

2024年度 研究成果報告書(短期)

研究テーマ

小型水中ロボット用モータの開発 -次世代水中軽作業機器

代表研究者

研究要旨

1 はじめに

本研究は今後利用が進むと考えられる小型水中モータの開発を行った。近年では小型水中ロボットは水中ドローンと呼ばれ漁業・土木等の水中映像の撮影に使われており今後の発展が期待できるモータの応用先となっている。このような水中ドローンが多数販売・活用される元となったのはアメリカの小型 ROV メーカーである Blue Robotics が水中ロボット用の安価なスラスターを販売したことが大きい。モータは推進力の他にも位置決めを目的したモータも多い、例えば RC 用のサーボモータは陸上の小型ロボットやモビリティの位置決めに必要な部品となっている。これは1)小型ブラシレスモータの採用、2)ホール素子を使った位置決め、3)電流センサとマイコンを使った制御技術の発展が上げられる。しかし水中用の RC サーボモータは入手が難しい。そこで容易に位置制御が可能な水中 RC サーボモータをブラシレスモータで実現することにより海洋ロボット用アクチュエータの開発を行い。その応用先として小型水中ロボット用の採泥装置を作成した

2 水中用モータとその構成

開発する水中モータは表1に示されるブラシレスモータ、マイクロプロセッサ、イーサネットチップ、ブラシレスモータドライバを選定した。この時ブラシレスモータはホール素子の有無両者に対応させるためホール素子レスドライバを選択した。一方で位置決めにはホール素子出力をレゾルバ・エンコーダ等の位置・速度センサの代替えとして活用する事とする。

現在のマルチコアマイコン(RP2040)では1つのCPUコアに2KHzで割り込みを掛けることで7200rpm(120Hz)程度の回転数であれば十分にパルス計測が可能である。さらにブラシレスモータのホール素子の出力は3相のグレイコード出力となるが論理マップ(表2)を使うことで高速にパルスのカウントアップ・ダウンによりモータの位置を計測することが可能になった。またメインのコアはTCP/IPドライバ・モータドライバとの通信(I2C、SPI)とロバスト制御であるSMC制御を実装することで実現している。

またホストPCとモータ制御部との通信はTCP/IPで直接接続可能にする。なお制御モードとして速度指示モード、位置制御モードを搭載する形とした。またモータドライバの電流センサを使ったトルク制御も実装を可能にした。

表1 使用機器諸元表

表1-1 ブラシレスモータ諸元表

型番	TG-611B-FU-64
モータ定格回転数	5700RPM(95RPS)
モータ無負荷回転数	7260RPM(121RPS)
減速比	1/64
出力軸回転数	90.8RPM
トルク	196mN/m(2kgf/cm)
寸法	22mm(H)×22mm(W)×71.5mm(L)
重量	57g
定格入力電圧	24V
定格電流	280mA

表1-2 ブラシレスモータドライバ諸元表

型番	Brushless_23_Click
主要チップ	TC78B011FTG
モータ・ドライバ電源入力電圧	11~27V
モータ駆動用最大出力電流	5A
MCUとの通信	PWM、I2C、IOピン

表1-3 MCU諸元表

型番	RP2040_Zero
主要チップ	RP2040
コア数	2(デュアルコア)
CPUクロック	125MHz
IOピン(内ADC)	20(4)

表2 3相ホール出力によるパルスカウント変換

CW[deg]	Val	Hall State		
		A	B	C
0	1	0	0	1
60	3	0	1	1
120	2	0	1	0
180	6	1	1	0
240	4	1	0	0
300	5	1	0	1

Val Sort

0:ERROR
1:CW
-1:CCW

Prev Hall Val	Now Hall Val							
	0	1	2	3	4	5	6	7
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	-1	-1	0	0
2	0	-1	0	-1	1	0	1	0
3	0	-1	1	0	0	-1	1	0
4	0	1	-1	0	0	1	-1	0
5	0	1	0	1	-1	0	-1	0
6	0	0	-1	-1	1	1	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0

