制御するような運用には適さない。高高度・高速型の水中曳航体には、測定レンジの長い測深機などの音響装置などを搭載する例も多い。

低高度・低速型の水中曳航体の例として、海洋研究開発機構によって開発された「ディープ・トウ」がある⁵⁾。「ディープ・トウ」には複数の機体があるが、いずれも光学カメラによる海底面の観測が可能である。光学カメラを観測に使用する際の高度は 5m 以下とされており、光学カメラの可視距離の制約によるものと推察される。また、速度は 1.0~1.5knot 以下とされている。「ディープ・トウ」は名称の通り、最大水深 6000m までの深海用の機材であり、ビークルの運動に対するケーブルの運動の影響が非常に大きい。ビークルにスラストや動翼などのアクチュエータを設けてビークルの運動を制御するような運用は行われず、機敏な高度変更ができないため、高速で移動する場合には海底へ衝突することが懸念される。しかし、浅海域で運用される水中曳航体においても、低高度のものは低速で運用されている^{6,7)}。

従来の水中曳航体は低高度・高速で起伏の多い海底面からの高度を一定範囲に保つために深度を大きく変えながら航行するような運用(高機動運用)はされておらず、したがって高機動運用をするための運動制御も採用され

* 九州大学大学院工学府

** 九州大学大学院工学研究院

原稿受付 令和 5 年 3 月 3 日

公開日 令和 5 年 5 月 25 日

春季講演会において講演 令和 5 年 6 月 1, 2 日

©日本船舶海洋工学会

ていない。

本研究では、動翼を駆動して揚力を変化させることで高度(もしくは、深度)や姿勢を制御する Fig. 1 に示す水中曳航体を考える。水中曳航体の運動自由度は6であるが、本報告では起伏や傾斜のある海底からの距離を一定範囲(5m 以下程度)に保ちながら航行することを想定して、ビークル前後方向と上下方向および縦揺れの3自由度の運動(縦運動)について調査する。水中曳航体には動翼を駆動するためのアクチュエータや海底を観察するための光学カメラなどの機器を搭載する胴体部、主にビークル上下方向の位置を制御するための主翼、主にビークルの縦揺れを制御するための水平尾翼、直進安定性を高めるための垂直尾翼を備える。曳航ケーブルをビークルに取り付ける曳航点は胴体部に設ける。主翼と水平尾翼は運動性を高めるために全遊動式とし、本報告では縦運動のみを取り扱うため、いずれも左右の翼が常に同じ迎え角で作動する方式とする。

4. 水中曳航体システムの運動方程式

4.1 座標系の設定

水中曳航体システムの運動を表すために Fig. 1 に記載の座標系を設定する。理解を容易にするために、ビークルに固定された機体固定座標系(o, x, z)と空間に固定した空間固定座標系(O, X, Z)を設定し、ビークルの運動方程式の立式には機体固定座標系を、機体の移動軌跡や姿勢角は空間固定座標系を用いる。機体固定座標系の原点 o は主翼回転軸の中心とし、 x 軸はビークルの前方を正、 z 軸はビークルの下方を正とする。

4.2 水中曳航体システムの縦方向運動方程式

水中曳航体の縦方向運動方程式は、次のように表すことができる^{8),9)}。

$$\begin{bmatrix} m + A_{11} & 0 & mz_g \\ 0 & m + A_{33} & -mx_g \\ mz_g & -mx_g & I_{yy} + A_{55} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{u} \\ \ddot{w} \\ \ddot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_y \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$F_x = -(m + A_{33})qw + mx_g q^2 - (m - \rho \nabla)g \sin \theta + X_{uu}u^2 + X_{ww}w^2 + X_{\delta\delta}\delta^2 + X_{\gamma\gamma}\gamma^2 + X_T \quad (2)$$

$$F_z = -mz_g q^2 + (m - \rho \nabla)g \cos \theta + Z_{ww}w + \{ (Z_q + (m + A_{11})u)q + Z_{\delta}\delta + Z_{\gamma}\gamma + Z_T \} \quad (3)$$

$$M_y = -mz_g qw - (m - \rho \nabla z_B)g \sin \theta - (mx_g - \rho \nabla x_B)g \cos \theta + M_{ww} + (M_q - mx_g u)q + M_{\delta}\delta + M_{\gamma}\gamma - l_z X_{uu}u^2 + l_z X_{\gamma\gamma}\gamma^2 - x_T Z_T + z_T X_T \quad (4)$$

