

(一財) 港湾空港総合技術センター
令和4年度 研究開発助成 成果報告書

助成番号 : 令和 4年 3月 9日付 第 19- 3号

研究開発項目 : 指定課題① に関するもの

ターゲット追従機能を持つ小型 ASV に
よる水中移動体の高精度測位手法

令和5年4月30日

東京大学 生産技術研究所

巻 俊宏

目次

1. 研究開発の目的・意義	1
2. 研究開発の進め方	1
3. 研究成果.....	3
4. まとめ	10

1. 研究開発の目的・意義

水中構造物や港湾、沿岸域の維持管理や点検においては、異常個所を正確に把握するために、点検に用いる水中移動体（海中ロボットやダイバー等）の位置を高精度に求める必要がある。海中では電波が使えず、可視光の減衰も大きいため、測位には超音波が使われることが多い。しかし港湾のような複雑環境においては多重反射（マルチパス）や音響の陰になる領域（シャドウゾーン）の問題があるため、安定した測位は難しかった。本研究では計測ターゲットの自動追尾機能を備えた ASV（Autonomous Surface Vehicle, 自律無人ボート）を開発し、これを音響測位の基準局として用いることで、港湾のような複雑環境においても、水中移動体の安定的かつ広域での測位を実現する。さらに本手法はクレーン無しで運用可能な小型・軽量の ASV であっても実装可能であるため、点検作業の低コスト化にも貢献する。これにより水中構造物や沿岸域の効果的かつ効率的な維持管理を実現する。

2. 研究開発の進め方

本研究では ASV による水中移動体の測位手法を開発する。音響測位方式には複数あるが、本研究では装置が小型で設置が簡便な SSBL（Super Short Base Line）を採用する。SSBL は超音波信号をターゲットとやりとりすることで、往復伝搬時間から距離を、ハイドロフォン間の位相差から角度を求める方式である。図 1 のように ASV にターゲットの自動追尾機能を持たせ、ターゲットの直上に常に位置保持することにより、ASV-ターゲット間の距離を最小化することができるため、マルチパスやシャドウゾーンの影響を最小化することができる。また、計測経路がほぼ鉛直方向になるため、音波の屈折に起因する誤差の抑制も期待される。

申請者らの所有する小型 ASV ‘BUTTORI’をテストベッドとして、シミュレーションや水槽試験を経て手法の開発を進め、最終的には実際の港湾において実証試験を行う。実証試験においては、①海底に設置した固定ターゲット、②水中を遊泳する移動ターゲット、のそれぞれについて提案手法によって測位し、その精度を定量的に評価する。これにより提案手法の有効性を示すとともに、更なる開発に向けた課題を抽出する。

