

令和 5 年 6 月 19 日現在

機関番号：32644

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2022

課題番号：18K04585

研究課題名(和文) 海底鉱物サンプルを取得・分析する歩行式掘削プラットフォームの基礎的研究

研究課題名(英文) Basic research on a walking platform for getting and analysis of deep-sea mining sample

研究代表者

渡邊 啓介 (Watanabe, Keisuke)

東海大学・海洋学部・教授

研究者番号：10297202

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：海底鉱物資源開発プロジェクトの特に試掘段階において、試掘コストを低減するために、8脚歩行式掘削プラットフォームのコンセプトを提案し、システム設計、実験システムの構築、水中での歩行実験を実施して、海底歩行式プラットフォームの可能性について検討した。水槽内に障害物と坂道を設置し、シーケンス制御を用いて、8脚の歩行実験を実施し、直進性能が高いこと、自重や掘削反力をサポートしながら不整地でも掘削できることの可能性を示した。移動スピードが遅い等の課題も明らかになり、今後さらに検討を進める必要がある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

海底鉱物資源開発においては、プロジェクト全体コストを低減することが不可欠である。それには、従来の概念にとらわれない新しい手法の開発も重要である。本提案手法は、不整地や坂道のような起伏のある海底でも運用でき、ドリルの方式を工夫すれば、海底に懸濁物等を巻き散らさない環境に優しい掘削が可能である。環境負荷を低減し、プロジェクトコストも低減させることができる掘削手法の開発は社会的意義が大きいと考える。学術的には、8脚の上下制御とデッキテーブルのスライドによって移動する新しい移動機構の提案と実験による検証を実施しており、海中ロボット分野における新規性が高い技術開発となったと考えている。

研究成果の概要(英文)：A concept of an eight-legged walking drilling platform was proposed to reduce the cost of exploration, especially in the exploration stage of submarine mineral resource development projects. We designed the system, constructed an experimental system, and conducted underwater walking experiments to investigate the possibility of a submarine walking platform. Obstacles and slopes were set up in a water tank, and an eight-legged walking experiment was performed using sequence control. As a result, it was found that this robot has high straight-line performance and can excavate even on rough ground while supporting its own weight and excavation reaction force. Problems such as the slow movement speed have also become apparent, and it is necessary to proceed with further studies in the future.

研究分野：海中システム工学

キーワード：海底鉱物資源開発 試掘 海底歩行ロボット 低コスト化

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

経産省と石油天然ガス・金属鉱物資源機構 (JOGMEC) を中心に、世界に先駆けて海底鉱物資源生産システムの研究が行われている。現在のプロジェクトは、水中クローラー型の掘削装置、掘削した鉱石の回収装置、水中ポンプとライザー管、洋上の支援船、から成る大規模なものである。重要な技術の中には欧米の海底油田開発システムから流用したものも多く、基本的に生産段階を念頭に置いたシステム開発と言える。特に、掘削装置は、歯の着いた回転ドラムで表面を削る方式であるため、深さ方向の掘削は得意でない上に、鉱石を環境中にまき散らし、洋上の遠隔操縦者のカメラ視界および操縦を妨げる。また急傾斜地や軟弱地盤、凹凸のある複雑な海底地形下での作業は不可能に近い、鉱石回収には別の大規模なシステムが必要、といった多くの課題がある。

一方、鉱物資源開発においては、生産段階に先立ち、経済性評価の探査段階が重要で、鉱床品位評価および埋蔵量評価が不可欠である。効率よく品位と濃度を推定し資源評価を行うために、経済的な掘削装置の開発が急務であるが、科学掘削等で使用されている既存の海底着座式掘削機には、支援船が必要で容易に移動できない、掘削サンプルは船上に上げて地質学的及び金属成分分析を行うため多大な費用がかかる、といった課題がある