表1-4 イーサネット諸元表

型番	W5500Lite
主要チップ	W5500
MCUとの通信	SPI
Ethernet通信速度	10/100Base

これらのマイクロプロセッサを使った制御回路ブロックを図1に示す。また設計したコントローラ基板を図2に示す。また最高回転数時のホール素子の応答を図3に示す。位置制御時の応答を図4に示す。この時、モータの制御コマンドはTCP/IPにOSCプロトコルで制御マイコンにコマンドを送り制御する形にする。コマンド一覧を表3に示す。図4からも所定の位置制御が可能であることが確認できる。

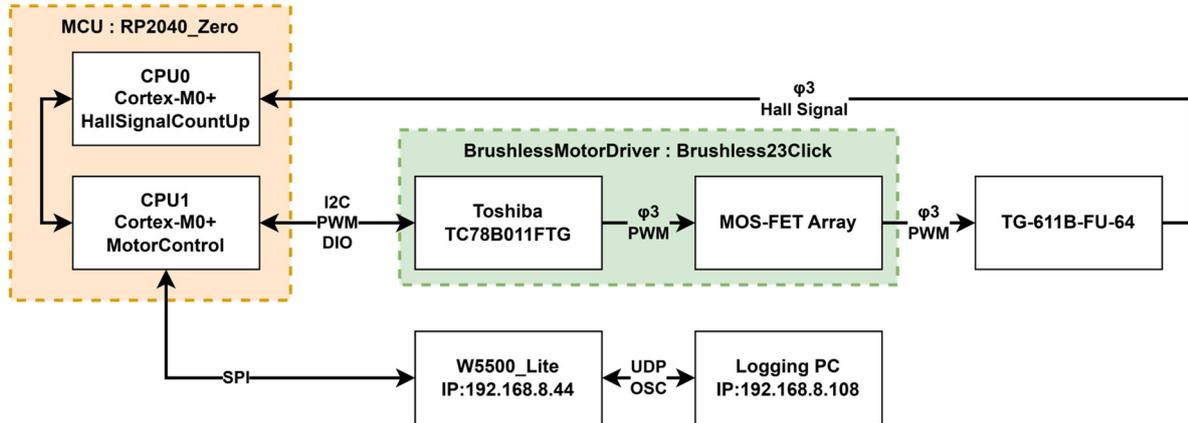


図1 制御ブロック図

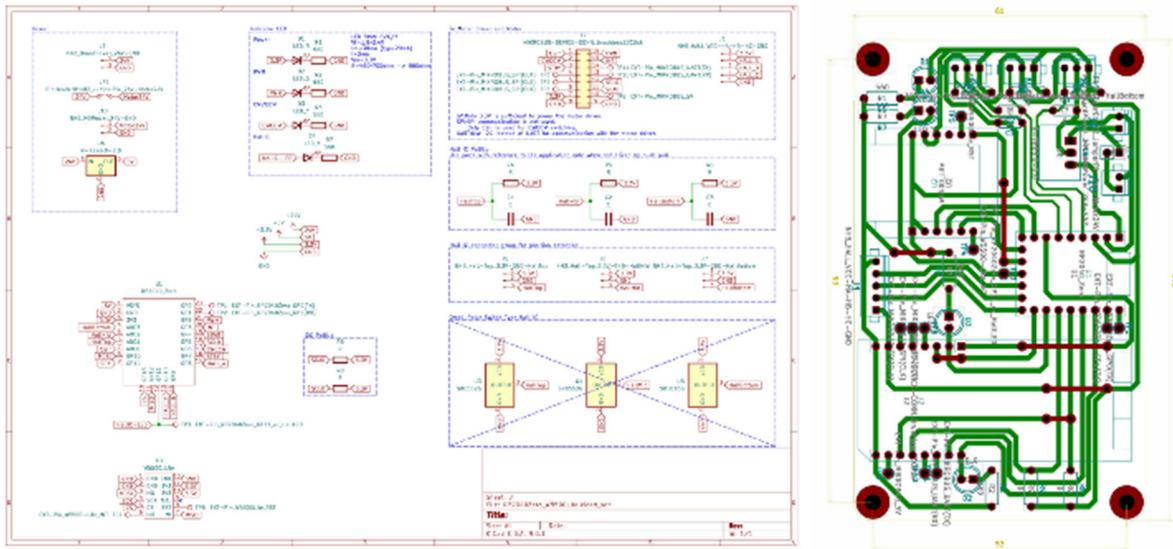


図2 制御コントローラ回路図

表3 コマンド一覧表

コマンド構文 「mode,[引数1],[引数2]」

コマンド名	引数1	引数2	コマンド例	説明
速度制御モード	整数: 0	整数: -255~255	mode,0,-255	引数2で指定した速度でモータを回転させる 上下のホールICリミットに接触すると停止する
往復動作モード	整数: 1	整数: -255~255	mode,1,-255	引数2で指定した速度でモータを回転させる 上下のホールICリミットに接触すると同速度で逆転する
位置制御モード	整数: 2	整数: -255~255	mode,2,4000	引数2で位置(ホールICのカウンタ値、初期位置ゼロ)を指定、P制御と飽和関数で速度指令値を決定 現在位置(カウンタ)は5つ目のコマンド「ステータス読み取り」で確認可能 