

## 「高繊細な力覚伝送を有する水中バイラテラル制御手法の開発」

神戸大学大学院海事科学研究科

元井 直樹

## 1 研究の背景と目的

近年、我が国では地震や大雨、台風といった自然災害が多発している。このような状況下において生活のライフラインと言える電気エネルギーに関する見直しが行われている。我が国のエネルギー自給率は 2012 年度以降わずか 6.0% と非常に低い値が続いていた。近年は再生可能エネルギーの普及や原子力発電所の再稼働により 11.8% まで上昇したが、他の先進国等と比べ依然として非常に低い数値である。

このようなエネルギー自給率に関する打開策の一つとして我が国の排他的経済水域に存在するメタンハイドレート等の豊富な海底資源の活用が挙げられる。海底資源の活用のためには海底の探索が必要であり、Remotely Operated Vehicle (ROV) 等の水中ロボットが用いられている。ROV はマンピュレータを搭載した遠隔操作型の水中ロボットである。海底探索においてサンプルの採取は重要な作業であり、その多くはマンピュレータを用いて行われる。しかし、マンピュレータによるサンプル採取においてはカメラ等で撮影された視覚情報を頼りに遠隔操作を行う必要がある。そのため操作者がサンプルの硬さを把握できず、マンピュレータによりサンプルを破損してしまう可能性がある。本研究では上述の観点のもと水中ロボットにおける遠隔操作の操作性向上を目指す。

## 2 研究方法・研究内容

本研究では ROV における遠隔操作における操作性の向上と水中タスクの実現を目指し下記の 2 点の研究を実施した。

## 【研究 1：水中ロボットにおけるバイラテラル制御】

遠隔操作における操作性向上の手法の一つとして力覚情報を伝達するバイラテラル制御技術が挙げられる。バイラテラル制御システムは操作者が操作するリーダシステムと遠隔地において稼働するフォロワシステムによって構成される。これまでに多くのバイラテラル制御の研究が行われており、実世界における鋭敏な力覚伝送を実現した。特に位置情報と力情報からリーダ・フォロワシステムの位置と力を同期する 4 チャンネルバイラテラル制御が多く用いられている<sup>1)</sup>。しかしながら水中では流体力、摩擦力等の外乱の影響が大きいため、正確な力情報を得ることが困難である。

そこで本研究では位置情報のみを用いた 2 チャンネルバイラテラル制御<sup>2)</sup>を用いた水中ロボットにおけるバイラテラル制御の実現を目指す。対象とするリーダ・フォロワシステムとして、1 自由度の回転モータを想定する。ここでリーダシステムとフォロワシステムの間で次の 2 式を同時に満たすことでバイラテラル制御が実現できる。

$$\theta_l^{res} - \theta_f^{res} = 0 \quad (1)$$

$$\tau_l^{ext} - \tau_f^{ext} = 0 \quad (2)$$

ここで  $\theta_l^{res}$ 、 $\theta_f^{res}$ 、 $\tau_l^{ext}$ 、 $\tau_f^{ext}$  はリーダ・フォロワにおける位置・トルク応答値である。

2 チャンネルバイラテラル制御のブロック線図を図 1 に示す。ブロック線図において  $P(s)$  はプラント、 $C(s)$  は制御器、 $u(s)$  は制御出力、 $\zeta(s)$  は観測ノイズを表す。また下付き添え字  $l$  および  $f$  はリーダおよびフォロワの値を示す。ここで制御対象として 1 自由度の回転モータを想定し、 $P(s) = P_l(s) = P_f(s)$  とすると相補感度関数の安定条件よりフルビッツの多項式を用いた以下の制御器を得る。

$$C_{11} = C_{12} = C_{21} = C_{22} = \frac{Q_{12}}{PQ_{11}} = \frac{1}{P} \frac{a_1 s + a_0}{s^3 + a_2 s^2} \quad (3)$$

