

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 25 日現在

機関番号：24403

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26289339

研究課題名(和文)複数機水中グライダーの同時展開による海洋環境モニタリングに関する研究

研究課題名(英文)A study on ocean-environment monitoring by using multiple underwater gliders

研究代表者

有馬 正和 (Arima, Masakazu)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70264801

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、(1) マルチエージェントモデルの構築、(2) グライダー型群知能海中ロボットの構築、(3) 群知能海中ロボットシステムの実証、の3点について検討を行った。水中グライダーのハードウェアと制御ソフトウェアの整備を行い、水槽試験および実海域試験によって潜航性能を明らかにした。複数機の水中グライダーの運用を支援するための自律型洋上ビークルを開発した。海中音響観測システムを設計・開発して、実海域試験で海棲哺乳類の生態行動をモニタリングできることを明らかにするとともに、船舶のスクリーンなどの雑音を低減する手法を提案した。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to establish a multiple autonomous-underwater-glider system for realizing a long-term and wide-range monitoring of ocean environments and ecosystems. For this purpose, a solar-powered autonomous surface vehicle (SASV) was developed for the use of assistance in operation of multiple underwater gliders and ocean environment monitoring. This SASV consists of a couple of solar panels with a charge-and-discharge controller, an embedded PC, a couple of thrusters, a GPS device and a 3-axis digital compass for navigation. The SASV has autonomous control mode and manual control mode by small game-controller. Feature of this small-sized, lightweight and low-cost SASV is easy operation. We have also developed kinds of underwater passive acoustic monitoring system (UPAMS) for establishing a soundness index of the ocean, and contributing to preventative safety measures for collision avoidance of high-speed vessels and cetaceans.

研究分野：海洋システム計画学

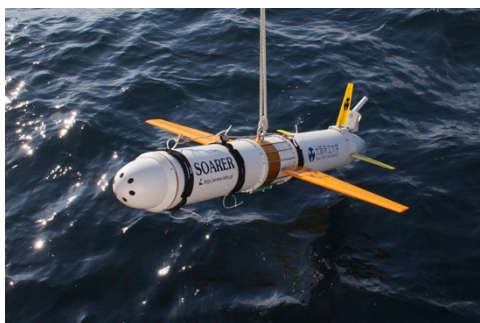
キーワード：水中グライダー 群知能海中ロボット 海洋環境生態系モニタリング 海中音響観測システム 自律型洋上ビークル

1. 研究開始当初の背景

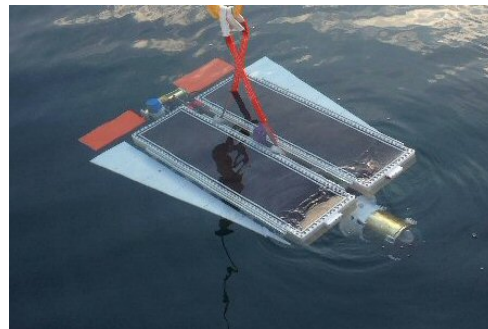
現在、我々が直面している地球環境問題、エネルギー問題、食糧問題などの解決には、膨大なキャパシティを持つ海洋がその鍵を握っていると言われていた。海洋の物理的・化学的・生物学的な観点での解明が望まれており、長期に亘る多点同時観測網の整備が喫緊の課題となっている。

西暦 2000 年に「アルゴ計画」という国際プロジェクトが始まり、2013 年 10 月現在、3,600 機を超えるアルゴフロートが世界中の海で観測を続けている。アルゴフロートは、浮力調整装置を内蔵し、水深 2,000m の中層域までの水温や塩分濃度などのデータを取得し、人工衛星を通じてデータを収集している。しかしながら、アルゴフロートは漂流するため、定点に留まることもできないし、海域によって観測密度にバラツキが生じてしまうという問題も指摘されている。

一方、近年、海洋の調査・探査に自律型海中ロボット (AUV; Autonomous Underwater Vehicle) が導入されるようになり、大きな成果を上げている。特に、水中グライダーは、浮力調整装置によって潜入と浮上を繰り返す、機体に働く流体力を利用して推進するため、エネルギー効率が非常に高い自律型海中ロボットであることから注目を集めている。研究代表者らは、運動性能に優れた主翼独立制御型水中グライダーと太陽光エネルギーを利用して長期間の運用を実現することのできるソーラー水中グライダーを開発して、その実現可能性を明らかにした。さらに、科学研究費補助金を受けて、研究分担者らの協力を得て、最大潜航深度 1,500m の主翼独立制御型水中グライダー SOARER と最大潜航深度 60m のソーラー水中グライダー Tonai60 を研究開発し、水槽試験および実海域での潜航試験を行っている。将来的には千機規模の群知能海中ロボットの実現を目指す、グローバル規模での統合的な制御は現実的ではなく、局所的な海域で自律型海中ロボットが「仮想的な黒板」への読み書きを通じて、それぞれの役割を認識しながら、結果として広範囲に亘る海洋環境モニタリングの実現を図りたい。本研究では、これら 2 機を使った実海域試験によって、この局所的な統制手法を確立したいと考えている。



