

大学発アーバンイノベーション神戸 研究成果報告書



大学発アーバンイノベーション神戸
University's Urban Innovation Kobe

研究課題名：双腕を有する ROV による壁面把持作業

研究期間：2024年4月～2026年3月

交付決定額(研究期間全体)：3,270千円

申請区分：一般助成型
課題番号：A23204

研究代表者：神戸市立工業高等専門学校 知能ロボット工学科
准教授 小澤 正宜

1. 研究成果の概要

提案者は、高齢化による潜水士の人口減少の解決策として、水中ロボットを用いた複雑な作業の実現を目指している。本研究では、水中ロボットによる双腕作業の研究開発を進めるべく、研究利用向けの水中マニピュレータの開発、およびマニピュレータ対を用いた作業の実現、双腕とROV本体を同時に操作する際の負荷低減の実現を目指した。

水中マニピュレータの開発およびマニピュレータ対を用いた作業の実現については、右図の通りスキッドに搭載した双腕アームによる姿勢把持および匍匐移動を実現した。

操作負荷の低減については、市販品のコントローラを用いて検証用のハードウェアを構成した。

今回の支援で必要なハードウェアがほぼそろえることができたので、今後は動作パターンや制御入力の方法といった、理論、ソフト面の開発を継続していく。



双腕をスキッドに搭載した状態での壁面吸着



双腕ROV操作インターフェース ハードウェア

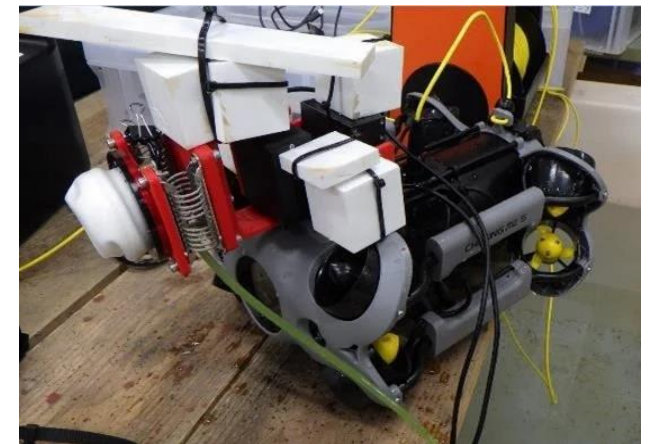
2. 研究成果の学術的意義や社会的意義

高齢化による労働人口の減少が各業界で進んでおり，水中業界にも潜水士の高齢化による現象という形で影響が出てきていると推測される*1．

水中ドローンの登場により一部の簡単な作業は代替が進んでいるが，機能的に目視点検程度の作業に限定されている．潜水士の代替を進めるには，腕機能を具備した機体の知見を拡充し，より高度なタスクを水中ロボットで実現することが必要である．

市販のドローンでは把持が可能なグリップがオプションとして用意されているものがあり，このような機体は水中でものを持つことが可能である*2．しかし，潜水士の作業にはものをつかむほか，構造物や海底に触れて姿勢を維持する，両手で大きなものをつかんで安定させるといったものも考えられるため，汎用的な能力を有するアームを2本以上装備し，それらを用いた色々な種類の作業を実現していくことが重要である．

