

研 究 報 告

令和 7 年 4 月 20 日

公益財団法人 前田記念工学振興財団

理 事 長 岸 利 治 殿

研究代表者

所 属 : 岩手大学

氏 名 : 三好 扶

研究課題名：複数 ROV の同時展開による水中長尺資材搬送とその組み立てに関する
実験的検証

助成金額： 100 万円

研究実施期間：自 令和 6 年 4 月 1 日 ～ 至 令和 7 年 3 月 31 日

複数 ROV の同時展開による水中長尺資材搬送とその組み立てに関する実験的検証

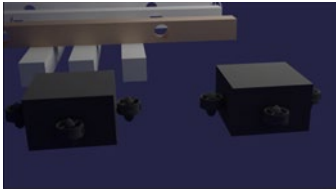
Experimental verification of underwater lengthy object transfer and its assembly by simultaneous deployment of multiple ROVs

岩手大学 教授 三好 扶

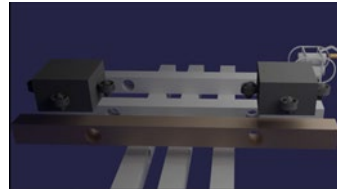
（研究計画ないし研究手法の概略）

本研究では複数の ROV による長尺資材搬送と定位、およびその組み立てまでの一連の流れを実験的に検証する。始めに、検証内容について、簡易シミュレーション画像によって説明し、必要となる事項を整理する。

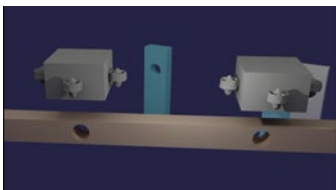
(T1) ROV (A, B) が長尺資材へアプローチ



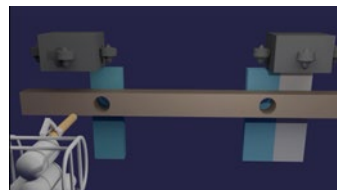
(T2) ピックアップ



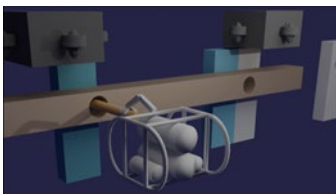
(T3) 組付け土台へ搬送



(T4) ROV (A, B) は定位、ROV (C) がアプローチ



(T5) 固定用資材挿入



(T6) 隣の穴へ移動し同一作業実施



T1 フェーズ：

2 台の ROV (A)、(B) が長尺資材へアプローチする。資材はプール内で視認できる場所においてあり、ここからピックアップする。

T2 フェーズ：

2 台の ROV (A)、(B) がそれぞれが長尺資材をピックアップする。本研究では 2 指ハンドによる把持によってピックアップする。

T3 フェーズ：

長尺資材をピックアップした 2 台の ROV (A)、(B) が、資材置き場近傍から組付け用土台近傍まで長尺資材を搬送する。この行程は操作者によるマニュアル操作とする。

T4 フェーズ：

2 台の ROV (A)、(B) は組付け用土台にあらかじめ設置されたランドマーク（AR マーカ）を見

つけた後、定位保持を行う。定位保持は heave（ランドマークからの距離）、surge（ランドマークに対して前後方向）、sway（ランドマークに対して左右方向）、および yaw（ランドマークに垂直な軸周りの回転角度）をある一定の値の範囲内に収め続けることと定義し、これを定位保持制御と本研究では呼ぶこととする。

組付け用土台に設置した「穴 1」を基準とし、資材に設置した「穴 2」は、穴 2 中心を通るベクトルが穴 1 中心を通るベクトルと平行かつ一直線上に並び、穴間距離 30-50mm となるよう、2 台の ROV(A)、(B)を定位保持制御する。また穴 1 はアレイ型 AR マーカによって位置を算出できるよう、本研究用の治具を作成した。

穴 1 と穴 2 を固定するための治具（ピン）は ROV(C)が把持搬送し、穴 1 のアレイ型 AR マーカをランドマークとした視覚フィードバック制御によって穴 1 へアプローチする。

T5 フェーズ：

ROV(C)は、定位保持制御中の ROV(A)、(B)によって穴 2 が定位保持され、かつ穴 1 と穴 2 が同一軸上の一定の範囲内に存在すると判断できた際に、固定用ピンを穴 1 側から挿入する。研究初期段階では、ROV(A)、(B)、(C)間は直接的な通信を行わず、相互の位置姿勢情報は操作者による視認のみとした。