主翼独立制御型水中グライダー SOARER



ソーラー水中グライダー Tonai60

SOARER は、中層付近までの海洋環境 (深度、水温、濁度、塩分濃度、電気電導度、溶存酸素) を計測することのできるセンサー RINKO-Profiler (JFE アドバンテック社製) を内蔵して、鉛直分布や海洋薄層に沿った計測を行うことができる。Tonai60 は、太陽光を利用するため潜航深度はトワイライトゾーンまでの表層に限られるが、上記 6 項目に加えてクロロフィル a (植物プランクトン) が計測できるセンサー RINKO-Profiler (同社製) を内蔵し、機首にはネットワークカメラを搭載してサンゴ礁や海洋生物の画像観測を行えるようにしている。また、鯨類の海中音響観測を目的とした A-tag (Marine Micro Technology 社製) を搭載すれば、長期間に亘る鯨類の自動観測を行うこともできる。

海中では電磁波の減衰が激しく電波などを利用できず、音響通信ではデータ量が限定されるため、海中ロボット同士の通信は極めて困難であることから、研究代表者らは、「黒板モデル」による統合的制御手法を提案し、シミュレーションによってその有効性を確かめている。さらに、複数機からなる群ロボットの展開や揚収システムについての検討も行っている。

2. 研究の目的

本研究の最終目標は、約千機の自律型水中グライダーが非同期的なコミュニケーションを図ることによって観測海域の相互補間を行いながら、全地球規模での海洋環境のモニタリングを長期間・広範囲に亘って実現することのできる「グライダー型群知能海中ロボット」を開発して、3 次元多点同時観測を可能にすることである。

本研究では、研究代表者らが研究開発した主翼独立制御型水中グライダー SOARER とソーラー水中グライダー Tonai60 を用いて、「群知能海中ロボットシステム」の実現に向けた、制御アルゴリズムの確立を目指す。

さらに、海洋環境計測のために両機に搭載した RINKO-Profiler のデータから 3 次元マッピングを再構成するための手法や海中音響観測の応用研究事例についても検討を行う。

3. 研究の方法

本研究で研究期間内に実施する項目は、以下の3点である。

(1) マルチエージェントモデルの構築

SOARER と Tonai60 に「黑板モデル」を実装できるようにアルゴリズムの構築を行う。

(2) グライダー型群知能海中ロボットの構築

SOARER と Tonai60 は、無線 LAN による通信機能を有するので、陸上（船上）との非同期的通信が実現できるように改良を施す。

(3) 群知能海中ロボットシステムの実証

提案する方法の有効性・妥当性を検証するために、実海域において自律型水中グライダーを用いた実験をして、本手法の評価を行うとともに残された検討課題の洗い出しを行う。

(1) マルチエージェントモデルの構築〔制御アルゴリズムの構築と検証〕

本研究課題において最も重要な検討事項は、マルチエージェントモデルの構築である。海中では電磁波による通信ができず、音波では通信速度の限界から送受信のできる容量に制限があることから、海中ロボット同士の通信は現実的ではないと考えられる。数百メートル程度の近接した状況では、音波による最小限の通信は可能ではあるものの、本研究課題が目標とする全球規模での海洋環境観測網の構築では、300 km 四方の海域に自律型水中グライダー1機を配置する計画なので、音波による相互通信は容易ではない。そこで、研究代表者らは、エージェント同士が「黑板モデル」という間接通信によって協調を図る手法を適用して、海中ロボットの航路を自律的に決めていく最適航路のシミュレーションを行った。この手法を実海域用水中グライダーで実現するためには、通信プロトコルを含めたアルゴリズムの構築が必要となる。実際には、人工衛星を利用して船上または陸上との通信を行うことになるが、既に SOARER と Tonai60 に搭載されている無線 LAN 機能を利用して、「仮想の黑板」への非同期的な読み書きの実現を図る。