また，人間では実現しえない把持方法として，神戸高専では吸着把持技術による水中ロボットの作業能力のさらなる拡大を図っている．



本研究前に実施した吸着把持アームの開発

*1 https://www.mlit.go.jp/sogoseisaku/ocean_policy/content/001861056.pdf

*2 <https://bluerobotics.com/store/thrusters/grippers/newton-gripper-asm-r2-rp/>

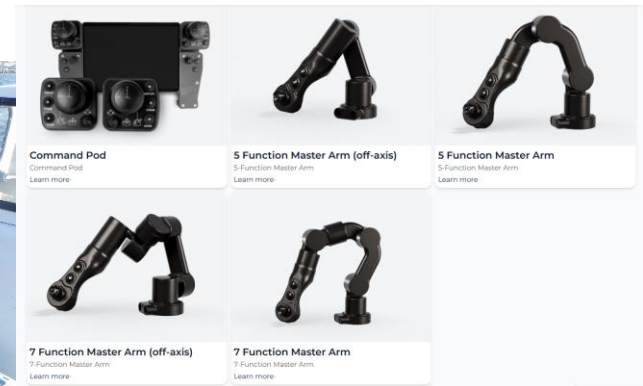
3. 研究開始当初の背景

先述の通り水中ロボットへの汎用アーム搭載およびそれを利用した作業技術の開発は重要な課題であるが、水中汎用アームは市販されているものは高価であったり、大型高重量、高出力のものが研究中であったりと、若手研究者が容易に利用可能なものは存在しなかった*1*2。そこで、水中多関節ロボットアームの研究を行うためにはアームの開発から行う必要があり、腕を用いた作業に関する知見の拡充に大きな障壁を有するものとなっていた。



既存アーム例

また、この腕を動かすための操作には、アームの形を模したリーダー型のコントローラが多く用いられる。操縦者にとって各関節角度が容易に判断できる反面、1つの腕の操作で両手を使用する必要がある等、ROVとの操作両立を考えると使いやすいコントローラの検証が必要であると感じた。この操作要素が飽和している状態に加え、エンドエフェクタの操作という操作要素の追加について、対応する必要がある。



BlueROV2を操作している様子

アーム用コントローラ

*1 <https://robotstart.info/article/2020/06/26/209732.html>

*2 https://www.jstage.jst.go.jp/article/jrsj/43/3/43_43_246/_pdf/-char/ja

4. 研究の目的

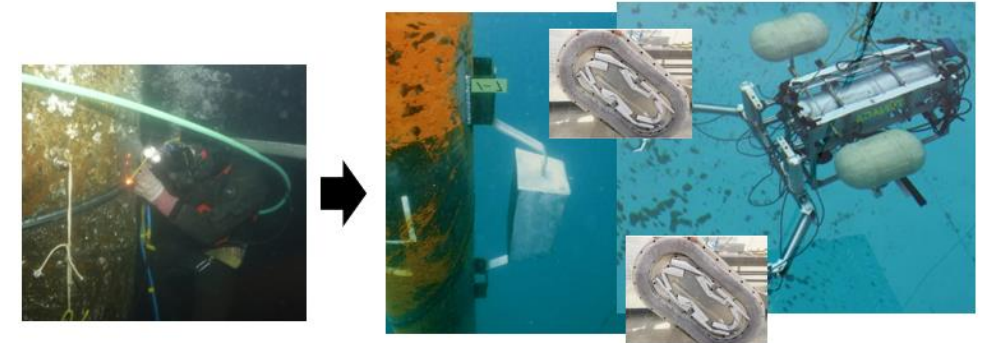
本研究の大きな目的は、水中ロボットによる潜水士の作業代替を進めることであり、そのアプローチとして腕を用いた作業の拡充を行うこととした。

この腕を用いた作業として、提案時には右の通り目標を設定している。

- 双腕に水中UVG(Universal Vacuum Gripper, 吸着把持ハンド)を有するROVを開発
- UVG付き双腕ROVを操作するコントローラを開発
- 鋼管杭の犠牲陽極交換や、矢板のケレンを模擬する予定
- 時間的余裕があれば、実海域で実証試験

本研究で実現する内容

- 双腕に水中UVGを有するROVを開発
- UVG付き双腕ROVを操作するコントローラを開発
- 実作業を模擬した水槽実験で、作業が安定して行えることを確認
 - 鋼管杭の犠牲陽極交換や、矢板のケレンを模擬する予定
- 時間的余裕があれば、実海域で実証試験



提案時の到達目標



5. 研究の方法

研究は以下のステップで実施した.

- 水中マイクロサーボを使用した6自由度アームの開発
- UVGの水中対応
- 開発した6自由度アームを基にした, 機能特化アームの開発(別予算を併用)
- 吸着把持動作時の過負荷検出機能の検証
- 操作インターフェースの準備
- 指数座標系を用いたアーム動作シミュレーションの実施
- 吸着把持動作の検証

