

令和 3 年 6 月 22 日現在

機関番号：82706

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18H01650

研究課題名（和文）単独の基準点との音響測距を基にした効率的・高精度なAUVナビゲーションの研究開発

研究課題名（英文）Research on Efficient And Precise Navigation of An AUV Based on Acoustic Measurement of Distance from Single Reference Point

研究代表者

渡邊 佳孝（Watanabe, Yoshitaka）

国立研究開発法人海洋研究開発機構・研究プラットフォーム運用開発部門・副主任研究員

研究者番号：40359138

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,300,000円

研究成果の概要（和文）：自律型無人探査機（AUV）による海中調査観測において重要な自機位置の推定において、効率的、高精度かつ母船を用いない運用にも対応できる、単独の基準局を用いた位置推定手法についてシミュレーションと実海域実験により検討および検証を行った。チップスケール原子時計を採用し、測距を行うため基準局からAUVに送信する音響信号を連続信号にすることで基準局側の情報を含み、一つの信号内で複数の測距結果を得ることができる。実海域実験では、基準局を海底に係留する場合と海上に浮遊させる場合について実施し、連続信号受信中の数秒程度において位置推定が収束することを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

研究船の使用機会が減少する等、海中観測のためのリソースが減少する中、AUVを用いる場合のような自動観測手法が活発になってきており、このような観測手法を、観測結果の価値を維持したまま、効率化、省人化するための要素技術の一つとして意義を持つ。海中の調査・観測活動にとって、実施した位置をできるだけ精度高く得ることは非常に重要である。また、研究においては、近年実用化されたチップスケール原子時計や、発展する信号処理技術、水中音響通信技術等を組み合わせて活用することを想定して実施した。

研究成果の概要（英文）：In underwater observation using autonomous underwater vehicle (AUV), positioning of AUV is very important. In this study, a positioning method with one reference device, which is efficient, accurate, and available for mother-ship-less operation, was considered. And an ocean experiment was conducted. A chip scale atomic clock was adopted. Acoustic signal with which ranging between the reference device and the AUV is achieved was a continuous signal, including some information, and many ranging results can be obtained from one signal. In the ocean experiment, in one case the reference device was moored on the sea bottom, and in another case it was floating on sea surface. It was found that the estimation of the position of AUV converged in a few second with one acoustic signal.

研究分野：海中音響工学

キーワード：水中音響測位 AUV ナビゲーション 海中無人探査機

様式 C-19、F-19-1、Z-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

近年、海中の調査・観測において、母船等の拘束を受けず、自律的に航行を行う自律型海中探査機（autonomous underwater vehicle: AUV）による効率的な広範囲の観測が一つの主流になりつつある。特に、あらゆる調査の基礎となる海底地形の精密計測、海底探査の第一段階を担うリモートセンシングによる広域調査において威力を発揮している。

AUVは、海底近くを比較的高速に安定して航行できるため広範囲を精密に調査することができるが、取得データの品質を保つためには高精度な位置の把握が必要であり、また調査・観測を計画に忠実に行うためには、高精度なナビゲーションが要求される。AUVのナビゲーションでは、一般的に3軸のジャイロスコープと加速度計から成る慣性航法装置（inertial navigation system: INS）が基本となり、海底面から150m程度までの高度においてはドップラ速度計（Doppler velocity log: DVL）と統合することで自機の位置を推測する。INSはセンサ値の積分によって位置を算出するが、高精度なものであってもドリフト誤差が単独では1時間あたり500~1kmにもなり、実用に耐えない。海底面近傍では、DVLの補助をうけることで、1時間あたり5~10m程度の高精度なナビゲーションを行うことができる。しかしながら、新海域の調査の場合にはDVLの使える海底近傍に到達するまでに時間が掛かり、また起伏に富んだ地形ではDVLの欠測や動作不安定が生じることがある。そこで、海中では大きな減衰によって使用できない電波に代わり、GPSのように音響信号を用いて位置計測を直接的に行う音響測位（acoustic navigation system: ANS）が必要となる。