Table 1 に(1)~(4)式中で用いた各記号の意味を示す。なお、 A_{ij} の形で示される付加質量および付加慣性モーメントの添え字 i, j は、1 が前後揺、3 が上下揺、5 が縦揺を表す。例えば、 A_{35} は上下揺が起きたときの縦揺方向の付加質量を表す。

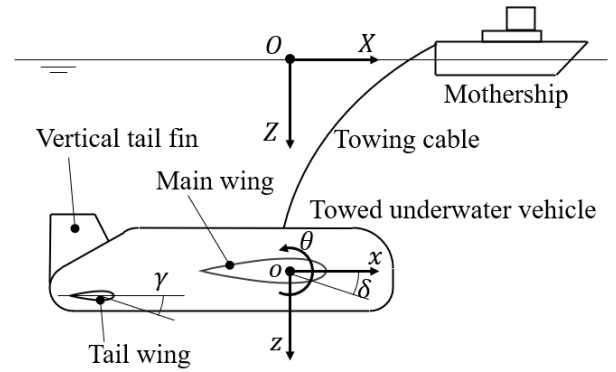


Fig. 1 Towed underwater vehicle and coordinate systems

Table 1 Symbols

A_{ij}	付加質量, 付加慣性モーメント
g	重力加速度
I_{yy}	慣性モーメント
l_z	機体固定座標系原点 o から水平尾翼までの z 方向距離
M_w, X_{uu}, X_{ww}, Z_w	速度に関する流体力係数
M_q, Z_q	角速度に関する流体力係数
$M_\delta, X_{\delta\delta}, Z_\delta$	主翼角に関する流体力係数
$M_\gamma, X_{\gamma\gamma}, Z_\gamma$	尾翼角に関する流体力係数
m	ビークルの質量
(o, x, z)	機体固定座標
(O, X, Z)	空間固定座標
q	y 軸回りの角速度
u, w	x, z 方向の速度
X_T, Z_T	曳航点における曳航張力 x, z 方向成分
(x_B, z_B)	浮心の座標
(x_G, z_G)	重心の座標
(x_T, z_T)	曳航点の座標
θ	オイラー角
δ	主翼角
γ	水平尾翼角
ρ	水の密度
∇	ビークルの排水容量

曳航ケーブルの運動方程式はランブドマス法を用いて表現する¹⁰⁾。

5. 模型実験と CFD 計算

運動方程式に現れる流体力に関する各係数を求めるために曳航水槽を使って、模型実験を行った。模型実験に用いた模型の形状および寸法を Fig. 2 に示す。発生する力とモーメントの測定には 6 分力計を用いた。実験に先立って、実験条件の検討や、実験中に計測される分力計の出力の傾向を予測するために、模型実験を再現した CFD 計算を実施した。

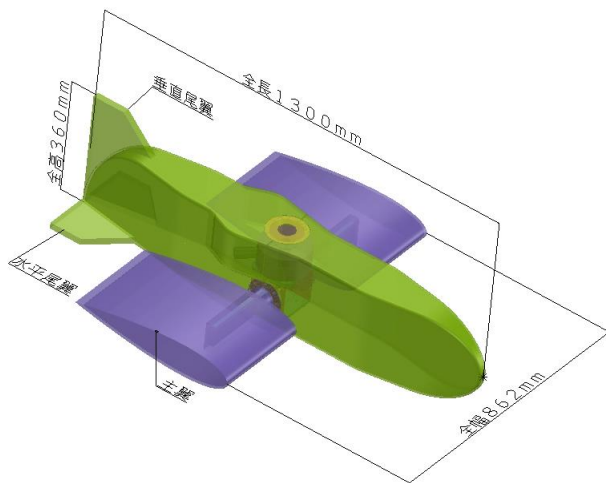


Fig. 2 Model for tank test

5.1 拘束模型実験

揚力や抗力などを求めるために一様流中での拘束模型実験を Table 2 に示す条件で行った。一例として、実験番号 1-1～1-5 の揚力と抗力について、実験結果とそれに対応する CFD 計算の結果を Fig. 3 に示す。