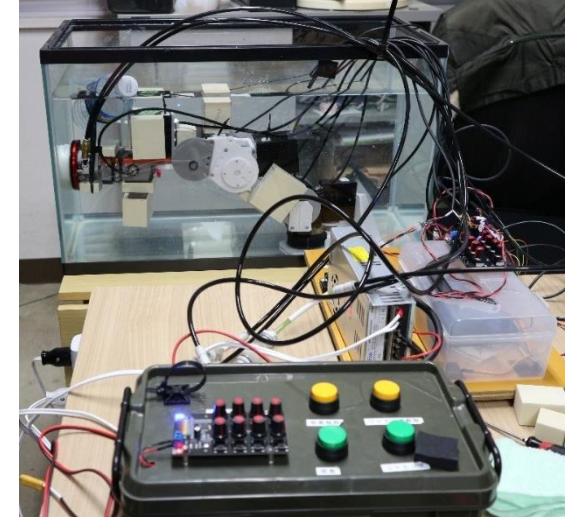
6. 研究成果

- 水中マイクロサーボを使用した6自由度アームの開発

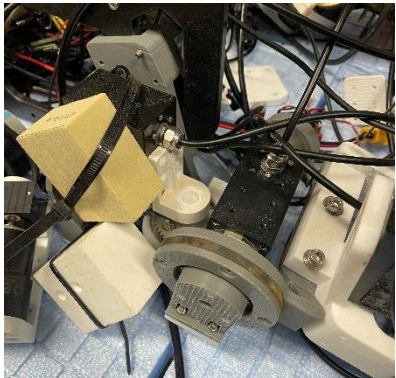
水中での腕を使用した動作を検証するために、水中マイクロサーボを使用した6自由度アームの開発を実施した。

ベースとして使用したのは、2024年1月までに開発していた2軸の水中ロボットアームである*1。こちらが2軸で制作していたため、そのまま軸数を増やすとともに、出力の不足が予想される1～4軸へ減速機構を追加したものになっている。

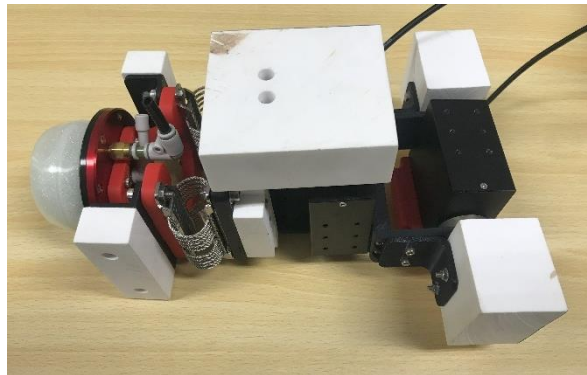
2025年度末時点では、後述する機能特化アームとの共通設計化を目的として、3軸以降の取り換えと、ROVフレームへの固定が容易な形状に変更している。