ここで  $Q_{11}$  および  $Q_{12}$  はそれぞれ相補感度関数であり、 $a_0$ 、 $a_1$ 、 $a_2$  は係数である。

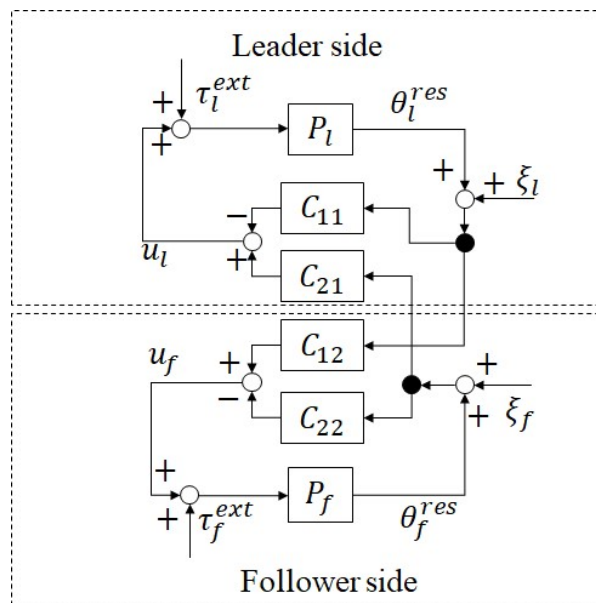


図1 2ch バイラテラル制御のブロック線図

【研究2：水中ロボットにおける移動制御技術】

水中タスクを行うためには所望の位置までの移動が必要となる。しかし、水中では潮流などの影響や、陸上と異なり自己位置推定精度の劣化、また水中ロボットの構造の複雑化に起因するモデル化誤差などにより高精度な移動制御が困難である。本研究では移動精度向上を阻害するこれらの要因を移動システムにおける外乱として捉えロバストな運動制御系の構築を目指す。

本研究ではロバストな運動制御系の一つとしてスライディングモード制御を用いる。式(4)にスライディングモード制御を示す。

$$u = -Q\sigma - K\text{sgn}(\sigma) \quad (4)$$

ここで $u$ は制御入力、 $Q$ および $K$ は比例ゲインおよびスイッチングゲイン、 $\text{sgn}(\ )$ は符号関数である。また、 $\sigma$ は切り返し平面 $S$ と位置偏差 $e$ より式(5)および式(6)で示される。

$$\sigma = Se + \dot{e} \quad (5)$$

$$e = \eta^{cmd} - \eta^{res} \quad (6)$$

ここで $\eta^{cmd}$ は位置指令値、 $\eta^{res}$ は位置応答値を示す。

式(4)を用いることで外乱に対してロバストな運動を実現することが出来る。一般にスイッチングゲイン $K$ を大きく設定することでロバスト性が高くなる。しかしながらスライディングモード制御特有の問題であるチャタリングが生じ、動作が振動的となってしまう。そこで本研究ではチャタリングを防止するためにスイッチングゲイン $K$ を低く設定し、かつロバスト性を高めるために外乱推定値を付加する手法を提案した<sup>[3]</sup>。提案手法による制御入力を式(7)に示す。

$$u = -Q\sigma - K\text{sgn}(\sigma) + K^{cmp} \quad (7)$$

ここで $K^{cmp}$ は外乱推定により生成した付加入力である。なお、外乱推定に関しては外乱オブザーバと等価な手法で推定を行った<sup>[4]</sup>。図2に外乱推定を有するスライディングモード制御のブロック線図を示す。“Sliding Mode Controller”が式(4)であり、チャタリング防止のためスイッチングゲイン $K$ を低く設定している。また“Disturbance Estimation”において外乱を推定し、付加入力 $K^{cmp}$ を実時間で生成し、式(4)に付加することで式(7)を得ている。本提案手法を用いることでロバスト性とチャタリング防止を両立することが可能となり、水中ロボットにおける高精度な位置制御が可能となる。