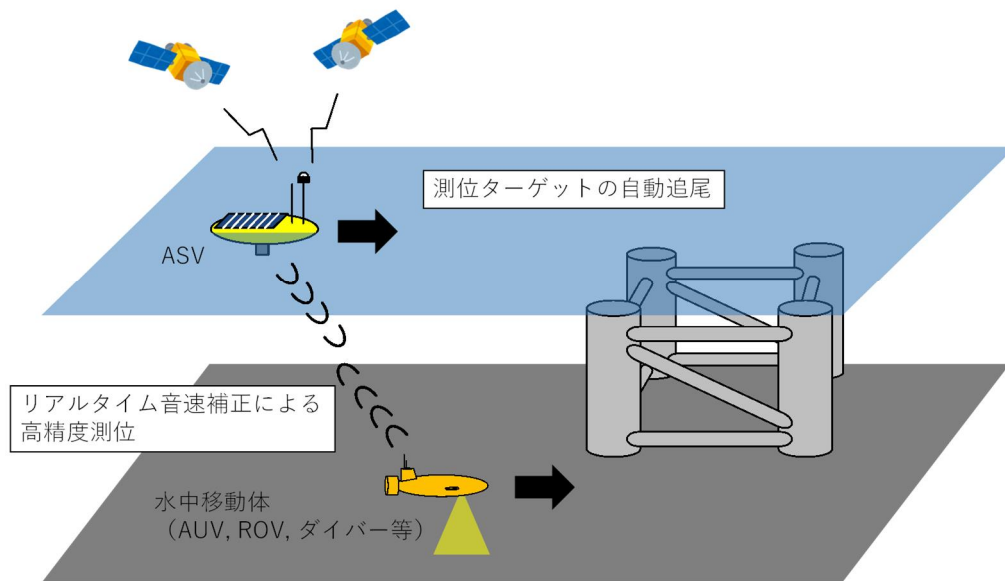


図1 ターゲット追従機能を持つ小型 ASV による水中移動体の高精度測位手法

本研究では、テストベッドとして当研究室の所有する ASV BUTTORI、AUV HATTORI を使用する。これらのスペックを以下に示す。

ASV BUTTORI

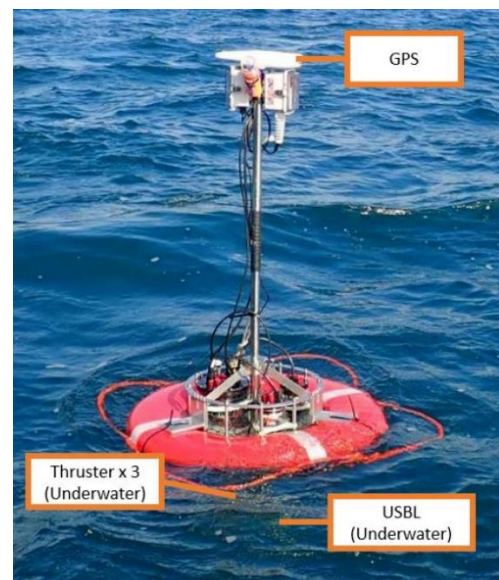
AUV の運用支援用のブイ型の ASV (Autonomous Surface Vehicle)。3 台のスラスタにより波浪や強風にも対応できる高い位置保持能力を持つ。

サイズ：0.8(L) × 0.8(W) × 1.6(H) [m]

空中重量：20 kg

主なセンサ：GNSS コンパス、SSBL、姿勢センサ、水温計

図2
ASV BUTTORI



AUV HATTORI

クレーン無しで運用可能な小型軽量のクルーズ型 AUV。スキャニングソナーを用いたアルゴリズムにより、複雑な海底に沿って低高度 (2m 程度) で追従しながら画像観測を行うことができる。

サイズ：1.0(L) × 0.5(W) × 0.3(H) [m]

空中重量：19 kg

主なセンサ： スキャニングソナー、SSBL、姿勢センサ、深度センサ、カメラ、水温計

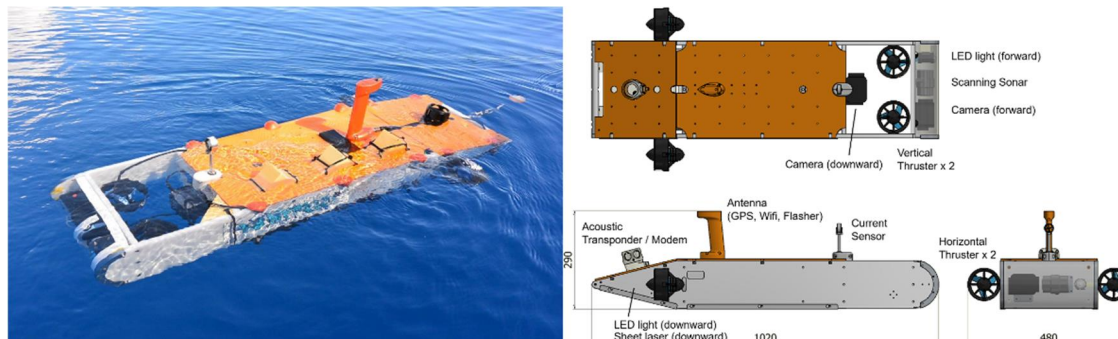


図3 AUV HATTORI (左：外観 右：三面図)

BUTTONI, HATTORI とともに SSBL 方式の音響測位・通信装置として Blueprint Subsea 社製の SeaTrac を搭載している (下図)。使用する超音波の周波数は 24-32 kHz、測位レンジは最大 1km となっている。



図4 SeaTrac (<https://www.blueprintsubsea.com/>)