(2) グライダー型群知能海中ロボットの構築〔ハードウェアの整備〕

主翼独立制御型水中グライダー SOARER とソーラー水中グライダー Tonai60 に搭載されている制御用ハードウェアは異なるため、非同期的通信によって他方の自律型水中グライダーの状況を理解して、自分自身が取るべき行動を決定するためには、ハードウェアの整備が不可欠である。

また本研究では、複数機の水中グライダーの運用を支援する「仮想的黑板モデル」として、自律型洋上ビークル (ASV; Autonomous Surface Vehicle) の開発を試みる。

(3) 群知能海中ロボットシステムの構築〔実海域試験による実証〕

水中グライダーの実験は、九州大学・応用力学研究所の深海機器力学実験水槽（長さ×幅×深さ：65m×5m×7m）での水槽試験を経て、12月頃に比較的静穏な鹿児島湾の湾奥部での実海域試験を実施する。研究代表者らの所属する大阪府立大学・海洋システム工学分野は調査船等を持たないため、鹿児島大学・水産学部の附属練習船『南星丸』での実験を計画する。同船は、自律型海中ロボットの展開や揚収に最適な A フレームクレーンを有し、乗組員も自律型海中ロボットの取り扱いに慣れていることが大きな利点である。機体の正確な位置情報を得るための SSBL 装置一式および表示用ソフトウェアなどを備品経費に入れている。実海域試験で得られた結果を受けて、マルチエージェントモデルおよびハードウェアの改良を行う。

本研究で開発を目指すグライダー型群知能海中ロボットシステムの用途は、長期間、広範囲に亘る海洋環境生態系のモニタリングである。研究代表者らは、4ch および 2ch の海中音響観測システム (UPAMS) を開発しており、シャチやザトウクジラを対象とした生態系のモニタリングに供している。複数機の水中グライダーでの運用を想定した実証実験も行う。

4. 研究成果

初年度は、Tonai60 のハードウェアと制御ソフトウェアの整備に努めた。制御アルゴリズムの検証のため、神戸大学大学院海事科学研究科附属練習船「深江丸」の協力を得て、徳島沖にて潜航試験を行った（平成 26 年 7 月）。無線 LAN の通信機材の改良と浮力部材の設計・製作を行い、九州大学応用力学研究所の深海機器力学実験水槽での水槽試験（平成 26 年 9 月）を実施し、グライディング性能を調べた。さらに、鹿児島大学水産学部附属練習船「南星丸」の協力を得て、鹿児島湾での実海域試験を実施した（平成 26 年 12 月）。SSBL 位置検出装置によって得られた海中での挙動を詳しく解析した結果、水槽試験での映像の解析によるグライディング性能（潜航角度や速度）と良く一致していることが明らかとなった。また、GPS と 3 軸デジタルコンパスを内蔵した 4ch 海中音響観測システム（4ch-UPAMS）を設計・開発して、和歌山県太地町立くじらの博物館での運用試験（平成 26 年 7 月）と米国・アラスカ州のプリンスウィリアム湾での実海域試験（平成 26 年 8 月）を実施し、シャチの鳴音から音源方向を精度良く推定することができることを示した。本システムの最大潜航深度は 400m なので、自律型水中グライダーに搭載することで、鯨類など海棲哺乳類の生態系をモニタリングすることが可能となる。さらに、複数機の水中グライダーの運用を支援するための自律型洋上ビークルの概念設計を行った。



4ch 海中音響観測システム

2年目は、複数機の水中グライダーの運用を援助するための自律型ソーラー洋上ビークルの設計・製作と試験航行を行った。また、広範囲における長期間の運用を実現するために、自然エネルギーを最大限活用する推進方式として、海洋における密度躍層を形成する密度差を利用した密度差エンジンの水中グライダーを考案、検討して予備実験を試みた。さらに、複数機の水中グライダーの運用事例を想定して、海中音響観測システム（GPSと3軸デジタルコンパスを内蔵した4ch海中音響観測システム4ch-UPAMSと2ch海中音響観測システム2ch-UPAMS）を組み合わせ、和歌山県・太地町の森浦湾内の生け簀（平成27年9月；マダライルカ）および東京都・小笠原諸島海域（平成27年9月；マッコウクジラ）で、鯨類の海中での行動を推定し生態を明らかにするための実験を行った。その結果、海中での3次元的な運動を推定することが可能であることを明らかにするとともに、船舶のスクリューなどの雑音を軽減する手法を提案した。



