

課題番号	Q20S-01
課題名（和文）	海洋資源調査のための群 AUV（Autonomous Underwater Vehicle）に関する研究
課題名（英文）	A Study on Multi-AUV for Ocean Resources Exploration
研究代表者	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科 准教授 氏名 藤川太郎
共同研究者	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 理工学部 電子工学系 教授 氏名 田中慶太
	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 工学部 情報通信工学科 教授 氏名 鈴木剛
	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 氏名
	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 氏名

研究成果の概要（和文）

世界的なエネルギー需要の拡大に伴い大きな成長が見込まれる海洋開発分野において、複数の小型 AUV（Autonomous Underwater Vehicle）を群制御することにより、海洋資源調査や海中・洋上での通信中継器としての運用も可能なシステムの技術開発を行うことを目的とする。まず、密閉された外殻とこれを回転させる駆動制御部から構成されるシンプルな機構の AUV を開発した。この外殻の回転により推進力を得ることが可能である。次に、姿勢制御を行うための Control Moment Gyro (CMG)の開発を行った。そして、AUV を群制御させるためのアルゴリズムおよび通信方法を提案し、評価実験によりその有効性を確認した。

研究成果の概要（英文）

In ocean development, which has the potential for significant growth with the expansion of global energy demand, we develop a system of ocean resources exploration and communication relay apparatus in the ocean using multiple autonomous underwater vehicles (AUVs). Firstly, we developed an AUV with a simple mechanism consisting of a hull and its rotation control device. This AUV obtains thrust by only rotating the hull. Secondly, we developed a control moment gyro (CMG), which controls the posture of AUV. And finally, we proposed a collective motion control algorithm and communication system for AUVs and verified its effectivity through numerical simulations and actual operation.

1. 研究開始当初の背景

世界規模での人口増加や途上国の経済発展に伴い世界のエネルギー需要が拡大していく中で、海洋資源への関心が高まっている。しかし、国内にはこの海洋資源の開発フィールドが存在していないのが現状である。このような課題を解決するため、戦略的イノベーション創造プログラム (SIP) の研究開発課題のひとつである「次世代海洋資源調査技術」の中で、高性能な自律型無人潜水機 (AUV: Autonomous Underwater Vehicle) が開発された。これは、広大な海域から海底鉱物資源である海底熱水鉱床を発見しようとするものであり、航行型 AUV (全長 4m, 空中重量約 800kg), ホバリング型 AUV (全長 1.2m, 空中重量約 270kg) と洋上の中継器を同時運用することで全自動海底調査を世界で初めて実現した。

ここで、ホバリング型 AUV に着目すると、詳細調査のための海底面への接近を得意としているが、浮上するためには搭載している 2 個のバラスト (8kg/個) を順次リリースしなければならず、陸上でのこのバラストの取り付け作業も重労働となっている。また、駆動装置として水平移動のために 6 基ものスラスト (うち 2 基は高度制御用) を搭載し、海底面画像解析用のステレオカメラや障害物検知レーザなど様々な機器を搭載しているが、いずれも外部に露出しているために防水処理が必須な構造である。また、このホバリング型 AUV は、航行型 AUV と同様に洋上中継器との音響通信によりコントロールされているため、その作業エリアは洋上中継器を起点として限定されたものである。

2. 研究の目的

本研究課題では、海洋資源調査のためのホバリング型 AUV に着目して以下を行う。

- (1) 外殻 (回転殻) と内部の駆動制御装置で構成されるシンプルな水密機構により、外殻を回転させることのみで沈降・浮上および水平移動が移動可能な小型 AUV の開発
- (2) これを群制御により複数台運用することで調査範囲を拡大するシステムの構築

これにより、AUV 単体では、制御装置やセンサ類を全て水密機体に内蔵することを可能とし、システム全体としてはより高効率で海域を準精査することを可能とする、群 AUV による海洋資源調査技術を創成することを目的とする。