3. 研究成果

3-1. ASV と AUV の距離と測位誤差についてのシミュレーション

ASV と AUV の位置関係と測位誤差の関係を明らかにするため、シミュレーションを実施した。測位手法は、ASV からの音響信号の到来角および深度差を用いるものであり、誤探知に対するロバスト性を向上させるため、パーティクルフィルタによる確率的推定を導入している。シミュレーション結果を図5に示す。ASV は定点保持しているものとし、AUV の航跡を青線で示す。上段は ASV は原点 (星印) であり、下段では遠方に設置している。AUV の航跡上に、パーティクルフィルタによる自己位置推定結果を約 10m ごとに示した。

この点群の広がり具合が測位誤差を示している。本結果より、AUV と ASV の距離が近いほど、すなわち ASV の真下に AUV 近づくほど測位誤差が小さくなることが確認された。

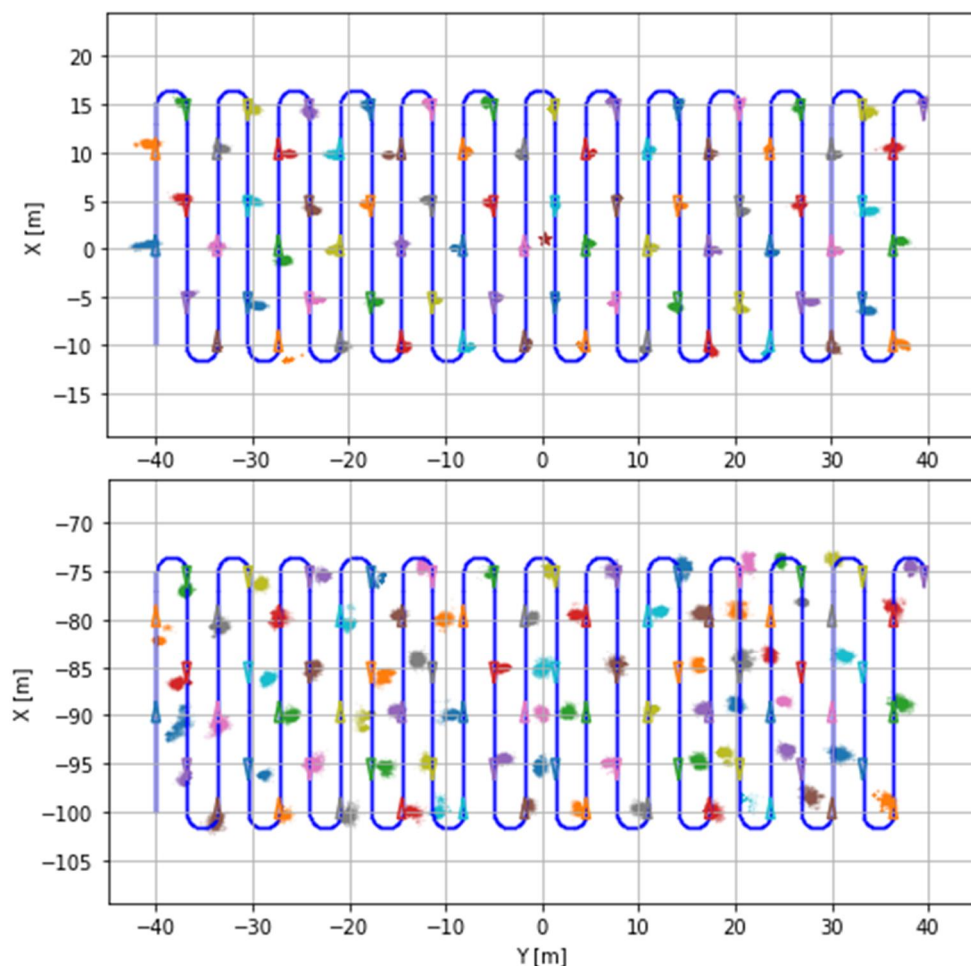


図 5 シミュレーションによる測位性能評価結果

3-2. テストベッド機の整備およびソフトウェアの実装

海域試験に向けて、ASV BUTTORI および AUV HATTORI の整備ならびに水槽での動作試験を実施した。主な実施項目は、内部配線の見直し、電源回路の更新、ネットワーク機器の更新 (BUTTORI)、ドップラー式対地速度計 (DVL) の取り付け (HATTORI)、ソフトウェアの更新、浮力調整等である。また、測位ターゲットの自動追尾プログラムを新たに開発し、BUTTORI に実装した。作業の様子を図 6 に示す。