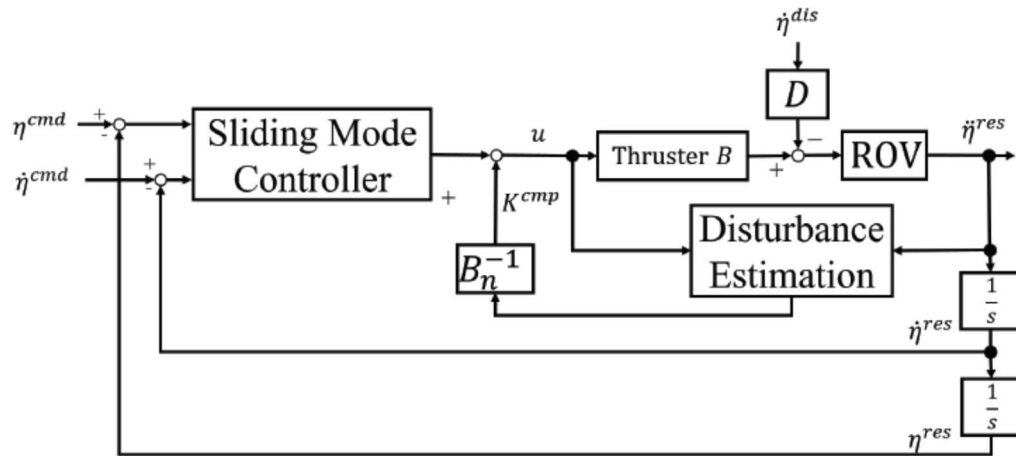
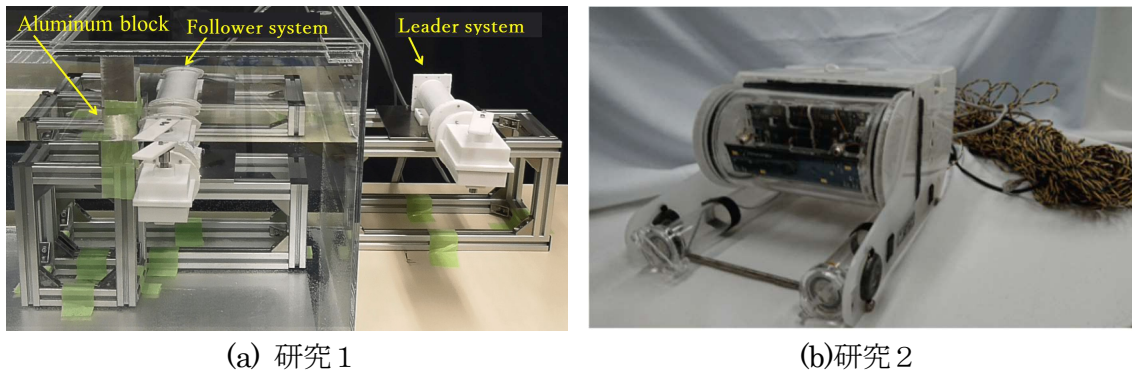


図2 外乱推定を有するスライディングモード制御のブロック線図

### 3 研究成果

研究1 および研究2 それぞれの実験結果を示す。



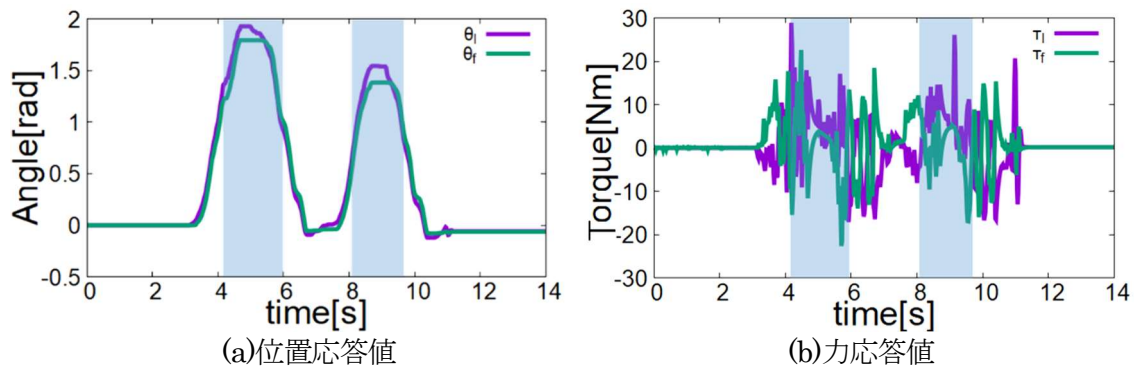
(a) 研究1

(b) 研究2

図3 実験システム

#### 【研究1：水中ロボットにおけるバイラテラル制御】

図3(a)に研究1で用いた実験システムを示す。リーダ・フォロワシステム構造となっている。リーダシステムを操作者が操作し、水中にあるフォロワシステムが対象物（アルミブロック）に接触する。図4に本実験結果を示す。ここで図4(a)は位置応答、図4(b)は力応答を示す。また青色網掛け部分は接触状態を示す。図4(a)より2台の位置情報が同期しており、また図4(b)より作用反作用の法則を実現できている。なお、図4(b)における力応答値は制御には用いておらず、観測のみに用いている。以上より2チャンネル制御器による水中バイラテラル制御の有効性を実証した。



