

称号及び氏名 博士（工学） 小島 かな子

学位授与の日付 2022年9月23日

論文名 「広域海洋観測のための群知能海中ロボットシステム
に関する研究」

論文審査委員 主査 有馬 正和
副査 中谷 直樹
副査 橋本 博公
副査 岡崎 忠胤（東京海洋大学）

論文要旨

近年、地球温暖化が益々深刻化しており、自然災害の発生などが頻発している。地球表面の約7割を占める海洋は、地球規模の気象現象や地球環境に大きな影響を及ぼすと言われており、全球規模での海洋環境を観測する手法はまだ確立されていない。

本研究の目的は、長期に亘る広域の海洋環境観測のために、任意地点への移動が可能な海洋観測機器群を用いた観測手法を提案し、その妥当性の検証および長期運用の実現可能性を明らかにすることである。この目的を達成するために、導入する観測機器の選定と機器の行動決定方法、観測のための運用方法の3つを検討した。そして日本の排他的経済水域（EEZ: Exclusive Economic Zone）を対象とした運用シミュレーションによって海洋観測のための行動決定方法の妥当性および長期運用の実現可能性を検証した。本論文では、複数の自律型海中ロボットから構成される海洋観測システムを「群知能海中ロボットシステム」と呼ぶことにする。本論文は、全6章で構成される。

第1章では、本研究の背景と目的、本論文の構成について述べた。

第2章では、群知能海中ロボットシステムによる広域海洋観測手法を提案し、海洋観測機器について検討を行った。本研究では、複数の海洋観測機器を海中に投入し、対象海域

全体に展開しながら持続的な観測が可能となる広域観測の実現を目指す。第一に、海洋環境の観測を行う機体として、自律型水中グライダー（AUG: Autonomous Underwater Glider）の採用を検討した。AUGは潜入および浮上時に機体にはたらく流体力を用いて推進するため、駆動エネルギーの消費を抑えて長期間の運用が可能となる。本研究では、左右の主翼を独立に制御することで3次元空間における運動性能を大きく向上させた主翼独立制御型水中グライダー SOARERを採用する。SOARERには、塩分濃度や水温、深度、溶存酸素などの海洋環境データを記録することのできる観測装置が搭載されている。SOARERに搭載可能な動力源と消費電力を概算した結果、約1年に亘る運用が可能であると判断したため、長期間の海洋環境の観測を行う機器としてSOARERが適切であると判断し、群知能海中ロボットシステムの構成機器とした。第二に、AUGの運用における支援母機として、自律型洋上機（ASV: Autonomous Surface Vehicle）の採用を検討した。ASVは、主に観測機器の投入揚収地点への移動のために運用することを想定する。本研究では、機体上部にソーラーパネルを搭載し、運用中の給電によって長時間の運用を可能としたASSV（Autonomous Solar-powered Surface Vehicle）を採用する。ASSVは、高い運動性能を持つことから、群知能海中ロボットシステムの支援母機として採用した。

第3章では、海洋観測機器として採用したAUGとASVの機体の特性に応じた制御器を検討し、実機試験または自動航行シミュレーションによって制御性能の検証を行った。第一にASVの制御器として制御ゲインの調整が容易なPID制御を採用した。しかしながらPID制御ゲインの調整方法として広く知られるジークラニコルス則によって調整された制御ゲインは、追従制御には適していないことが確認された。そこで、ジークラニコルス則をもとにした制御ゲイン調整則の最適化手法を提案し、実機とシミュレーションを用いた最適化によって、追従制御性能の大幅な向上が可能であることを明らかにした。第二にAUGの制御器として、定常外乱やモデル誤差の影響下においても高い性能を発揮する積分型LQ制御を採用した。またAUGは、水面下で自身の位置を正確に把握することができず、外乱影響によって経路誤差が生じる。そこで、外乱影響量の計測を目的とした浅い潜入を伴う外乱補償方法を提案した。シミュレーションの結果、外乱影響を抑えながら経路に沿った移動を行うことが可能であることを明らかにした。