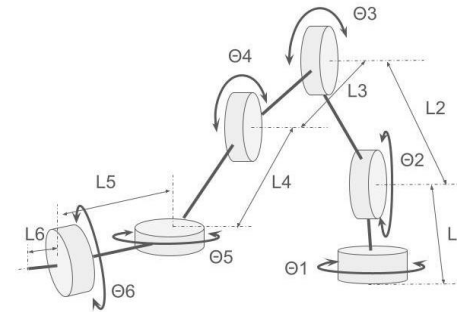
6自由度アームの水中動作確認



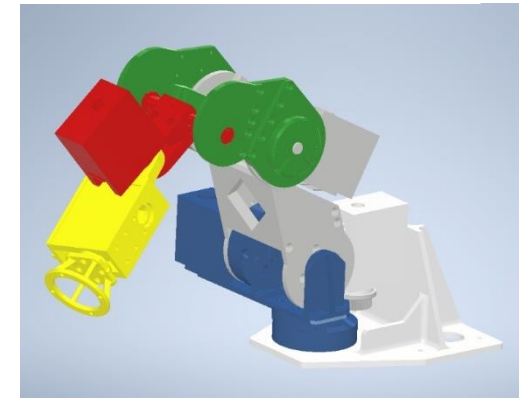
2025年度末の1-2軸



2023年度末に開発していた試作機



6自由度アームの軸関係



6自由度アーム設計図

ISOPE2025にて発表

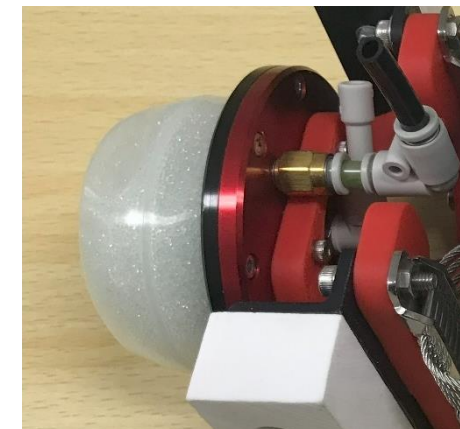
*1 M. Ozawa, et. al., "Attitude control of underwater robot using UVG arm", Proceedings of The Twenty-Ninth International Symposium on Artificial Life and Robotics, 784-789, (2024).

6. 研究成果

・ UVGの水中対応

既存のUVGは陸上での使用を想定してるため、重量や材質の観点から水中での利用に適していないものが用いられていた。また、陸上では膜内の材質を細かなガラスや硬い樹脂のビーズにすることで回り込み把持を実現していたが、水中だとこの材料選定が原因で、吸着把持がしにくい状況ができていた。そこで、以下の変更を実施することにより、海中での吸着把持により適したUVGを実現した。

- 膜内の粒子をガラスビーズからTPU(Thermoplastic PolyUrethane)へ変更
 - 粒子の変形量増加により、凹凸への追従性が向上
 - 比重減による軽量化
- ベースプレートをアルミから光造形レジンへ変更
 - 比重減による軽量化
 - 圧力チューブ接続部、ねじ部の異種材料接触による腐食の抑制



2023年度末に開発していた試作機
UVG部拡大



水中対応UVG

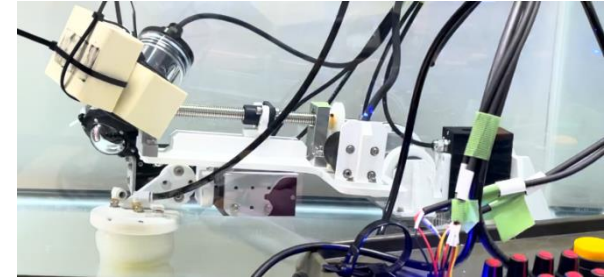
6. 研究成果

- 開発した6自由度アームを基にした，機能特化アームの開発(別予算を併用)

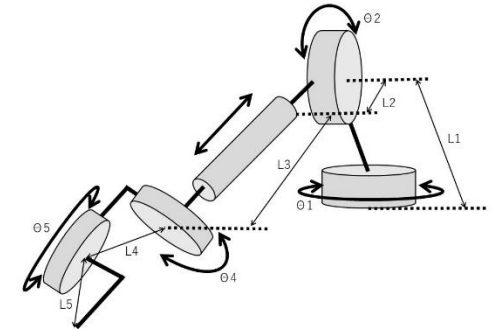
本研究では双腕を用いた作業を想定して汎用6自由度アームを開発していたが，このアームを基にして，様々なタスクに特化したアームが開発できることを確認した。

別の研究テーマとして，河川基金で「河川の流れ中で運用可能なROV」を提案していたため*1，本研究の成果である6自由度アームの設計を流用して，流れ移動アームを開発した。これは6自由度アームが全関節水中サーボで構成していたのに対し，1軸分を流れに逆らうのに十分な推力が出せるように，送りねじ機構を用いた並進関節に変更して構成したものである。

流れ移動アームの開発自体は河川基金で実施し，完成したアームは6自由度アームと併せて本研究の双腕動作検証に利用した。



流れ移動アーム外観



流れ移動アームの軸配置

6自由度アームの関節に利用している水中サーボモータは過負荷により容易に損傷してしまうが、サーボモータの駆動部にセンサを配置するには十分に耐水処理がなされたセンサを使用する必要があることから容易ではない。そこで、防水容器内部に電流センサを配置し、サーボモータへ供給される電力からモータ出力を逆算、力制御への利用や過負荷検出時の負荷低減動作へつなげることを検証した。基礎実験は過去に制作していた簡素なアームを使用して実施し、右の通り負荷に応じた明らかな電流値の変化を確認した。

