

# 審査の結果の要旨

氏名 川野 洋

海洋環境の観測などの水中活動を目指した自律型海中ロボット (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) は、現在実用段階に入っている。開発されるロボットは、その主たるミッションによって様々な形態を持つ。最も単純なミッションは、海洋の中層を長距離航行して、海水あるいは海底の観測をおこなうことであり、その為のロボットは航行型AUVと呼ばれる。前進運動を専らとする推進機構のために、ロボットは横方向推進用の推進器を持たない非ホロノミックなロボットとなる。非ホロノミックなロボットの動作計画やそれに沿った運動制御は制約条件が多く、困難な問題である。特に、予め知られていない流れがある海中環境条件の不確定性を含むような場合には困難さが際立つ。本論では、この非ホロノミック自律型海中ロボット (NHAUV: Non-Holonomic Autonomous Underwater Vehicle) の動作計画あるいは運動制御を扱うことのできる学習手法を提案し、その有効性を示すことを目的としている。

第一章では、AUVの研究開発の現状を述べ、NHAUVの位置づけをおこなっている。

第二章では、NHAUVの動力学特性、強化学習、Q学習などを概観し、強化学習の手法の一つである準マルコフ決定過程におけるQ学習 (SMDP法) を応用した確率的な動作計画の手法を導入している。

第三章では、NHAUVの動作計画あるいは運動制御にQ学習を適用ことの問題点と解決すべき課題について述べている。NHAUVの複雑な動力学特性に起因する非マルコフ性の問題、運動を記述する状態変数の多さに起因する状態空間の爆発の問題、Q学習が不安定な学習手法でありことによる学習の収束を補償するのが難しい問題、およびQ学習によって獲得された行動アルゴリズムを学習を行ったときとは異なる環境で適用するのが難しいという問題を挙げている。特に、最後のものは任務行動中の想定外のアクチュエータ故障の発生や、海中環境における未知な潮流分布や不確定要素を含んだ海底地形の存在を考えると特に重要な問題であると言える。それら課題に対応する各種手法を導入している。

第四章では、本論の中心となる章で、第三章で提示した問題点をNHAUVの代表であるアールワン・ロボットをターゲットにしてQ学習により解決する手法について提案している。ここでは、非マルコフ性への対策、包摂構造を利用した学習の効率化、教示方法の構造、Bayesian Networkを利用した運動モデルとその学習法、評価手法、環境の不確定性への対応手法を提案している。具体的には、SMDP法と最急降下法を併用した階層的学習アルゴリズムの提案、教示の手法によって学習の効率化を図った学習プロセスの安定化、Bayesian Networkを応用した運動モデルの導入によって学習中にNHAUVの運動特性を蓄積しその知識を再利用することの提案などである。これらによって、学習の時とは異なる環境に対応可能な動作計画アルゴリズムの獲得でき、学習プロセスの効率化にも役に立つことを示した。

提案された階層的学習アルゴリズムは、多くの状態変数を使ってQ学習のための状態空間を構成すると状態空間の爆発を引き起こすので、状態変数を上流 (行動選択部) と下流 (アクチュエータ制

御部) のモジュールに振り分けることによってこれを回避している。行動選択部では、SMDP法によって計算されたQ値を利用した動作計画が行われ、アクチュエータ制御部では動作計画に従ってNHAUVのアクチュエータを制御する。アクチュエータ制御部の学習は最急降下法によって行われる。行動選択部では、NHAUVの位置と方位角、アクチュエータ制御部では方位角と方位角速度を参照するシステムにしている。行動選択部が方位角速度を参照しないので、非マルコフ性の悪影響をアクチュエータ制御部で補償させている。学習中のNHAUVの行動による全ての状態遷移は、運動モデルに蓄積される。行動選択部の学習は、運動モデルのデータを用いて行われ、一度運動モデルが適切に獲得できれば、それを利用して学習のときとは異なるさまざまな条件に適用可能な動作計画アルゴリズムを導出可能にしている。

本論では、2種類の教示の手法を導入している。詳細教示と呼ばれる学習中のNHAUVの行動選択の仕方を教示者の手で直接制御する方法と、包括教示と呼ばれる学習中のNHAUVが危険な状況に陥るのを常に防止する機能を持つBehavior Basedアルゴリズムのハードコーディングによって行われるものである。NHAUVは、未経験の状態にあるときや、任務空間の外部に位置する時には、包括教示によって与えられたBehavior Basedアルゴリズムによって行動選択を行う。この手法により、潮流中で学習を行うNHAUVが任務環境を遠く離れた場所まで潮流によって流されてしまうのを防止することができ、学習プロセスを安全に続行させることが出来る。

本論では、未知の潮流分布に対応するために、異なる一様流中条件での航行を想定した複数の動作計画アルゴリズムを運動モデルを利用した学習で導出し、それらを併用する手法を採用している。実際の航行においては、NHAUVの位置における潮流条件に合った動作計画アルゴリズムを随時選択して航行制御に使用する。また、その形状に不確定要素を含む海底地形に対応するために、Behavior Basedアルゴリズムによる縦方向の高度制御アルゴリズムと、本研究で獲得された2次元平面内航行用の動作計画アルゴリズムを併用する手法をとっている。これにより、運動モデルを用いた動作計画アルゴリズムの導出の際に、NHAUVの上下動の運動性能の限界を考慮することによって、NHAUVの運動性能では回避不可能な険しい斜面を避けつつも目的地までNHAUVを誘導可能な動作計画アルゴリズムを導出することが可能となる。

第五章では、提案した学習アルゴリズムをシミュレータにて各種の環境条件下で実行し、その総合的な評価をおこなって、第三章で示した問題点がいかに克服されているかを示した。すなわち、本研究で提案する学習アルゴリズムによって、さまざまな不確定要素を含む海中環境にて適用可能な動作計画アルゴリズムをNHAUVに獲得させることが可能であることを示した。

第六章では、提案する手法の特徴について議論し、NHAUVの動作計画あるいは運動制御にQ学習を利用することの利点とともに限界をシミュレーション結果から考察している。

第七章では全体をまとめ、提案する手法がNHAUVの学習手法として有効であることを結論づけている。

以上のように、本論文は、非ホロノミック自律型海中ロボットの運動と環境を考察し、学習により動作計画あるいは運動制御を獲得する手法を提案し、それが不確定要素を含む海中環境にて適用可能であることを示し、非ホロノミック自律型海中ロボットの自律性を高めることにより、海中ロボット工学の分野に新しい知見をもたらすとともに発展させた。

よって本論文は博士(工学)の学位請求論文として合格と認められる。