第4章では、AUGの運用中における行動決定方法として、機体間の情報共有方法、行動経路の選定方法、および群知能の適用についての検討を行い、観測を模した運用シミュレーションを用いて妥当性の検証を行った。第一にAUG間の情報共有方法として、黑板モデルを用いた非同期情報共有方法について検討を行った。AUGは海中にて相互通信を行うことが難しく、同期的な通信を行うことは非常に難しい。そこで黑板モデルという情報集約サーバーを介した非同期通信方法を採用した。さらに、必要な情報のみを抽出して共有するシステムとして構築することで、黑板モデルと機体間の通信量を大幅に抑え、通信コストだけでなく、通信に必要となる消費エネルギーを抑えることを可能とした。第二に観測機体であるAUGの行動経路の選定方法として、観測中および揚収時における2つの行動経路選定方法を検討した。観測中の行動経路選定方法は、調査海域内に割り当てたスコアをより多く獲得する経路を探索することで最適経路を探索するものとした。しかしAUGには、外乱影響により浮上位置が予定した地点と大きく異なる可能性があることと、消費エネルギーを抑えるため、計算処理能力の高いPCの搭載は困難であるという2つの問題がある。そこで提案方法では、一定時間先の未来までに獲得すると推定されるスコアをもとに最適な経路を選択し、さらに浮上の度に、再度最適な経路を探索することで、これらの問題を解決した。また、AUGの運用時間は決まっているため、運用時間内に揚収する必要がある。しかし調査海域に点在するAUGを揚収することは現実的でない。そこであらかじめ決められた揚収地点に全機体が帰還し、まとめて揚収を行う方法を検討し、揚収地点への帰還経路の選定方法の検討を行った。第三に多数の機体を同時に運用する方法として、群知能について検討を行った。AUGは他機の情報を非同期的にのみ取得するという特徴をもつ。

そこで消極的協調行動を採用することで、海中観測機器への群知能の適用を試みた。これらの行動決定方法の妥当性検証のため、日本の排他的経済水域（EEZ）を調査海域とした海洋観測を模した運用シミュレーションによって検証した。その結果、提案方法による観測は、比較に用いた他の行動決定方法より高い結果が得られることが示され、構築した行動決定方法の妥当性が明らかとなった。

第5章では、海洋観測機器として採用したAUGに、第4章にて構築した行動決定方法を実装した群知能海中ロボットシステムを用いて、日本のEEZを調査海域とする運用シミュレーションを行い、提案手法の長期運用に対する実現可能性を示した。第一に、観測に必要な群知能海中ロボットの機体数を推定するため、機体数ごとの調査被覆率を評価し、最適な機体数の推定を試みた。その結果、日本のEEZには32機のAUGが必要であることを明らかにした。またこのとき、直近2週間以内に観測された領域の調査被覆率を平均すると、78.68%と高い水準を示し、32機の観測機器を運用することで、日本のEEZの約8割を持続的に観測可能であることが示された。第二に、群知能海中ロボットシステムの長期運用方法について検討を行い、長期運用の実現可能性を検証した。AUGの運用期間は約1年であるため、必要機体数として推定された32機のみで数年に亘る観測を行うことは難しい。そこで、長期運用方法として、32機のAUGで構成される観測グループを2組用意し、交互に入れ替えながら運用することで、長期間広範囲の持続的な海洋観測の実現を目指した。シミュレーションの結果、平均80%を超える高い水準での観測が可能であることが明らかとなり、提案方法による長期運用の実現可能性が示された。

第6章では本研究で得られた成果について要約した。

本研究による以上の成果より、提案手法の妥当性および長期運用の実現可能性が示され、群知能海中ロボットシステムが長期に亘る広域海洋観測方法として有効であると結論づけることができる。

審査結果の要旨

本論文は、長期に亘る広域の海洋環境観測の実現を目指し、群知能海中ロボットシステムを構築して、その実現可能性を明らかにするための研究成果を纏めたものであり、以下の成果を得ている。

- (1) 長期間広範囲の海洋観測を実現する機器として、自律型水中グライダーを採択し、支援母船として自律型洋上機の援用による群知能海中ロボットシステムを構築し、それぞれの最適な制御性能の検証をおこなった。
- (2) 自律型水中グライダーの行動決定方法として、非同期通信による機体間の情報共有方法や行動経路の選定方法、群知能の適用について検討をおこない、その妥当性を明らかにしている。
- (3) 日本の排他的経済水域（EEZ）を想定した海洋観測の運用シミュレーションをおこない、観測に必要な機体数を推定するとともに、2組を交互に入れ替えながら運用することで長期間の海洋環境観測が実現できることを明らかにした。

以上の成果は、我が国周辺海域だけでなく、全球規模における長期間の海洋環境観測にも拡張でき、地球規模の気象変動機序の解明や自然災害の予測精度の向上にも寄与し、船舶海洋工学の学術的進展に大きく貢献するものと高く評価できる。また、申請者が自立して研究計画を行うのに必要な能力と学識を有することを証したものである。学位論文審査委員会は、本論文の審査および最終試験の結果から、博士(工学)の学位を授与することを適当と認める。