T6 フェーズ：

ピン挿入後、ROV(C)は資材をランドマークとして平行移動し、再度 T5 と同様な作業を実施する。

以上のフローに対し、各要素の研究開発状況ならびに研究成果について報告する。

（実験調査によって得られた新しい知見）

<資材搬送の実験的検証>：T1-T2 フェーズ対応

（発表論文[3]）

搬送対象を図 1A に、搬送の様子を図 1B, C に示す。機体は 4 つのスラスタを対角線上に配置したクアッドコプタ型 ROV（これを ROV(A)とする）を採用しているため、前進移動の際は機体が当該方向へ傾斜して移動する様子が確認できる。

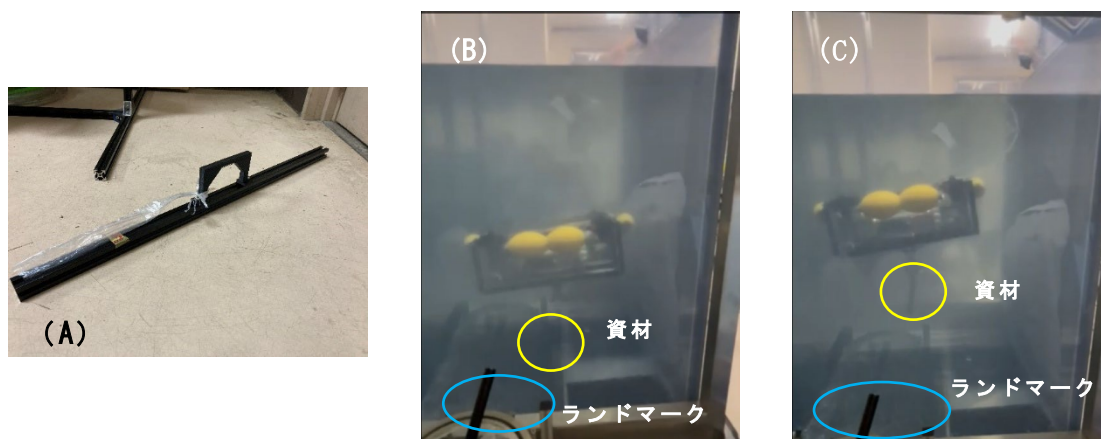


図 1 A：搬送対象物（長さ 620mm）、B：把持直後から上昇と前進移動を開始、C：(B)の状態から上昇と前後移動を継続。

一方、もう1台のクアッドコプタ型 ROV (ROV(B)とする) を準備し、長尺資材 (2m) の両端部近傍を ROV(A)、(B) が把持し搬送したところ、大別して2つの要因により本研究期間内に解決に至らなかった。要因は(1) 操作者に起因するもの、(2) ハードウェアに起因するものと分けられる。(1) は操作者間の操作習熟度、および搬送時の移動戦略や意思決定にあり、例えば、ROV(A) が右からアプローチしたいときに操作者が選択した戦略が、ROV(B) 操作者に意図とともに伝達できず、お互いが独立した挙動となり、結果的に資材搬送に至らなかった。また(2) は ROV(A) と(B) の移動速度の相違であり、ROV(A)、(B) とともに前進動作を採択していても移動速度が異なるため、結果的に所定の位置への資材搬送が達成されなかった。このことから、解決に至るために講じるべき手段は下記の早期実現と考えている。

- ・ ROV(A)、(B) を同一の機体とする
- ・ ROV(A) をリーダ、(B) をフォロウとし、(B) は(A) を追従する自律移動制御系の構築
- ・ ROV(A)、(B) が一意な編隊を維持しつつ搬送作業を達成する、編隊航行制御系の構築

空中、陸上、水上と異なり、水中は目視確認ができないことから、水中での編隊航行制御系の構築はチャレンジングな研究テーマと言え、本研究を実施したことで着想に至った新たなテーマ設定であり、現在も引き続きその研究に取り組んでいる。

<アレイ型 AR マーカによる穴位置選出精度向上の実験的検証> : T4 フェーズ

(発表論文[1])

搬送資材、組付け用土台のいずれも固定用ピンを挿入する「穴」が必要である。この穴位置の精度がピン挿入の成功率を決定づけることから、穴位置計測精度を高める手段としてアレイ型 AR マーカを採用する。一般に、AR マーカはカメラ画角内であれば正対時がもっとも誤差 (フラクチュエーション) が大きいいため、本研究では正対せずに穴位置を計測する手段を講じることとした。