また、HATTORI のサージ推力指令値とサージ速度の関係を調べた。この情報は AUV の測位に際して重要となる。東京大学生産技術研究所の水槽において HATTORI を一定深度で複数の推力指令値 f_{ref} のもとで水平に航行させ、DVL により実際に出ているサージ速度 u を計測した。結果を図 7 に示す。

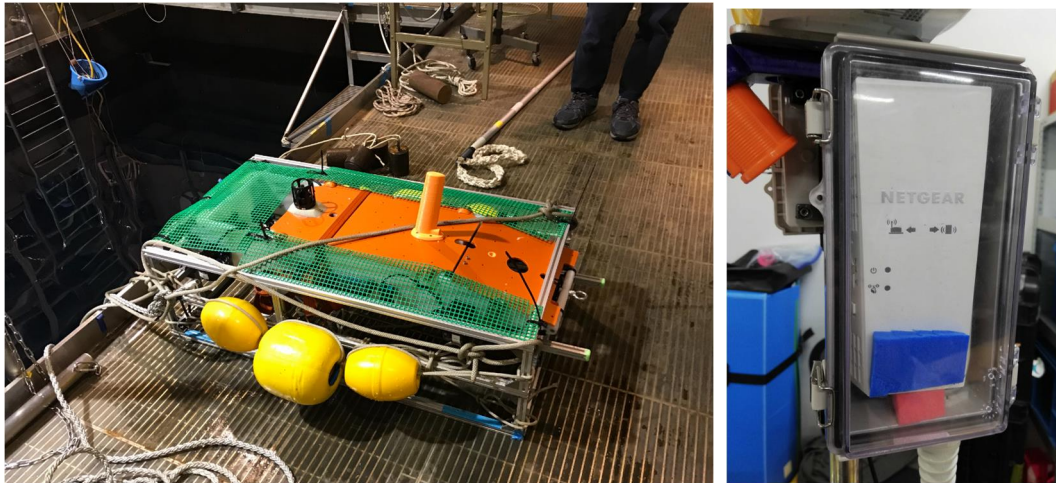


図6 テストベッド機の整備作業の様子（左：HATTORI の水槽試験 海底設置用のフレームに設置している 右：BUTTORI の無線機器の更新）

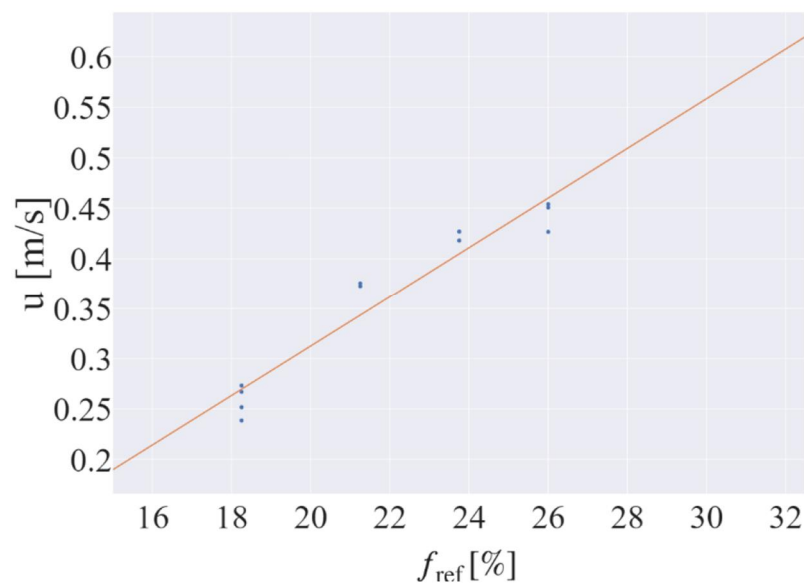


図7 HATTORI のサージ推力指令値 (f_{ref}) とサージ速度の関係

3-3. 海域試験

2022 年 10 月 31 日～11 月 4 日にかけて、神奈川県平塚市の沿岸域において海域試験を実施した。試験海域の水深は 15～20m 程度である。水中音速のリアルタイム計測による測位精度向上について検討するため、HATTORI、BUTTORI にはそれぞれ水温計を搭載した。実験の様子を図 8 に示す。