ANSとしては、一般的によく用いられるものとしてSuper short baseline (SSLB)とLong baseline (LBL)方式がある。SSBLは、母船から送信する音響信号に対してAUVに装備された音響トランスポンダが応答信号を返し、母船で応答信号の到来方向と往復の音響信号の伝搬時間から、母船上でAUVの位置を計測する。LBLは、3本以上の音響トランスポンダを海底に設置し、UAVから送信した音響信号に対する各トランスポンダの応答信号によりAUVとトランスポンダ間の伝搬時間を計測し、3辺測量の原理によりAUVの位置を計算する。SSBLは運用が簡便なためしばしば利用されるが、精度は到来方向の計測精度に依存し、深海域では精度が落ちる。また、AUVには音響トランスポンダのみを搭載すれば良いが、母船側では受波器アレイを含む計測システムが必要であり、精度を保つためには精密な実装が求められる。さらに、AUVのナビゲーションに用いるには、計測結果を母船よりAUVに別途伝送する必要がある。LBLは精度が良いが、トランスポンダの設置、位置のキャリブレーション、回収のプロセスに非常に手間と時間を要し、調査海域を変更する度にこれらのプロセスが必要となる。このため、現状で用いられることは少ない。

調査・観測には経済的、時間的に効率的であることが求められる。AUVの運用には、通常、母船が用いられているが、予算をはじめとするリソースは減少傾向にあり、シフトタイムの利用枠は年々厳しさを増している。これに反して、AUVの応用範囲、利用欲求は拡大しつつある。この状況を鑑み、AUVの複数機同時運用技術、自律型海上ビークル（autonomous surface vehicle: ASV）を用いることで母船の負担軽減と他調査の同時実施、等のAUVでの効率的な調査・観測手法の研究開発が活発化している。これに付随する要素技術として、効率的かつ高精度なナビゲーション手法の開発が一つの重要な研究課題となる。

2. 研究の目的

本研究課題では、LBL手法のような音響信号の伝搬時間の計測による距離計測を基にした手法において、複数の基準点を用いるのではなく、単独の基準点を用いることにより、LBL手法に相当する高精度を確保しつつ、時間的、経済的な運用コストを抑制した手法の研究開発を目的とする。

単独の基準点とは、例えば海底に設置する一つの音響トランスポンダを指し、INSやDVLで直接的に計測されるAUVの移動情報と合わせてカルマンフィルタ等を用いて処理を行い、現在位置を推定する。基準点としては、海底設置の他に、ASVやブイといった海上に位置されるものを想定した場合も考えられる。また、近年開発されつつある小型・低消費電力の原子時計や、音響通信技術を合わせたシステムの検討を行う。

3. 研究の方法

本研究課題では、シミュレーションにより手法検討を行い、実海域実験による検証データの取得を行った。

基準局およびAUVの双方にチップスケール原子時計を搭載し、時刻同期がとれている前提とし、音響信号の片道伝搬時間（one way travel time: OWTT）により基準局とAUV間の測距を行うこととし、基準局から送信した音響信号をAUV側で受信して処理を行うことでAUV内にて自機の位置計測を行うこととした。AUVには、ナビゲーション機器としてINS、DVLおよび深度計を搭載しているものとし、DVLにより海底を検知、速度を計測されている状況を想定した。また、

授受する音響信号はパルスではなく連続波とし、スペクトラム拡散通信を行えるものとした。これにより、時刻、深度、位置等の情報を基準局側から伝送することができる。当該の連続波により測距を実施することで、短時間に多くの測距結果を得ることができる。