実験結果と CFD 計算の結果がよく一致している。本報告に未記載のその他の実験番号についても実験結果と CFD 計算の結果がよく一致している。

Table 2 Test condition of captive model tests

実験 番号	胴 体	主 翼	尾 翼	速度 [m/s]	主翼 角 [deg]	
1-1	有	有	有	0.5	0	
1-2					10	
1-3					20	
1-4					30	
1-5					40	
1-6	無		無		0	
1-7					10	
1-8					15	
1-9					20	
1-10					25	
1-11					30	
1-12		35				
1-13		40				
1-14		31				
1-15		32				
1-16		33				
1-17		34				
1-18		35				
1-19		36				
1-20		37				
1-21		38				
1-22		39				
1-23		45				
1-24		50				
1-25					1.0	0
1-26						5
1-27						10
1-28						15

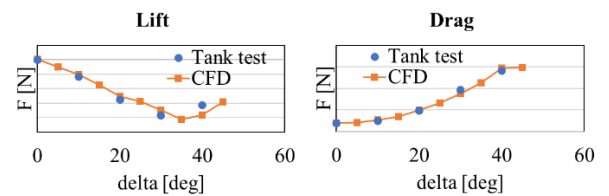


Fig. 3 Captive model tests) (No. 1.1-1.5)

5.2 強制動揺模型実験

水中曳航体の付加質量などを求めるために、強制動揺模型実験を Table 3 に示す条件で行った。一例として、実験番号 2-2 と 2-4 のピッチングモーメントについて、実験結果とそれに対応する CFD 計算の結果を Fig. 4 に示す。

2-2 については実験結果と CFD 計算の結果がよく一致しているが、2-4 については結果の乖離が大きい。本報告に未記載の試験番号については、実験結果と CFD 計算の結果がよく一致しているため、2-4 の実験条件や実験時の取扱いに問題があった可能性がある。

Table 3 Test condition of Forced oscillation model tests

Pure Pitch			
実験 番号	Pitch 角 [deg]	曳航速度 [m/s]	Pitch 周波数 [Hz]
2-1	5	0.5	0.145
2-2			0.247
2-3		1.0	0.291
2-4			0.494
2-5	10	0.5	0.145
2-6			0.247
2-7		1.0	0.291
2-8			0.494
Pure Heave			
実験 番号	Heave 振幅 [m]	曳航速度 [m/s]	Heave 周波 数 [Hz]
2-9	0.1	0	0.1
2-10			0.3
2-11		0.5	0.1
2-12			0.3
2-13		1.0	0.1
2-14			0.3
2-15	0.15	0	0.1
2-16			0.3
2-17		0.5	0.1
2-18			0.3
2-19		1.0	0.1
2-20			0.3
Pure Surge			
実験 番号	Surge 振幅 [m]	曳航速度 [m/s]	Surge 周波 数 [Hz]
2-21	0.1	0	0.1
2-22		0	0.3
2-23		0	0.5
2-24	0.15	0	0.1
2-25		0	0.3
2-26		0	0.5

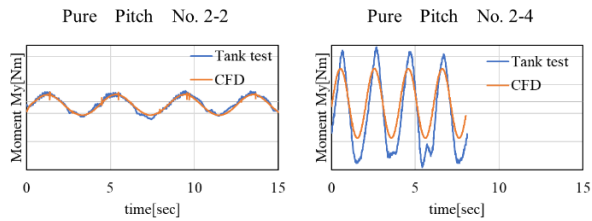


Fig. 4 Forced oscillation model tests

拘束模型実験および強制動揺模型実験の結果とCFD計算の結果が一部の試験条件を除いて、よく一致していることから、今後水中曳航体システムの詳細な設計を行う場合に、水槽実験の頻度を少なくし、CFD計算の結果を活用して効率的なモデルベース開発が進められる見込みである。