図8 海域試験の様子（左：使用した船舶 右：HATTORI 潜航開始 右奥の BUTTORI は定点保持中）

3-3-1. BUTTORI の定点保持性能および固定ターゲットの測位性能評価

まずは BUTTORI の定点保持性能ならびに海底に固定したターゲットの測位性能を評価するため、HATTORI を海底に設置した状態で、BUTTORI を複数の地点で定点保持させ、HATTORI を測位する試験を行った。BUTTORI は HATTORI との水平距離が約 50m の地点からスタートさせ、遠隔操縦によって HATTORI から遠ざけつつ、一定距離離れるごとに定点保持させた。結果を以下に示す。

定点保持中の GPS による BUTTORI の測位結果を図 9 に示す。BUTTORI は 4 か所でそれぞれ 6~10 分間、定点保持を行った。試験中の有義波高は 0.4m、流速 0.07m/s、風速 6~10m/s であった。いずれの場所でも、指定点から約 1m の範囲に保持することができた。

HATTORI の測位結果を図 10-11 に示す。図 10 は BUTTORI と HATTORI 間の水平距離を BUTTORI による測位結果（SSBL）および GPS による計測結果と比較したものである。定点保持中（GPS の値が一定になっている区間）は SSBL の測位結果も一定になっていることから、SSBL により安定した測位が行われたことが確認できる。両者の間に 50~80m 程度のオフセットがあるが、この理由として HATTORI の設置点がずれていた可能性がある。図 11 に BUTTORI-HATTORI 間の距離（SSBL 計測値）と SSBL による測位成功率（測位結果が得られた割合）の関係を示す。距離 150m までは成功率ほぼ 100%であったが、それを超えると 80%程度まで下がり、350m を越えると急に 0%に落ちていることがわかる。使用した装置の仕様（測位レンジ 1km）の半分以下の距離で測位不能となったが、この原因として、浅海域で実験したことによる海底および水面のマルチパスの影響が考えられる。

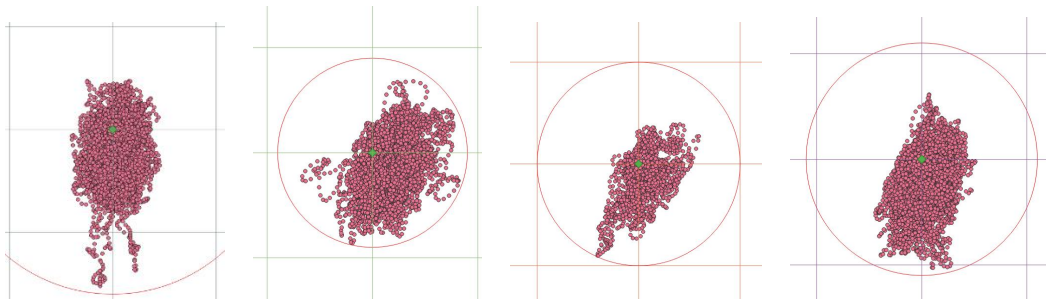


図9 定点保持中の BUTTORI の航跡 (グリッド幅 1m)