実海域実験は、駿河湾奥の内浦湾内の水深 100m~300m の海域で実施した。Fig. 1 に実験に用いた送信装置 (a) および受信装置 (b) を示す。両装置は、リチウムイオン二次電池により動作させ、Microsemi 社製の Chip scales atomic clock (CSAC)、CSAC SA.45s を搭載した。当該機器は、 10^{-9} ~ 10^{-10} 程度のクロック精度を有する。原子時計は、装置の起動時に GPS に接続して GPS と時刻同期をとることで装置間の同期を確保した。送信装置において、予め用意した音響信号を D/A コンバータによって出力し、パワーアンプを経て送波器により送信した。受信装置において、受波器により受信された音響信号は、プリアンプおよびフィルタを経て A/D コンバータにより信号データを記録した。このように得られた信号データを後処理で解析することで手法の評価を行った。受信装置には、INS (IXBlue 社製 PHINS6000)、DVL (Teledyne RDI 社製 Navigator) および深度計を搭載した。受信装置は、計測船より吊下して曳航することで AUV を模擬した。また、曳航中は DVL にて速度が計測できる高度とした。INS は、陸上での起動直後に GPS データを入力し、アライメントを行った。また、受信装置を海中に投入する直前まで GPS データを入力することで位置推定のドリフトを防止し、実験終了後に計測船に回収直後にも GPS データを入力して補正し、実験中に生じたドリフト量を確認できるようにした。送信装置は、海底設置および海上浮遊の 2 パターンの状況で実験を行った。海底設置の場合、基準局は固定点 (潮流による多少の揺らぎは存在する) となり、海上浮遊の場合、基準局は移動局となる。海上浮遊の場合には、GPS を常時接続し、位置データを取得した。基準局の絶対位置は重要な情報であり、実際のシステムでは、音響信号に送信時の位置情報を含むことで、受信側の AUV 内で絶対位置の計算を行えるようにできる。

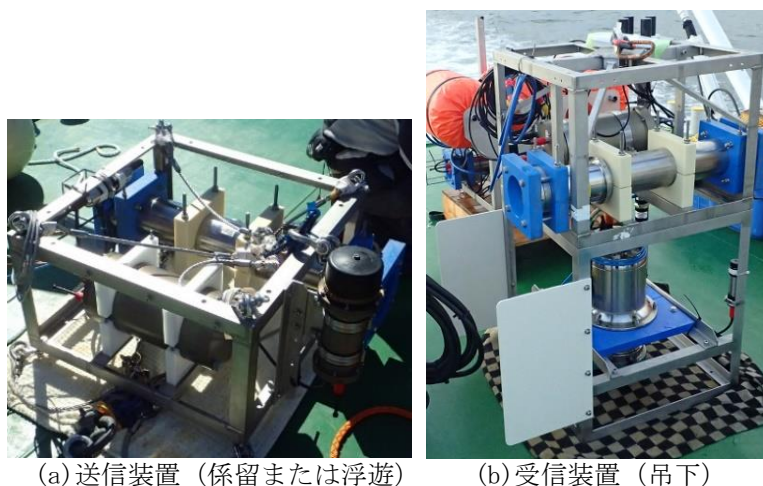


Fig. 1 実験装置

4. 研究成果

駿河湾奥の内浦湾内にて、2つの実験構成にて実海域実験を実施した。実験構成 1 は、送信装置を海底に係留し、実験構成 2 は、送信装置を海上浮遊させ、送信装置と受信装置の位置関係を変化させつつ、各種センサデータとともに音響信号の送受信データを取得した。送信信号は両実験構成で共通とし、Table 1 の通りとした。

Table 1 送信信号の仕様

項目	値
搬送波周波数	12,500 Hz
信号タイプ	6 次の M 系列コードによるスペクトラム拡散信号
チップレート	3,125 chips/s
信号長	約 9 s (446 symbols)
送信周期	15 s

実験構成 1 (送信装置を海底に係留)、構成 2 (送信装置を海上浮遊) の実験条件を、Table 2, 3 にそれぞれ示す。装置の曳航速度は約 2kt、受信装置の吊下高度は両者とも約 50m としたが、直線曳航中に流体力により曳航船後方に引っ張られ、やや上方へ浮上している。送信装置と受信装置の位置および移動状況の関係は、実験構成 1 で 2 パターン、実験構成 2 で 7 パターンを取得した。信号データは、実験構成 1 で約 250、実験構成 2 で約 900 のデータを取得し、両装置の様々な位置関係や移動状況のデータを取得することができた。