(a)位置応答値

(b)力応答値

図4 実験結果（研究1）

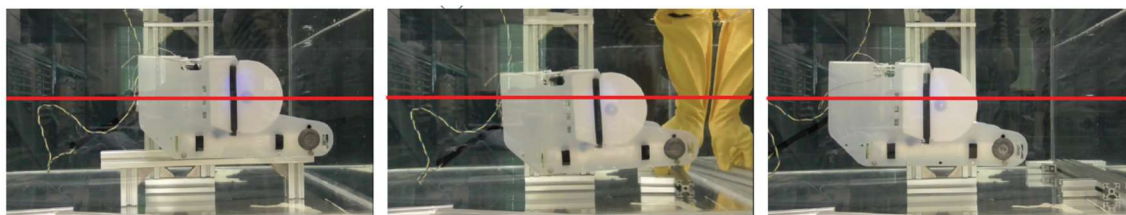
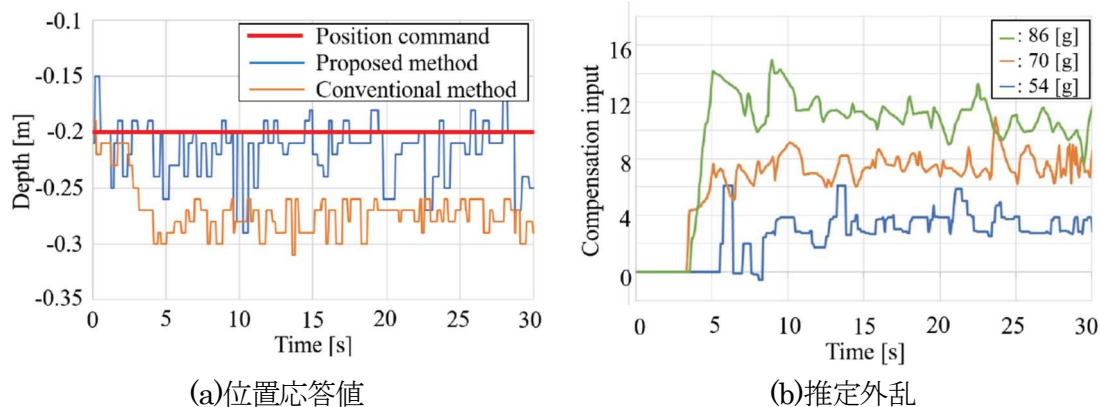


図5 スナップショット (研究2)



(a)位置応答値

(b)推定外乱

図6 実験結果 (研究2)

#### 【研究2：水中ロボットにおける移動制御技術】

図3(b)に研究2で用いた実験システムであるROVを示す。水槽内において簡易型のROVを用いて自律制御で動作を行う。なお、実験では深度センサを用いて高さ方向のみの位置制御を行った。また、位置指令値として一定値を与え、定点保持制御を試みた。深度方向に対する外乱として重りを実験システムに取り付けた。

図5に本実験におけるスナップショットを、図6に実験結果をそれぞれ示す。図5および図6(a)における赤線が位置指令値である。図5および図6(a)より重りとして外乱があるにもかかわらず定点保持が実現できていることが分かる。また図6(b)において重さに応じた外乱の推定が実現できている。以上より外乱推定を有するスライディングモード制御における水中ロボットの移動制御の有効性を実証した。

#### 4 生活や産業への貢献および波及効果

本研究によりROVの遠隔操作の操作性向上の糸口が見えた。海底探査の効率化、エネルギー自給率の向上につながる可能性がある。また、本技術は宇宙探索ロボットや、プラント事故などの劣悪な環境での災害対策ロボット等への発展応用も期待できる。

#### 【参考文献】

- [1] T. Nozaki, T. Mizoguchi, K. Ohnishi, “Real-World Haptics for Motion Realization”, *IEEJ Journal of Industry Applications*, Vol. 2, No. 1, pp. 1-6, 2013.
- [2] M. Tajiri, P. Lopez, Y. Fujimoto, “Design of Two-Channel Bilateral Control Systems by a Transfer-Function-Based Approach”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, Vol. 65, No. 7, pp. 5655-5664, 2018.
- [3] N. Motoi, D. Hirayama, F. Yoshimura, A. Sabra, W.K. Fung, “Sliding Mode Control with Disturbance Estimation”, *Proceedings of IEEE Conference on Advanced Motion Control*, 2022.
- [4] 大西公平, “外乱オブザーバによるロバスト・モーションコントロール”, 日本ロボット学会誌, Vol. 11, No. 4, pp. 486-493, 1993.