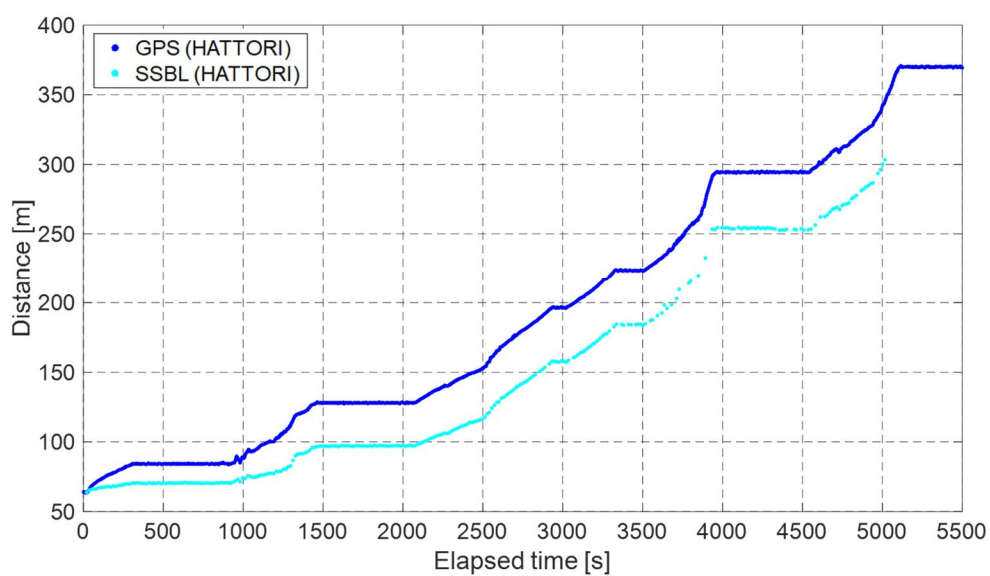


図10 BUTTORI—HATTORI 間距離の時間変化

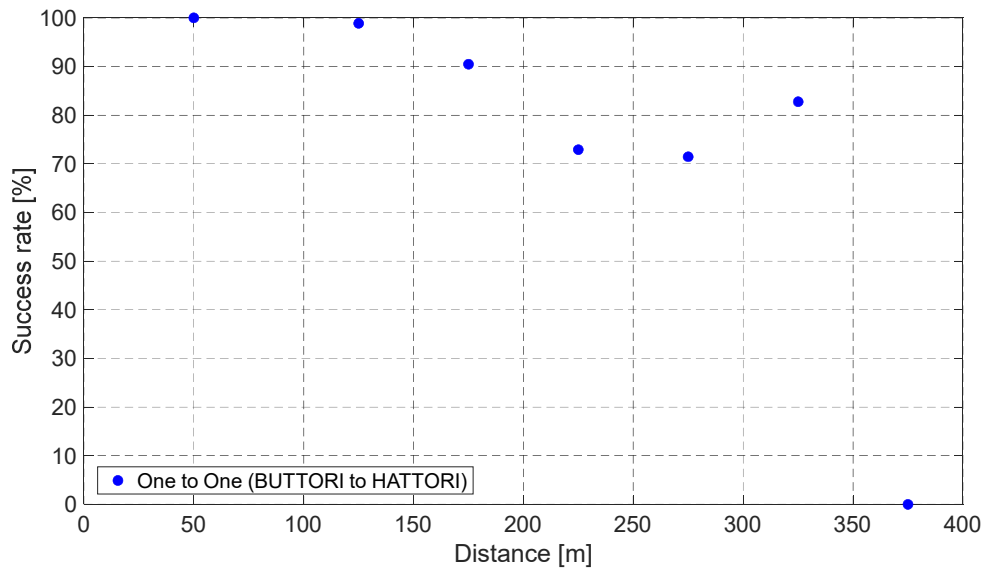


図 11 BUTTORI－HATTORI 間距離と SSBL 測位成功率の関係

3－3－2．移動ターゲットの追従性能評価

次に AUV が移動する場合の追従性能および測位性能を評価する試験を実施した。HATTORI を海底近傍（高度 1 m）、サージ推力一定で一定時間ごとに向きを 180 度変えて約 1 時間航行させ、これを BUTTORI により追従させた。

図 12 は BUTTORI が SSBL により計測した、BUTTORI－HATTORI 間の水平距離の時間変化である。5～30m の範囲で安定して追従できていることがわかる。約 3 分周期で変動しているのは、AUV が向きを変えたタイミングと合致している。