Table 2 実験構成1 (送信装置は海底係留) の実験条件

項目	値
実験海域の水深	約 100 m
受信装置の曳航速度	約 2 kt
受信装置の吊下高度	約 50 m (ただし、曳航中に上下動あり)
送信装置の係留高度	約 30 m
受信装置の曳航パターン	①送信装置から水平距離約 300m 離れた長さ約 1km の直線上を曳航 ②送信装置から水平距離約 600m 離れた長さ約 1km の直線上を曳航

Table 3 実験構成2 (送信装置は海上浮遊) の実験条件

項目	値	
実験海域の水深	約 250 m	
受信装置の曳航速度	約 2 kt	
受信装置の吊下高度	約 50 m (ただし、曳航中に上下動あり)	
送信装置の状況	海上に浮遊 (警戒船にて保持)	
送信および受信装置の位置および移動状況の関係	送信装置	受信装置
	ほぼ定点に保持	水平距離約 100m 離れた長さ約 2km の直線上を曳航
		水平距離約 300m 離れた長さ約 2km の直線上を曳航
		水平距離約 600m 離れた長さ約 2km の直線上を曳航
		水平距離約 1000m 離れた長さ約 2km の直線上を曳航
	約 2kt で受信装置の測線に近づく	長さ約 2km の直線上を往復して曳航
	約 2kt で受信装置の測線から遠ざかる	
受信装置の測線から約 600m の位置で半径約 100m の円周上を移動		

以下に実験構成1で得たデータにより検証した位置推定の結果の一例を示す。Fig.2はChirp信号により伝搬路特性を調べた結果である。本実験は浅海域で実施しており、送信および受信装置間の距離が水深に比べて水平方向に長くなり、海底、海面の反射とみられるマルチパスが多く観測された。Fig.3は、受信信号(上図)とM系列コード変調信号との相互相関をとった信号(下図)である。後者の図では、相関ピークを検出した結果が赤丸で示されている。相関ピークのレベルの変動が大きくなっており、前述のような複雑な伝搬路環境による影響と思われる。また、反射波の相関ピークとの誤検出が起こる場合もあった。Fig.4~5はFig.3で得られた相関ピークから計測した測距結果を観測パラメータとし、INSの位置出力のドリフト量を状態ベクトルとして推定するカルマンフィルタを構成し、受信装置の位置推定を行った結果を示す。Fig.4は、INS出力から算出した送信装置と受信装置間距離(赤ライン)、Fig.3の相関ピークによる測距結果(黒プロット)、およびカルマンフィルタ出力から算出した距離(青ライン)である。測距結果では、しばしば数m程度の跳びが起こっているが、カルマンフィルタ出力からの算出結果が測距結果にフィットしていることが分かる。Fig.5は水平位置のINS出力(赤ライン)とカルマンフィルタ出力(青ライン)を、Fig.6は推定したINS出力のドリフト量の時系列変化を示す。ドリフト量の推定は、3秒程度で収束していることが分かり、連続信号を用いることで、単独の基準局により数秒程度の時間で位置推定が可能であることが分かる。

Table 1, 2で示したように、本研究課題の中で、送信装置と受信装置の位置および移動状況の様々な関係における多くのデータを取得できており、今後引き続き得られたデータを用いた解析を行い、位置関係による推定のし易さ、様々な位置関係でロバストに推定できる手法の検討を行っていく予定である。