2025年度末には6自由度アーム、流れ移動アームの匍匐動作時の負荷状況検出を実施しており、こちらをROBOMECH2026で発表する予定である。



Fig. 21 電流値計測試験概要

Table 4 負荷ごとの平均電流値，最大電流値比較

負荷値[g]	最大電流値[mA]	平均電流値[mA]
0	1735	502.77
100	1715	496.92
200	1920	554.05
300	2018	634.56
400	2067	711.27
500	2331	873.86

電流による過負荷検出実験の様子

6. 研究成果

・ 操作インターフェースの準備・検証

ROVに搭載した双腕およびROV自体の移動を制御するコントローラとして、右に示すように腕の操作をフライトコントローラ用ジョイスティック、ROVの移動を足元のペダルで実現する想定で、操作インターフェースのハードウェアを市販品で構成した。

制御としては、ジョイスティックによるアーム先端の位置、速度指示の実現、ペダルによるROV本体の前進後退、旋回指示が考えられるが、市販品の流用ではアーム、ROVの本体のいずれもz軸方向に動かすことができないため、指示方法に人間の感覚との齟齬が出る。

今後の方向性としては、完成した双腕での匍匐移動の操作状況検証や、壁面吸着時の操作内容を解析し、軸が不足する状態で人間の身体感覚に一致する操作方法の検証か、市販品に1軸分の操作内容を追加するかの判断を進めていく。



双腕ROV操作インターフェース ハードウェア

6. 研究成果

- 指数座標系を用いたアーム動作シミュレーションの実施

双腕アームの制御方法として、アーム1本ずつをそれぞれ別の式で制御するのではなく、本体部分で分岐した1つのアームシステムとして制御する方法を模索するため、途中分岐に強い指数座標系を用いたアームの制御を検証した。これを実現することで、6自由度を持つ双腕アームとしての利用から、双腕を一本の腕として利用することがシームレスに実現可能である。

研究期間中は1本のアームを対象として、手先位置の移動範囲の検証を実施した。

$$R_i = e^{\hat{\xi}_i \theta_i} = \begin{bmatrix} e^{\hat{\omega}_i \theta_i} & (I - e^{\hat{\omega}_i \theta_i}) (\omega_i - v_i) + \omega_i \omega_i^T v_i \theta_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$M_f \ddot{\theta} + C_f \dot{\theta} + N_f = \tau$$

$$V = \sum_{c=1}^C \sum_{i=1}^n \hat{C}_h(c, i) g(m_{ic} - \rho V l_{ic})$$

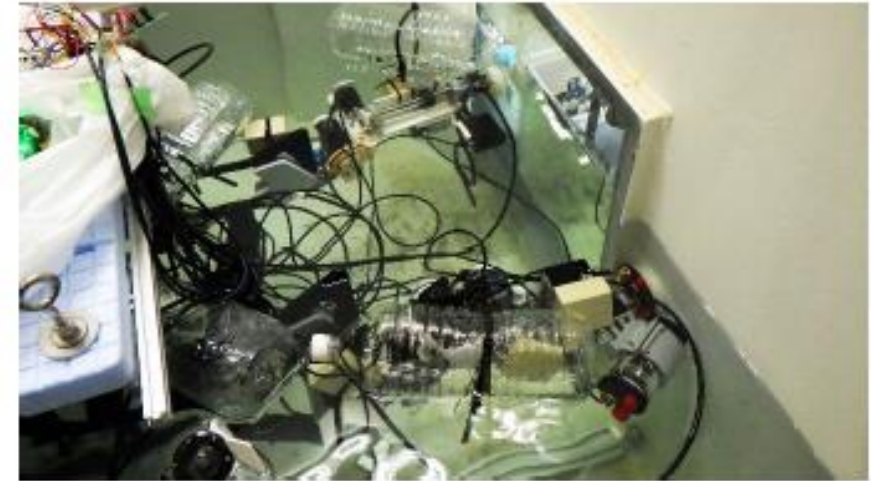
指数座標系を用いた水中アームの制御式(一部抜粋)

6. 研究成果

- 吸着把持動作の検証

ROVへの搭載を容易にするために、開発した双腕アームおよび制御部はスキッド1つにまとめた。

双腕を用いた作業の一環として、壁面への吸着および吸着点を移動させていくことによる匍匐動作ができることを確認した。



双腕をスキッドに搭載した状態での壁面吸着

引用ページにて適宜提示