図 13 に HATTORI の測位結果を示す。座標系は上向き北、右向き東であり、HATTORI の速度・姿勢センサによるリアルタイム推定値（デッドレコニング）、BUTTORI が追従しながら SSBL で計測した測位結果（黒点）、SSBL 測位を考慮してパーティクルフィルタにより後処理で再推定した結果を重ねて示す。青点はパーティクルフィルタのサンプル分布であり、この広がりがある HATTORI の測位結果の確からしさを示している。BUTTORI の測位結果を用いることで、デッドレコニングによる測位のずれ（ドリフト）を補正できていることがわかる。図 14 にサンプルの XY 座標の分散・共分散を示す。南北方向、東西方向ともに標準偏差 1～3m 程度で安定して測位することができた。

上記の結果は音線屈折を考慮していない。HATTORI と BUTTORI で計測した水温より水中音速プロファイルを推定し、音線屈折を加味した再推定も実施したが、音速がほぼ一定であったため有意な差は見られなかった。

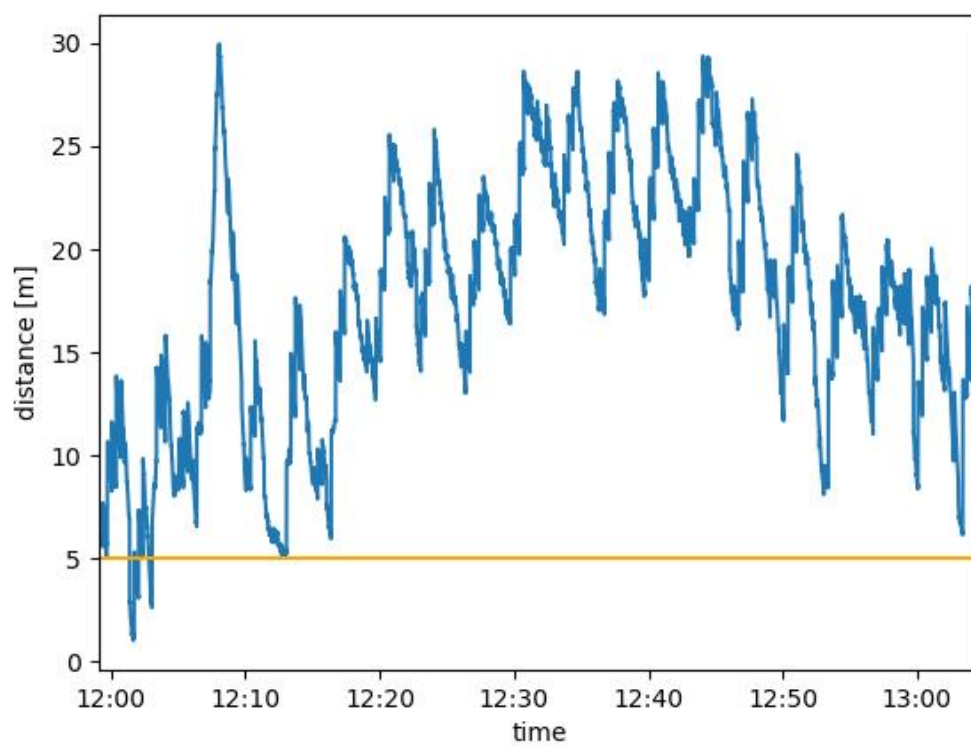


図 12 BUTTORI—HATTORI 間距離の時間変化

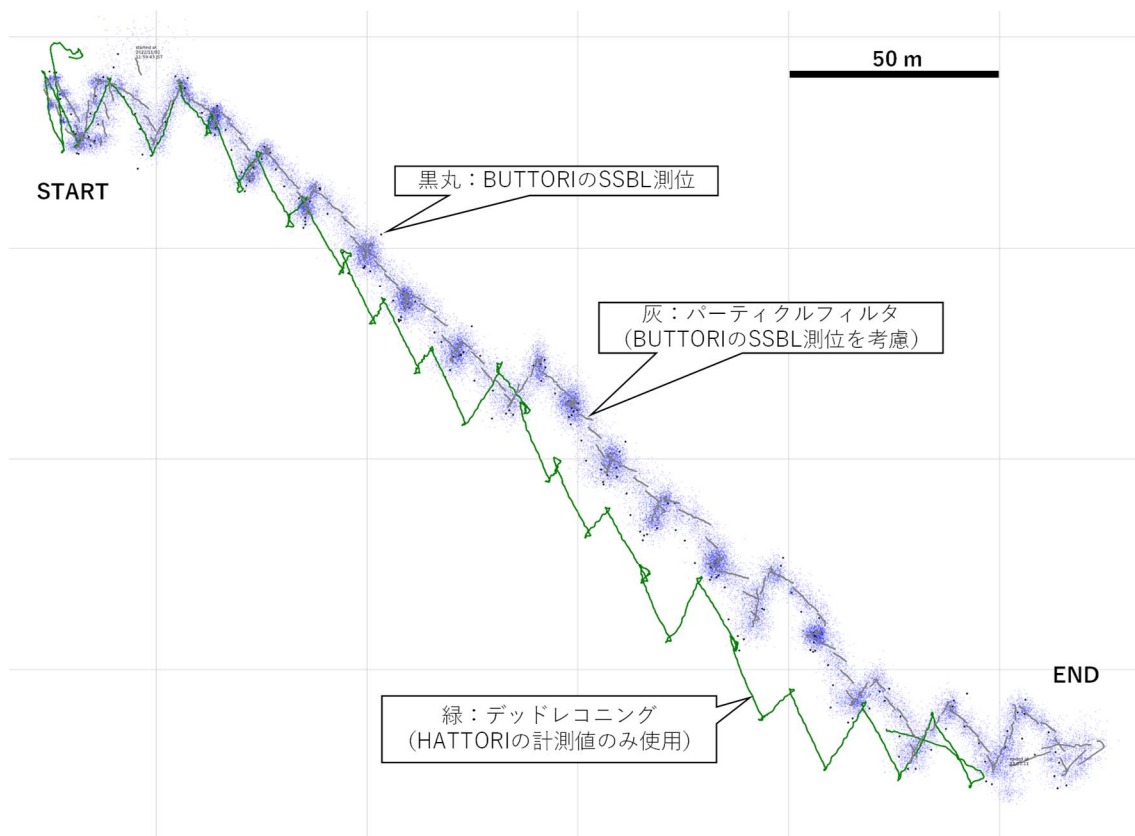


図 13 HATTORI の測位結果