3. 研究の方法

提案する群 AUV は以下の 3 つの要素技術から構成されているため、それぞれの基礎開発を進めた後に統合してシステム全体の構築を行う。

- ① 密閉した回転外殻をもつ機体
- ② 姿勢制御用 control moment gyro (CMG)
- ③ 群制御と通信システム

4. 研究成果

4.1 密閉した回転外殻をもつ機体の開発

図 1 に、開発した動作検証用試作機を示す。外殻は直径 150mm, 高さ 129mm のアクリル製の円筒形で、駆動制御部を含めた全空中重量は 2.14kg である。この駆動制御部は、外殻駆動用のサーボモータ (Dynamixel, MX-12W), 制御用マイコンボード (Dynamixel, OpenCR), 真鍮製のフライホイール, フライホイール駆動用サーボモータ (Dynamixel, MX-12W) で構成される。本機は、外殻と駆動制御部の慣性モーメントの差で相対的に外殻が高速で回転することで推進力を得ようとするものである。この外殻形状を変更することにより、例えばフィンなどを取り付けることで回転軸方向へ推進することができる。これまでの動作実験により、水の粘性抵抗などの影響によって外殻の回転数が減少し、それに伴い駆動制御部の回転数が増加してしまうという問題が挙げられた。また、重心位置が回転軸上にないために回転軸が振れるという現象も見受けられたが、これらを解決する方法が 4.2 で述べる CMG の実装である。ここでは、CMG 実装の準備段階として、フライホイールを用いることで外殻の回転数の安定化を図った。図 2 に、外殻、フライホイール、及び駆動制御部それぞれの回転数の時間推移を示す。15 秒付近から駆動制御部が回転しはじめているが、25

秒付近でフライホイールを回転させたことにより、その後、駆動制御部の回転が収まったことが確認できる。

次に、提案する AUV は回転軸方向にのみ推進力を得られるため、左右方向への移動は本体を傾けることでこの回転軸を傾ける必要がある。これには CMG によるジャイロ効果を用い、また、任意の軸周りに回転しやすいように外形形状を球体とするモデルを検討した。図 3 に製作した直径 170mm の球体モデルを示す。CMG やフライホイールを実装していない機体であるが、水中での外形回転動作が確認できた。

今後は、CMG を搭載して姿勢制御を行い、任意方向への移動を可能とした後に、群制御を行う予定である。

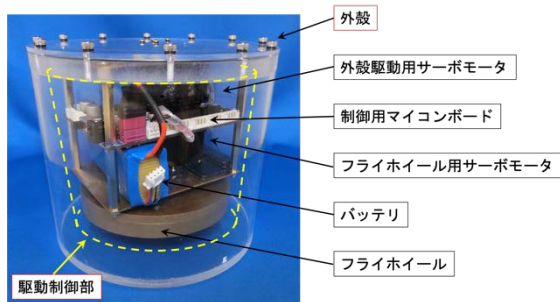


図 1 動作検証用試作機

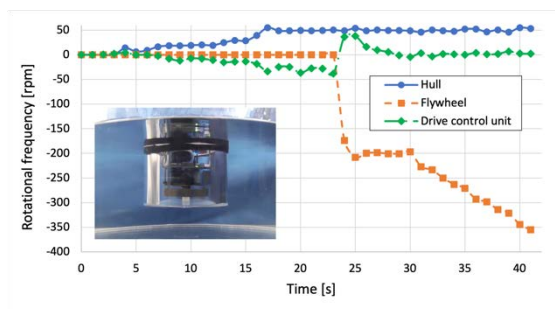


図 2 動作実験

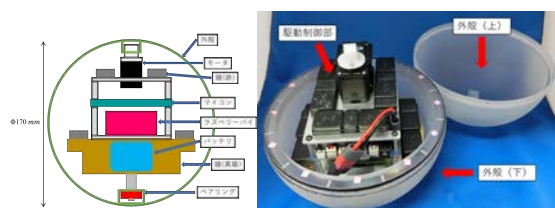


図 3 球体モデルの構成 (左) と製作した実機 (右)

4.2 姿勢制御用 CMG の開発

Control Moment Gyro (CMG) とは、一定回転しているホイールをジンバル機構で支える構造であり (図 4)、このジンバル軸を傾けることで生じるトルク (ジャイロ効果) を利用して姿勢制御に用いるものである。本研究では、この CMG を 4 機搭載することによって、より高トルクな出力を可能とし、冗長性も確保できる仕組みとなっている (図 5)。なお、そのサイズは、90mm × 90mm × 105mm、重量 0.58kg である。シミュレーションの結果、姿勢制御精度 0.5deg、アジリティ 5.3deg/s という性能であり、目標値を満たしていることが確認できた。

今後は、実機での姿勢制御実験を行い、目標性能を満たせるかを検討する予定である。

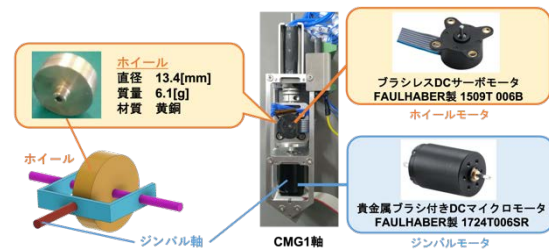


図 4 開発した CMG1 軸の構成

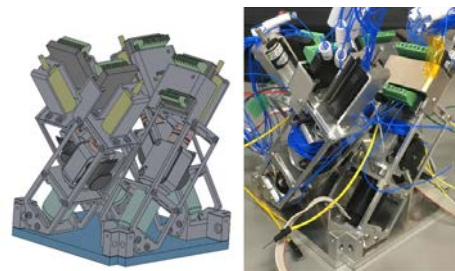


図 5 CMG の CAD 図 (左) と開発中の実機 (右)