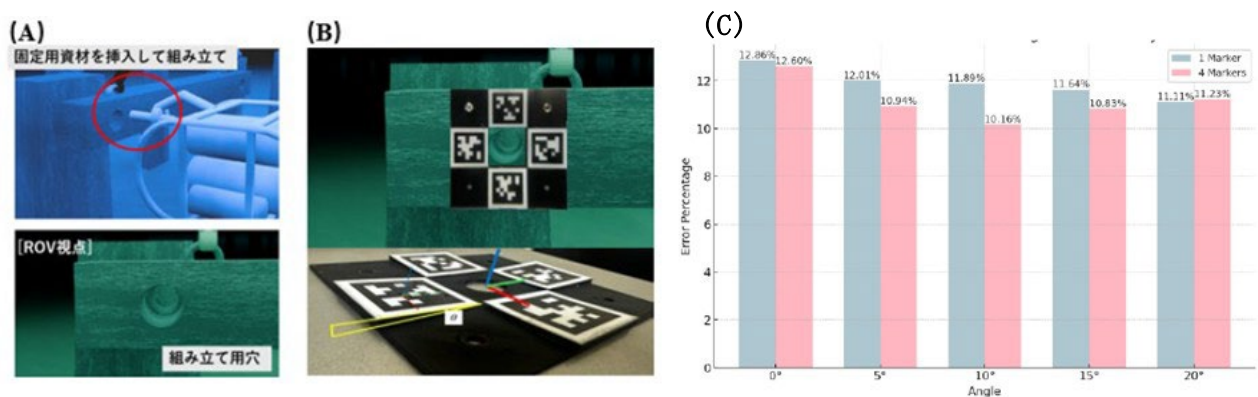


図2 A: (上段) 固定用ピンを挿入する俯瞰図、(下段) 固定用ピンを持つ ROV からの視点、B: (上段) アレイ型 AR マーカの配置例、(下段) アレイ型 AR マーカの傾斜角模式図、C: 傾斜角の違いによる1つの AR マーカと4つの AR マーカの識別誤差率。

図2のように4つの AR マーカを配置したアレイ型 AR マーカの中央部がピン挿し用固定穴とし、4つの AR マーカ重心位置から穴位置を求める。この結果、AR マーカは正対位置から15度の傾斜角を持ち、4つの AR マーカ重心位置から算出したとき、穴位置の精度が最も高くなることが明らかとなった。この点については現在、論文執筆中である。

<ピン挿し工程の実験的検証>：T5 フェーズ

(発表論文[2])

アレイ型 AR マーカを設置した組付け用土台に対し、ROV(C)の探索、識別、接近、および位置合わせ状況が確認された。また ROV(C)からのアレイ型 AR マーカ視認状況、および ROV(C)による固定用ピンの挿入状況から、識別率の向上したアレイ型 AR マーカを用いたピン挿し工程は達成できたことが確認された。