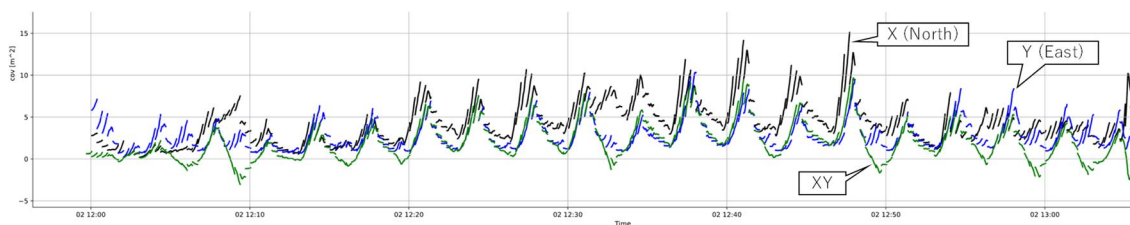


図 14 パーティクルフィルタのサンプルの分散・共分散

4. まとめ

本研究では港湾のような複雑環境においても、水中移動体の安定的かつ広域での測位を実現するため、計測ターゲットの自動追尾機能を備えた ASV (Autonomous Surface Vehicle, 自律無人ボート) を開発し、これを音響測位の基準局として用いることで用いる手法について海域試験により性能評価を行った。

申請者がこれまで開発してきた AUV HATTORI および ASV BUTTORI により、神奈川県平塚新港周辺で試験を行った。その結果、BUTTORI は誤差 1m 以内で安定して定点保持

できること、水平距離 150m まではほぼ確実に海底のターゲットを測位できることがわかった。また海中を移動するターゲットに対しても、水平距離 30m 以内を保ちつつ追従できること、SSBL により安定してターゲットを測位できること、さらにその測位結果を用いることで、デットレコニング時の測位誤差を修正できることを確認した。音速補正による測位性能向上については試験時の水中音速がほとんど一定であったため評価できなかったが、提案手法により、沿岸域であっても安定的かつ広域で水中移動体を測位できることが示された。