6. モデル予測制御

6.1 線形モデル予測制御(MPC)

モデル予測制御(MPC: Model predictive Control)は現代制御アルゴリズムの一つであり、その性質を一言で表すと「システムモデルを使って逐次的に有限時間まで先の最適化問題を解く制御アルゴリズム」といえる。本研究では多入力多出力系の運動制御を対象とするため、状態方程式がシステムモデルに相当する。システムモデルがあれば、ある入力(操作量)をシステムに印加したときに出力(制御量)がどのように変化するかを計算によって予測することができ、望ましい出力を得るための入力を決定することができる。またMPCは、入出力や状態変数に関する制約を陽に考慮して制御することができるという特徴がある¹¹⁾。制約とは、入出力や状態変数の値の上下限や変化率などを制限することであり、制約を陽に考慮して制御することにより、物理的な制約や安全上の制約などを守りながらシステムの限界付近の性能を引き出した制御が可能になる。

一般的に「モデル予測制御」という場合には、線形のモデル予測制御のことを指す。ここでいう「線形」とは、「システムモデルが線形である」ことを意味する。

MPCでは制御周期ごとに毎回有限時間先までの最適化問題をオンラインで解くため、計算コストが高いという課題がある。

6.2 非線形モデル予測制御(NMPC)

非線形モデル予測制御(NMPC: Non-linear Model Predictive Control)は基本的な考え方は線形のMPCと同じだが、システムモデルを非線形のまま線形化することなく制御を行うアルゴリズムである。NMPCは複雑な非線形性を持つ制御対象に対して高い制御性能を発揮する。しかし、NMPCは非線形な最適化問題を解くという原理上、線形のMPCよりもさらに計算コストが高い。西暦2000年以前には計算コストが過大であるため、NMPCを実時間で実装するのは不可能とされていたが、計算機の急速な性能向上や実時間で非線形な最適化問題を解く数値解法の研究が進み、実問題に適用されつつある¹²⁾。

水中曳航体は流体力や曳航ケーブルの動力学特性の影響でシステムの非線形性が非常に強い¹³⁾、低高度・

高速型の水中曳航体を高機動に運用するためには、運動制御手法として、システムモデルを非線形のまま取り扱えるNMPCが有効であると考えられる。

7. 水中曳航体の運動制御数値シミュレーション

運動制御の数値シミュレーションはMATLAB/Simulinkを用いた。制御ブロック線図の概略をFig. 5に示す。コントローラ(制御器)は制御手法をPID制御、LQI制御、MPC、NMPCから選択式とし、プラントモデルは平衡点周りで線形化した線形化モデルと非線形モデルからの選択式とした。

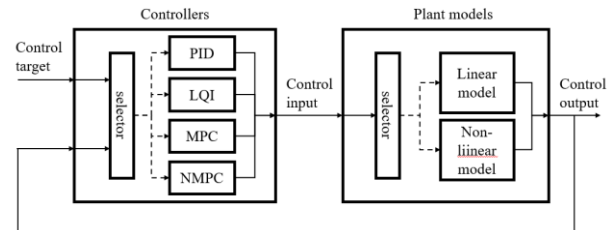


Fig. 5 Control system block diagram

制御目標値として、深度について平衡点からの深度変化をステップ状の目標値(シミュレーション開始10秒後にビークル深度を1.5m増す)と、正弦波状の目標値(振幅1m, 周期 2π rad)で与えた。ビークルのトリム角について目標値0を与えているが、高機動運用を想定しているためトリム角の目標の重みづけは軽くして、深度の目標追従を優先するようにした。

ステップ状の深度変化目標値の場合のシミュレーション結果をFig.6)~9), 正弦波状の深度変化目標値の場合のシミュレーション結果をFig.10)~13)に示す。1つのシミュレーションにつき結果のグラフ4つを一組とし、それぞれ左上が深度変化, 左下がトリム角, 右上が主翼角, 右下が尾翼角である。各グラフの橙色の線が制御目標値や制御指令値を示し、水色の線はシミュレーション結果を示す。主翼および尾翼のグラフにおける水色の破線は翼角度の限界値(制約)であり、今回は ± 30 degとした。主翼および尾翼の角度の制御指令値とシミュレーション上の角度が一致しないのは、主翼および尾翼の応答遅れをプラントモデルに含んでいるためである。