現在の設定: speedVal [-255~255] =Pゲイン[255] × 差分[目標位置-現在位置] / (飽和関数 α[1000] + 差分[目標位置-現在位置]) 10240カウンタ=可動域200mm / リード15[mm/1回転] × 64[減速比] × 12[ホールICカウンタ/1回転]
全レジスタ読み取り	整数: 3	null	mode,3	引数2とカンマは必要なし ドライバチップのレジスタ 0~30までとNVM(不揮発性メモリ)のレジスタ86,87を返答
ステータス読み取り	整数: 4	null	mode,4	引数2とカンマは必要なし 返答情報 1. モータドライバ同期信号による回転数 2. モータドライバ内レジスタによる回転数 3. モータのホールICによる回転数と回転方向 4. シャント抵抗とモータドライバのアンプによる消費電流 5. 現在の目標回転数, 回転, 方向位置(カウンタ), ステータス

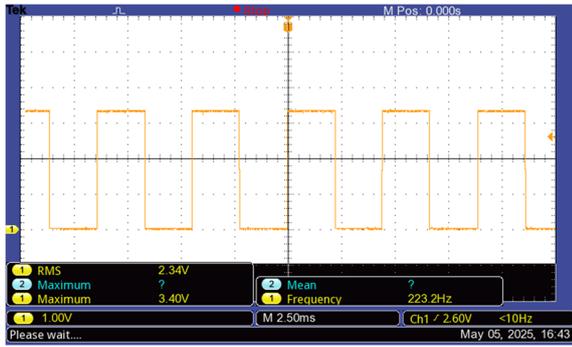


図3 ホール素子波形

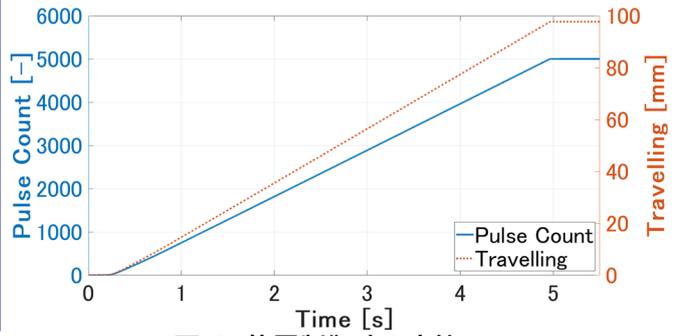


図4 位置制御時の応答

3 水中用モータ耐圧容器

一般的に水中モータは大きく2つ分けた手法がある。それは耐圧方式と均等圧方式であるが今回は水深100m程度は耐圧容器で実施する。一方でそれ以深は均等圧容器で実施することとする。また軸受けにはG4シーリングを海水側、内部容器に配置し。その部分にシリコングリスを封入する形とした。軸受け部の詳細と設計したモータ耐圧容器を図5と表4に示す。