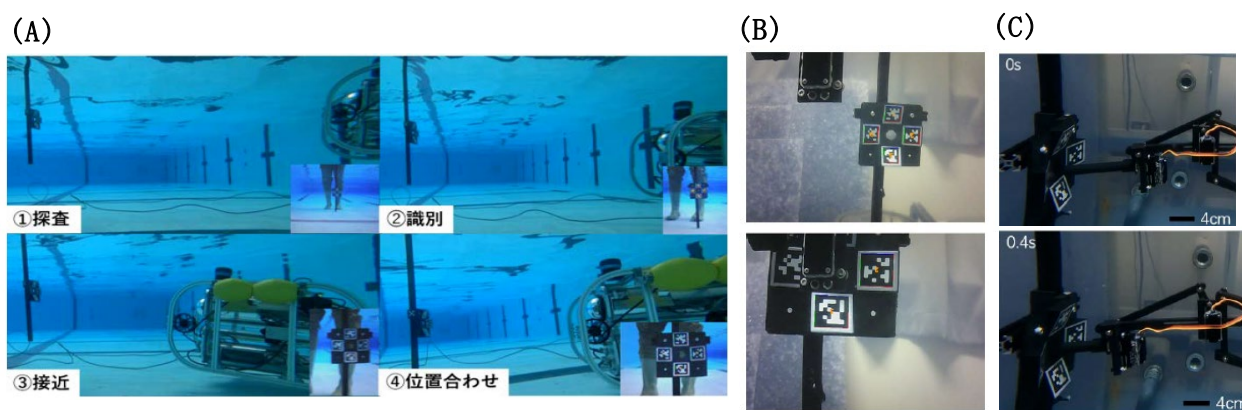


図 3 A:アレイ型 AR マーカの探索から識別、接近、位置合わせの状況、B:位置合わせからピン挿入に至る過程でのカメラ画角内での様子、C:ピン挿入の俯瞰図

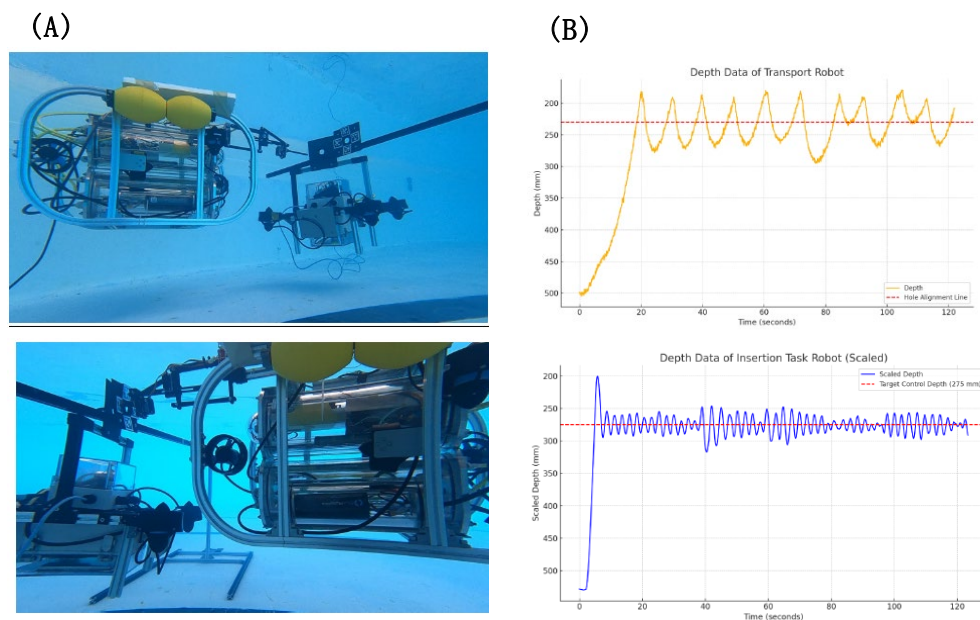


図 4 A: (上段) ピンを把持する ROV(C)が資材搬送する ROV(B)の穴位置整合を待機する様子、(下段) 穴位置が整合した後にピン挿入を達成(報告書作成時、我々の知る限りにおいて世界初)、B: (上段) 一連の作業遂行における ROV(C)の深度変化の様子、(下段) 同 ROV(B)の深度変化の様子

次に、ROV(B)が資材搬送をし、組付け土台のアレイ型 AR マーカに対する穴位置整合、ここからの定位保持制御を行っている際に、ROV(C)の待機状況ならびに穴位置整合後のピン挿入

状況から、複数台の ROV による資材組立作業の一部は達成できたと判断される。特に、穴位置整合後のピン挿し工程は、本報告書作成時において我々の知る限り世界初の成果である。この成果は今後も様々な視点から定量的な評価を行い、論文発表に繋げる。

< 定位保持制御の高精度化 > : T4 フェーズ

ROV(B)、(C)によるピン挿し工程において、定位保持制御中の深度が ROV(B)は高い周波数、ROV(C)は低い周波数帯で振動している様子が読みとれる。これは両 ROV とも PID 制御器をベースとしており、ゲイン設定にチューニングの余地がまだ残っていることを示す結果と言える。この点について、現在、逐次 2 次計画法、機械学習、および粒子群最適化 (PSO; particle swarm optimization) のハイブリッドによるゲイン最適化に取り組んでいる。その結果の一部を下図に示す。