4.3 群制御と通信手法の検討

複数台の AUV の制御に用いられている一般的な手法はリーダー・フォロワ制御である。リーダーにフォロワが追従して群行動を行うものであるが、本システムでは、これに熱力学モデルを導入した新たな手法を提案する。分子間力による引力と熱運動による斥力の関係により、物質は、固体、液体、気体状態になるが (図 6 左)、本手法はこれに基づく群制御で

あり、強硬性と柔軟性が両立している。リーダーを中心とし、同心円状にフォロワはナンバリングされる（図6右）。自分よりも小さいナンバーのフォロワに追従することにより、フォロワはリーダーの位置がわからなくても追従行動が可能である。これにより、広い場所では固体状態（強硬性）で行動し、狭い場所では液体状態もしくは気体状態（柔軟性）となって移動することが可能となる（図7）。

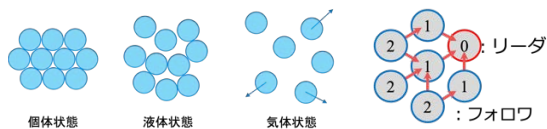


図6 物質の三態に基づく熱力学モデル（左）と
フォロワのナンバリング例（右）

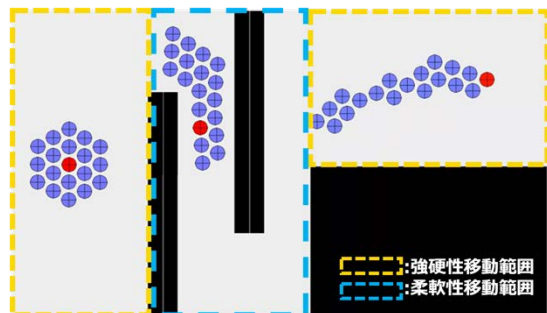


図7 提案する群制御手法による狭隘空間の移動

次に、提案する群ロボット集団移動手法では、送信方向を制御可能な赤外線通信デバイスにより、隣接ロボット間で局所的に通信しながら集団形成と移動を行う。しかし、ロボット間でランダムに赤外線信号を送信すると干渉するため、送信方向および送信タイミングの同期が必要となる。そこで、図8左に示すように送受信素子のペアが円周上に配置され、送信方向を回転させながら通信できるノードを用いることで、内部の発信周期の位相に応じて、送信素子を決定する通信およびその同期手法を検討した。これにより、集団内で同一方向に信号を送信していれば干渉を回避できる（図8右）。数値計算と実機による評価試験の結果、この内部発信周期の生成に振動子モデルを採用することにより、送信方向が同期できることを確認した。図9に3機の通信ノー

ドを用いた実験の一例を示す。送信方向が同期されているときに青色LEDが点灯する。

今後は、本手法を3次元へ拡張して有効性を検証し、AUVに実装する予定である。

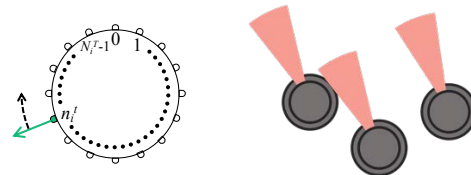


図8 送受信素子を円周上に配置したノード（左）と
送信方向を同期運用することで干渉回避する
イメージ（右）

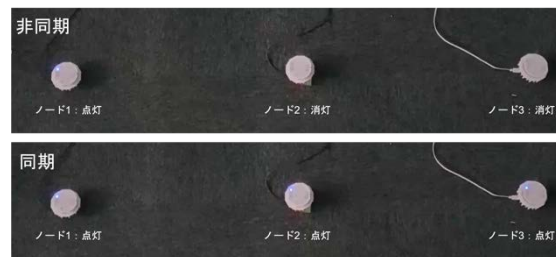


図9 送信方向同期の様子

5. 主な発表論文等

（研究代表者、共同研究者には下線）

〔学会発表〕（計3件）

- ① 高山直輝, 中塚裕也, 岩田快, 藤川太郎, 回転する密閉外殻を有する水中移動体の開発, 日本機械学会 2021 年度年次大会, S151-12, 2021.
- ② 岩田快, 高山直輝, 小貝佑奈, 藤川太郎, 密閉された球体外殻をもつ小型 AUV の開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2A1-C10, 2022.
- ③ 小貝佑奈, 岩田快, 高山直輝, 藤川太郎, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2022, 2A2-A08, 2022.