今回は水深100m以下で使用するので耐圧容器として使用したが、均圧容器として使用する場合は容器内に絶縁油を入れ、コンパネータとして容器のフランジにシリコンチューブを接続して使用する形とした。また、2で設計した電子回路は容器内に配置する予定であったが今回は間に合わなかったため外付けとした。詳細な耐圧試験は現在、小型の耐圧試験装置を準備中である。

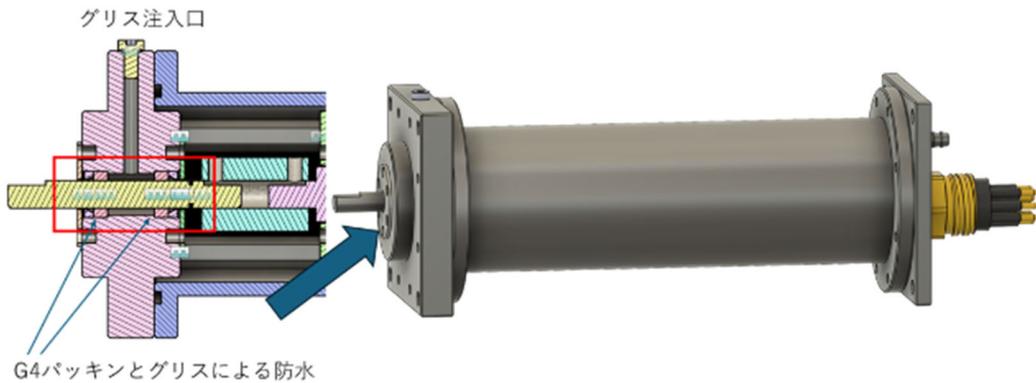


図5 水中モータ用耐圧・均等圧容器

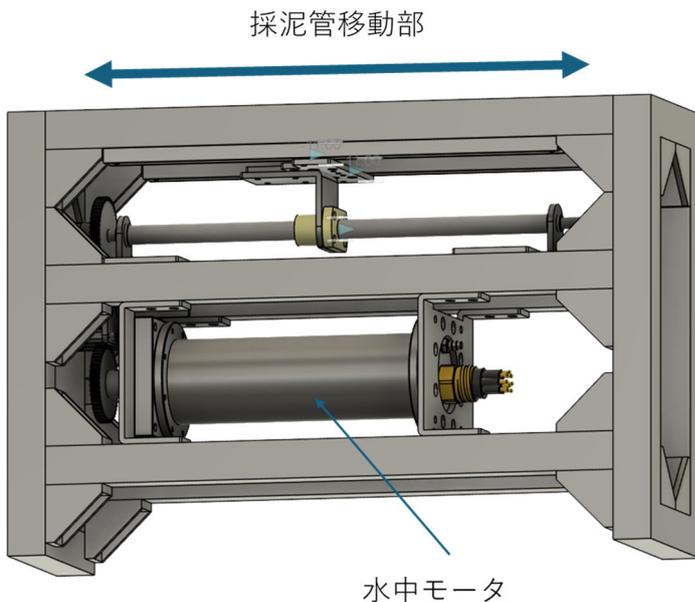


図6 採泥器



図7 採泥器外形

4 採泥装置

設計した小型採泥器を図6と諸元表5に示す。なお、リミッターとしてホール素子とマグネットを使ったスイッチを上・下限と中央部に配置した。この採泥装置に塩ビ管等を取り付けヘッド口等へ挿入し泥を回収する形をとる。また1.2kg/176mmと小型であるため小型ROVや水中ドローン等への設置が可能である。今回は本装置を水中で2時間500往復させ図5の耐圧容器内に浸水がない事を確認した。試験装置を図8に示す。この時内部が目視できるようにアクリル製のフランジを取り付け目視する形とした。なお実際の海域試験ではSUS304のフランジを使う形とする。この水中結果、良好であると考えたため2025年度中に100m程度の水圧試験装置内で試験を実施する予定である。