自律型洋上ビークル ASAHI

最終年度は、複数機の水中グライダーの運用を援助するための自律型ソーラー洋上ビークルの制御系の改良と試験航行を行った。遠隔操縦モードと自律型航行モードでの運用が可能で、今後、自律制御の高度知能化のための改良を進めていく。また、複数機の水中グライダーの運用事例を想定して、海中音響観測システムを組み合わせ、鯨類の海中での生態行動を推定するための手法の検討を行った。米国・アラスカ州プリンスウィリアム湾（平成28年8月）およびノルウェー・トロムソ沖（平成28年11月）

におけるシャチやザトウクジラの生態を調査し、高速旅客船と海棲哺乳類との衝突事故の軽減に向けた検討を行った。さらに、北海道・羅臼沖での調査結果から宇宙機（人工衛星）による海洋環境データと水産資源データを組み合わせて、海棲哺乳類の生態を推定評価する手法の妥当性、有効性を確認した。

以上のように、自律型洋上ビークルを研究開発して複数機グライダー型海中ロボットを運用するためのシステムの構築を行い、海中音響観測システムによる海棲哺乳類の生態行動のモニタリングを実現した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕（計6件）

1. 有馬正和, 鄭瑛, 秋山真哉, 船坂徳子, 阪本信二, 水口博也: 海棲哺乳類の海中音響観測とその解析 (第4報), 日本船舶海洋工学会平成28年度春季講演会講演論文集, 査読なし, pp.135-136, (2016).
2. M. Arima, A. Takeuchi: Development of an Autonomous Surface Station for Underwater Passive Acoustic Observation of Marine Mammals, Procs. of OCEANS' 16 MTS/IEEE Shanghai, 査読なし, CD-ROM (2016).
3. 有馬正和, 鄭瑛, 秋山真哉, 船坂徳子, 阪本信二, 水口博也: 海棲哺乳類の海中音響観測とその解析 (第3報), 日本船舶海洋工学会平成27年度秋季講演会講演論文集, 査読なし, pp.367-368, (2015).
4. M. Arima, Y. Kosuga, N. Funasaka, S. Sakamoto, H. Minakuchi: Observations of cetacean vocalisation by a four-channel underwater passive acoustic monitoring system and sound-source analyses, Procs. of 25th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2015), 査読あり, Vol. 2, pp.468-473, (2015).
5. 有馬正和, 宮本雅之, 阪本信二, 船坂徳子, 水口博也: 海棲哺乳類の海中音響観測とその解析 (第2報), 日本船舶海洋工学会平成26年度秋季講演会講演論文集, 査読なし, pp.155-156, (2014).
6. M. Arima, K. Yoshida, H. Tonai: Development of a four-channel underwater passive acoustic monitoring system for the use of underwater vehicles, Proc. of OCEANS' 14 MTS/IEEE St. John's, 査読なし, pp.1-6, (2014).

〔学会発表〕（計 6 件）

1. 有馬正和:海棲哺乳類の海中音響観測とその解析（第4報）, 日本船舶海洋工学会平成28年度春季講演会, 2016.05.26, 福岡県中小企業振興センター(福岡県・福岡市).
2. M. Arima: Development of an Autonomous Surface Station for Underwater Passive Acoustic Observation of Marine Mammals, OCEANS' 16 MTS/IEEE Shanghai, 2016.04.12, 上海(中国).
3. 有馬正和:海棲哺乳類の海中音響観測とその解析（第3報）, 日本船舶海洋工学会平成27年度秋季講演会, 2015.11.16, 東京大学生産技術研究所(東京都・目黒区).
4. M. Arima: Observations of cetacean vocalisation by a four-channel underwater passive acoustic monitoring system and sound-source analyses, Procs. of 25th International Offshore and Polar Engineering Conference (ISOPE-2015), 2015.06.22, Kona, Hawaii (USA).
5. 有馬正和:海棲哺乳類の海中音響観測とその解析（第2報）, 日本船舶海洋工学会平成26年度秋季講演会, 2014.11.20, 長崎ブリックホール(長崎県・長崎市).
6. M. Arima: Development of a four-channel underwater passive acoustic monitoring system for the use of underwater vehicles, OCEANS' 14 MTS/IEEE St. John's, 2014.09.17, St. John's (Canada).

〔その他〕

ホームページ等

<http://arima-labo.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

有馬 正和 (ARIMA, Masakazu)
大阪府立大学・工学研究科・教授
研究者番号: 70264801

(2) 研究分担者

石井 和男 (ISHII, Kazuo)
九州工業大学・生命体工学研究科・教授
研究者番号: 10291527

(3) 研究協力者

浦 環 (URA, Tamaki)
中村 昌彦 (NAKAMURA, Masahiko)
水口 博也 (MINAKUCHI, Hiroya)