各制御手法で制御器の厳密なパラメータチューニングを行っていないため、各制御手法の定量的な比較は行わないが各制御手法の原理の違いによる性質の違いを見て取ることができる。

ステップ状の深度目標値の場合、4種の制御手法で目標の深度に達するまでに要する時間は差がない。PIDの場合は1入力1出力系で設計しているため、深度は主翼、トリム角は尾翼を使って制御している。PID以外の3種の制御手法は多入力多出力系の最適制御であり、深度と姿勢を主翼と尾翼を使って統合的に制御している様子が見て取れる。MPCとNMPCでは深度目標値に到達する前に主翼の迎え角を深度が減る方向に変更することでオーバーシュートを抑制しながら、目標深度への到達を早めるような動きをしている。

正弦波状の深度目標値の場合、PIDとLQIでは目標

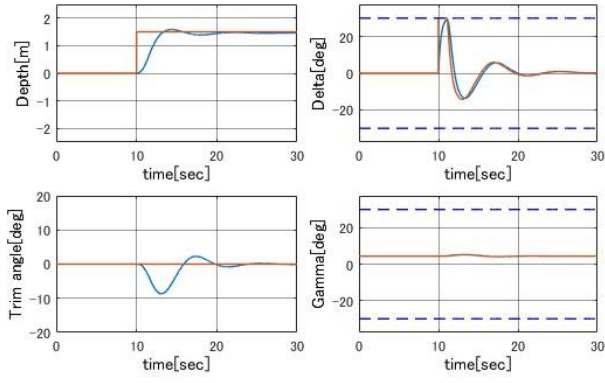


Fig. 6 Step target - PID

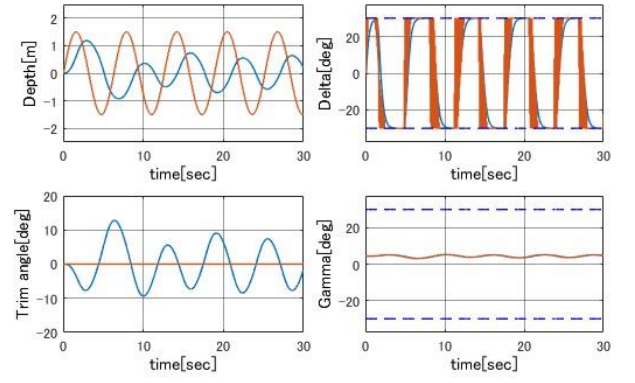


Fig. 10 Sin wave target - PID

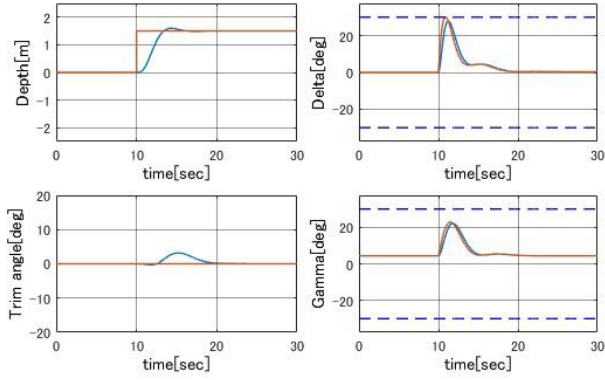


Fig. 7 Step target - LQI

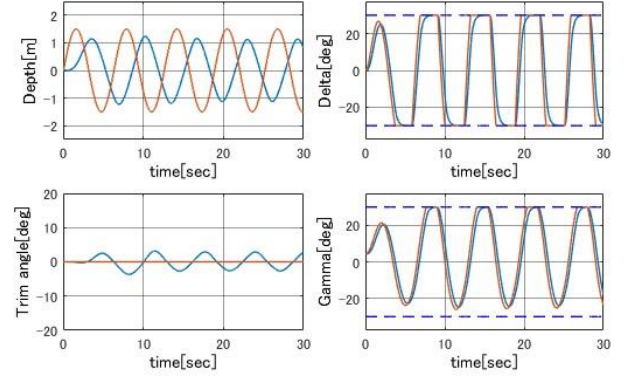


Fig. 11 Sin wave target - LQI

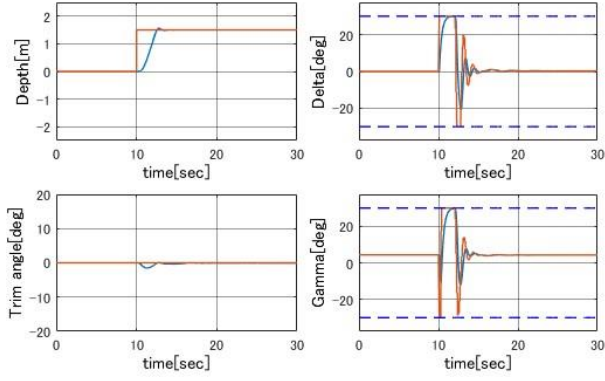


Fig. 8 Step target - MPC

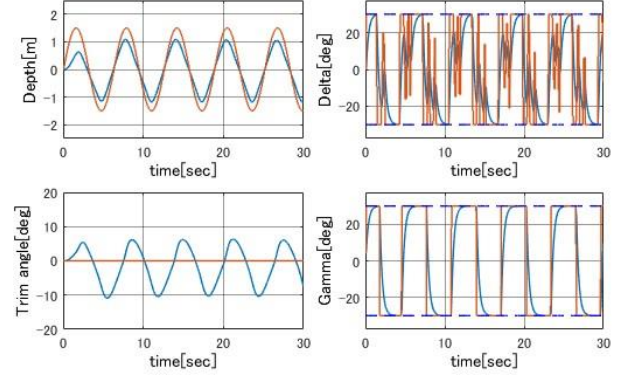