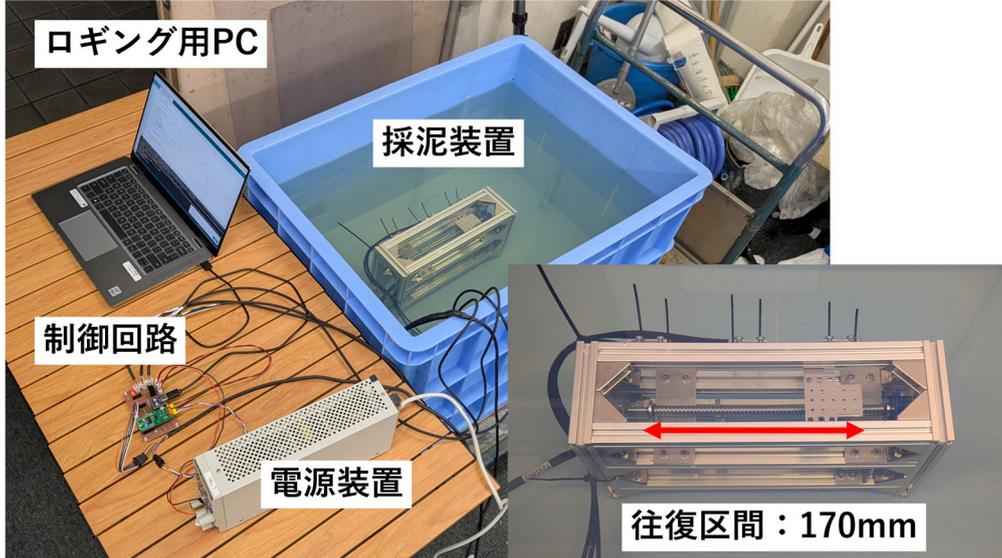


図8 500往復試験の様子

表4 水中モータ諸元

寸法	高さ	64mm
	幅	62mm
	奥行(出力軸~エンドキャップ)	176mm
重量	空気中	1230g
耐圧性能(水深)	円筒容器降伏応力換算	1560m
	安全率5倍	312m
均圧構造	モータ格納部	シリコンオイル
	軸受け部	グリース

表5 採泥器諸元

寸法	高さ	340mm
	幅	100mm
	奥行	240mm
重量	空気中	4.7kg
材質	フレーム	アルミ(皮膜処理)
	モータ容器	SUS304
軸移動量	高さ方向	200mm
リミットセンサ		ホールIC×3か所

5 まとめ

開発した小型水中ロボット用モータの開発を行った、今回は採泥装置へ応用した。このように簡単に位置制御が可能な小型アクチュエータは新たな水中機器開発にメリットがある。予定では電子回路も耐圧容器内に設置であったが、電子回路の小型化までは実施できなかった。よって現在電子回路の小型化を目指して回路設計の見直しを図っている。しかし位置制御・電流制御が可能な小型水中ロボット用モータの実現は十分に可能であること。従来の制御コマンドをシリアル通信で送信するのではなくTCP/IPベースとしたことでPCとの接続性が良くなったことが上げられる。一方で、他の水中ロボット関係者からは容器が高価・重量があるとの意見があったため容器に関してはG4シールのモータ軸の部分(図5左)のみSUSで作成し容器は塩ビ等の樹脂に変更した均等圧型を目指す形がコストと使いやすさの面で優れているといえるため今後改良の予定である。また、本システムは均圧式に変更することもできるように設計されているため問題はない。応用先として、我々は曳航型水中ロボット(UTB)と航行型ロボット(ASV)の水中ラダーに応用を図る。これはモータシステムの位置制御モードを活用する。また風力発電装置、水産資源や養殖調査においては環境問題から定期的な海底土のサンプリングが重視されているため、水中ロボットに本装置を取り付け、サンプル回収を実施する。この時はトルク制御(電流監視)と採泥管挿入(位置制御)のハイブリッド制御が必要になると思われる。本装置は2025年度においても継続して研究開発を行う。

6 その他

研究成果をとして2025/06 海洋理工学会、2025/10 日本マリンエンジニアリング学会において発表を行う予定である。

7 謝辞

本研究の助成をいただきました、「鶴見奨学研究助成財団」に深く感謝いたします。