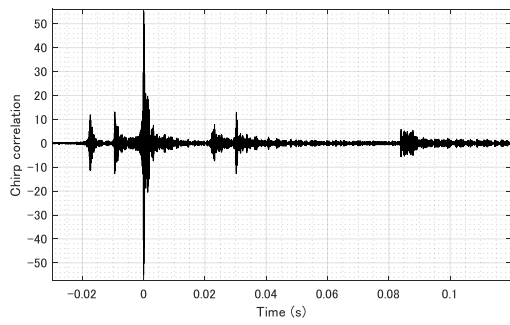


Fig. 2 Chirp 信号による伝搬路特性の推定結果

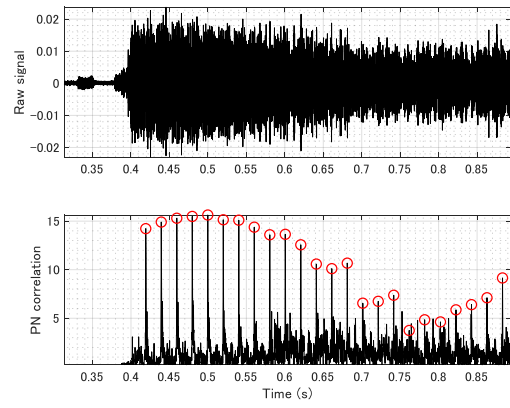


Fig. 3 受信信号(上)と相関ピークの検出(下)

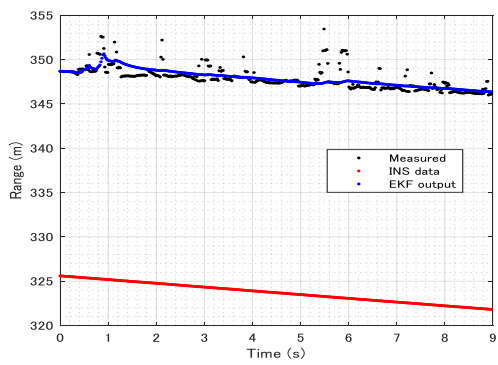


Fig. 4 測距結果

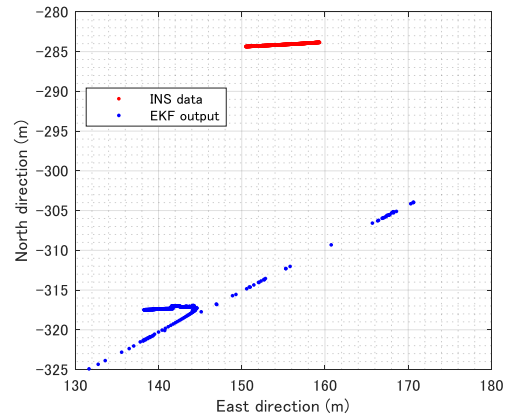


Fig. 5 位置推定結果

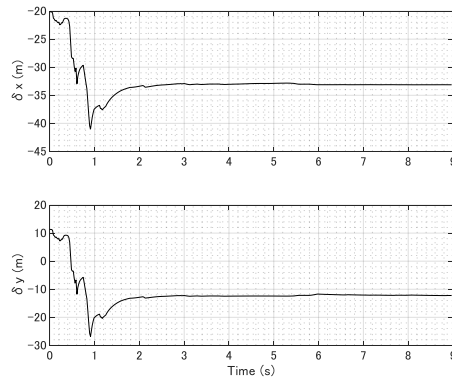


Fig. 6 INS のドリフト量推定の時系列変化

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yoshitaka Watanabe	4. 巻 -
2. 論文標題 Basic Study on Positioning of Autonomous Underwater Vehicle Based on Acoustic Ranging from One Reference Device	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yoshitaka Watanabe
2. 発表標題 An Ocean Experiment on Positioning of Autonomous Underwater Vehicle Based on Acoustic Ranging from One Reference Device
3. 学会等名 The ASME 2021 40th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering（国際学会）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yoshitaka Watanabe
2. 発表標題 Basic Study on Positioning of Autonomous Underwater Vehicle Based on Acoustic Ranging from One Reference Device
3. 学会等名 The ASME 2020 39th International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering（国際学会）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

6. 研究組織

氏名 （ローマ字氏名） （研究者番号）	所属研究機関・部局・職 （機関番号）	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------