Fig. 12 Sin wave target - MPC

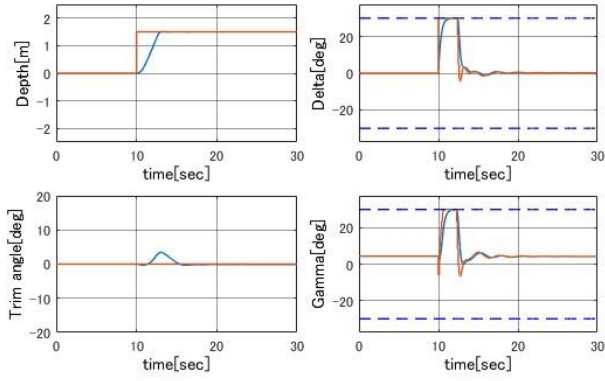


Fig. 9 Step target - NMPC

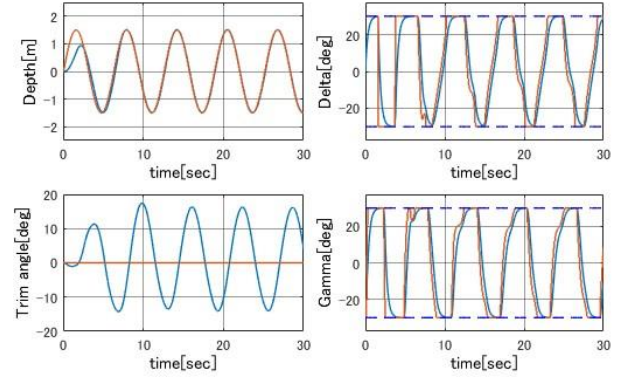


Fig. 13 Sin wave target - NMPC

の深度に全く追従できていない。これは PID と LQI は共にある時刻における目標値と制御量の差分を 0 にする様な制御手法のため、周期が短い正弦波状の深度目標に追従することには適していない。NMPC は目標値に対して制御量がよく追従している。MPC も NMPC ではないものの目標値に対して制御量が追従できているが、特に正弦波状の山と谷では追従性が悪くなっている。これは、MPC では制御器の中のシステムモデルは線形化されているが、シミュレーション上の制御対象であるプラントモデルは非線形のため、線形化によって両モデル間に差が発生している影響を受けている。本報告ではすべての制御手法において制御周期は 0.1 秒とし、MPC および NMPC は制御ホライズンを 4、予測ホライズンを 20 としている。よって、MPC および NMPC では現在時刻から 0.5 秒先まで 5 ステップ分の制御入力を印加したときの 2 秒先までの 20 ステップ分の出力を制約のもとで最適化して制御を行っている。有限時間先までの予測を逐次繰り返すという MPC 及び NMPC の原理が、周期が短い正弦波状の深度目標に追従するというような高機動な運動制御に対して有効であることがわかる。