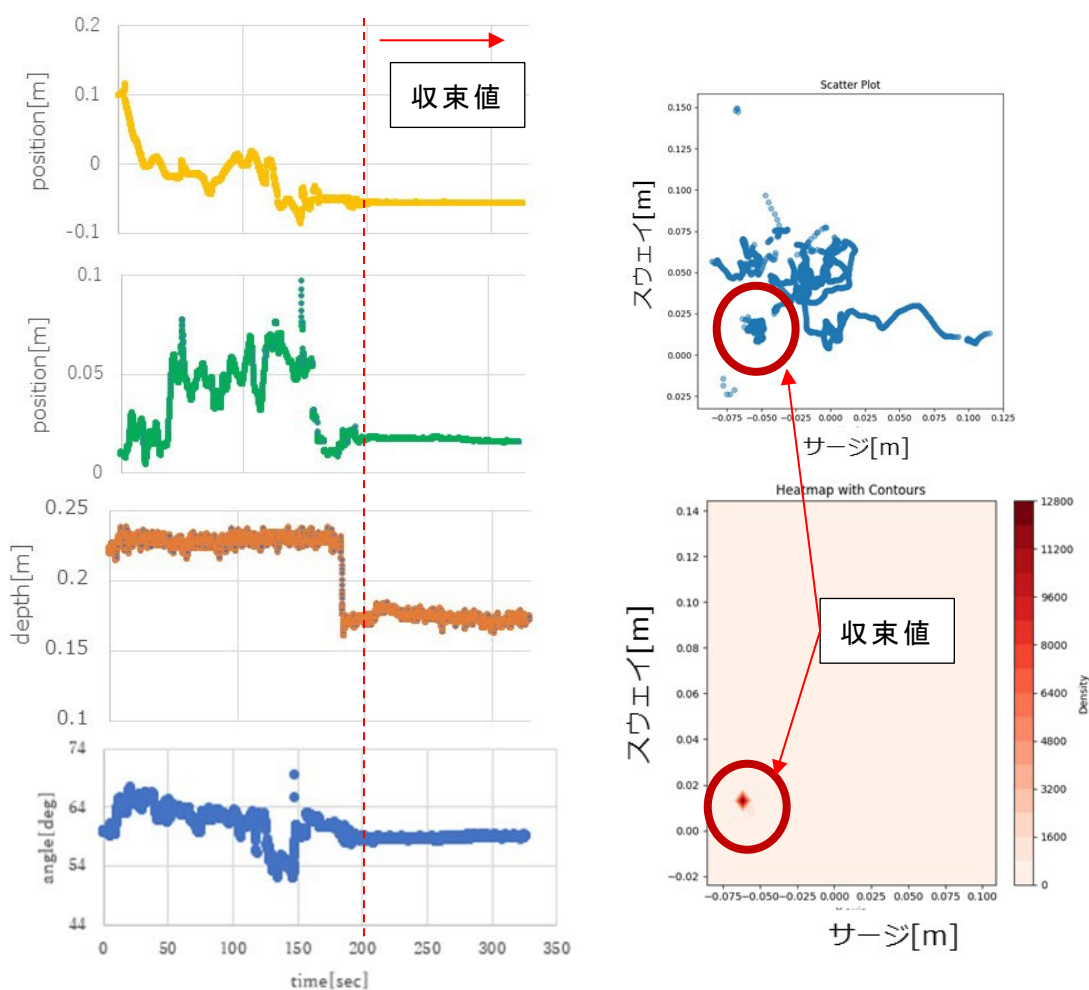


図 5 ゲイン最適化による機体定位保持制御の高精度化の可能性

クアッドコプタ型 ROV は 1 つのスラスタの出力が機体 3 軸方向の姿勢に影響を与える非線形な系であるが、ゲインの最適化が達成されれば、一意に収束する可能性がある。より詳細な機体モデルの構築、シミュレーションも必要であるが、このゲイン最適化が達成されることで、定位保持制御の高精度化という、学術的な意義が高い成果が導出できるであろう。

(発 表 論 文)

- [1] MA BOCHEN, 河田さくら, ZHANG HAN, 花原和之, 小山猛, 三好扶
アレイ型 AR マーカーと水中画像処理技術による資材固定用穴位置認識の精度向上
第 22 回建設ロボットシンポジウム講演論文集, P2-02, 2024
- [2] MA BOCHEN, ZHANG HAN, 河田さくら, 小山猛, 花原和之, 三好扶
ROV を用いた水中建設における固定穴への挿入作業技術の開発
第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2024 講演論文集,
2E1-01, 2024
- [3] 河田さくら, MA BOCHEN, ZHANG HAN, 花原和之, 小山猛, 三好扶
クアッドコプター ROV による水中資材運搬・保持作業の実現
第 25 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2024 講演論文集,
2E1-02, 2024