8. 結 言

水中曳航体に光学カメラを搭載し、低高度・高速で起伏の多い海底面からの高度を一定範囲に保つために深度を大きく変えながら航行するような運用（高機動運用）を行うという課題に対して、近年様々な分野で注目されているモデル予測制御を運動制御の手法として導入することで課題解決に向かう可能性を示した。

本報告の時点では、運動制御の簡素な数値シミュレーションまでの実施までに留まっているが、今後は試験機を設計、製作し、実機でのデータ収集や実機での制御開発を行い、高機動運用可能な水中曳航体を社会実装すべく、研究を継続する。

謝 辞

本研究は、九州大学応用力学研究所の共同利用研究の助成を受けたものです。

参 考 文 献

- 1) Roy A. Armstrong, Oscar Pizarro, Christopher Roman : Underwater Robotic Technology for Imaging Mesophotic Coral Ecosystems, Mesophotic Coral Ecosystems, Vol.12, pp.973-988, 2019.
- 2) Fahimeh Farhadifard, Martin Radolko, Uwe Freiherr von Lukas: Marine Snow Detection and Removal: Underwater Image Restoration using Background Modeling, 25th International Conference in Central Europe on Computer Graphics, Visualization and Computer Vision in co-operation with EUROGRAPHICS Association, pp.81-89, 2017.
- 3) Hutchins R.W., McKeown D.L., King L.H. : A Deep Tow High Resolution Seismic System for Continental Shelf Mapping, Geoscience Canada , v. 3 no. 2, pp. 95-100, 1976.

- 4) 小寺山 亘, 山口 悟, 中村 昌彦, 赤松 毅人 : 海洋環境総合観測ロボット「FLYING FISH」の開発研究, 日本造船学会論文集, 1996 巻 179 号, pp.193-204, 1996.
- 5) 門馬 大和: 当センターで開発された機器 : JAMSTEC ディープ・トウ, 海洋科学技術センター, JAMSTEC. 2(4)(8), pp.68-72 , 1990.
- 6) Anna K. Cresswell et.al : A quantitative comparison of towed-camera and diver-camera transects for monitoring coral reefs, PeerJ, 2021.
- 7) 西 翔太郎, 西林 健一郎, 高島 創太郎, 井上 昇悟: 小型曳航体を活用した水中の観測手法, 技術広報誌 i-net, vol.58, pp.4-5, 2021.
- 8) 大楠 丹, 柏木 正, 小寺山 亘: Towed Vehicle の動力学に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 1987 巻 162 号, pp.99-109, 1987.
- 9) 横引 貴史, 山口 悟, 小寺山 亘, 中村 昌彦: 曳航体「FLYING FISH」の H_∞ コントローラーによる深度制御, 九州大学大学院総合理工学報告, Vol.22 No.3, pp.323-333, 2000.
- 10) 小寺山 亘, 中村 昌彦, 梶原 宏之, 佐藤 一身: 広域海底探査用 ROV の開発研究, 日本造船学会論文集, 1994 巻 175 号, pp.205-218, 1994.
- 11) 佐藤 俊之: シンプルなモデル予測制御 "Predictive Functional Control", 日本設計工学会誌, 52 巻 10 号, pp.601-607, 2017.
- 12) 大塚 敏之 et.al. : 実時間最適化による制御の実応用, コロナ社, 2015.
- 13) Minowa Asuma : High-gain observer-based motion control and stability analysis of a towed underwater vehicle, Doctoral Dissertation, Tokyo University of Marine Science and Technology, 2021.