### 2. 研究の目的

本研究では、Fig.1 のような全没型歩行式の掘削プラットフォームを検討し、プラットフォームのスケールモデルを構築し、実験により歩行制御の機能を検証することを目的とする。

本システムは、海底を歩行して表面を移動しながら、ドリリングユニットで深度方向に掘削することで、3次元的な掘削サンプルを回収できることを目指す。移動と掘削に必要な反力保持は8本の脚を制御することで実現する。脚の長さを調整することで、急傾斜地や凹凸のある複雑な海底での作業が可能となることを目指す。

### 3. 研究の方法

8脚歩行プラットフォームを構築し、陸上での実験を実施したのち、水槽での歩行実験を実施して、制御アルゴリズムの考え方を確定し、掘削プラットフォーム設計を完成させる。また、支援母船とアンビリカルケーブル等を含む全体システムの概念設計を完成させる。

#### A) 8脚の移動機構の検討、試作、設計の考え方の整理

脚の長さ、プラットフォーム縦横サイズ、重心位置、浮心位置、位置検出センサ 種類などの検討

#### B) 歩行制御アルゴリズム、最適移動方法の考え方の整理

脚の移動のさせ方、すなわち制御アルゴリズムによって、進む方向、傾斜への対応、軟弱な地域が存在した場合の対応などが異なる。実験によって、最適な移動方法を明らかにして、整理する。

#### C) 機器の水中化の検討

制御アルゴリズムを確定させ、必要なパワーを決定する。電源供給ライン (船上から供給か、海底にバッテリーステーションを置くか等) のコンセプトを確定する。

### 4. 研究成果

#### A) 8脚の移動機構の検討、試作、設計の考え方の整理

海底掘削ロボットは、ドリル時に発生する海底からの反力を支えるために自重を大きくする必要があり、反力は数百 kN になることも予想され、自重を支えながら移動でき、さらに海底の起伏や傾斜を乗り越える機構が必要である。Fig.1 に8脚ロボットの設計を示す。Fig.2 にデッキのレイアウトと寸法を示す。ロボットは、直交する XY 方向にスライドできる2つのデッキで構成される。これらをそれぞれアッパーデッキ (UD)、ローデッキ (LD) と呼ぶ。各デッキには4本の脚があり、それぞれが上下にスライドできる。Fig.1 に示すように、各脚は L1~L4 と U1~U4 と名付けた。歩行動作は以下のように実現される。UD脚 U1~U4 が着地して自重を支えながら、LD脚 L1~L4 が持ち上げられ、LDがスライドする。次に、LD脚を着地させることで、ドリルユニットの海底掘削時の反力をサポートし、今度はUD脚がスライドして移動する。

この8脚ロボットは各脚の長さを変えることができるため、複雑な海底地形でも移動が可能である。つまり、海底地形の凹凸に沿って移動したり、斜面を上り下りしたりすることができる。

海底が軟弱な地盤の場合は、マッドマットを敷いて脚がめり込まないように工夫する必要がある。掘削ユニットはアッパーデッキに取り付けられており、ドリルユニットの詳細については今後さらなる検討が必要である。ドリルユニットを含めた本ロボットに求められる重要な機能は以下の通りである。

(1) 掘削した鉱石が海中に飛散しないように回収できること。

(2) ドリルパイプを自動的に垂直に接続すること。

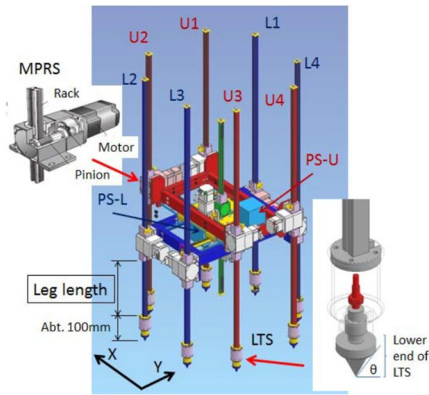


Fig.1 設計したプラットフォーム全体図

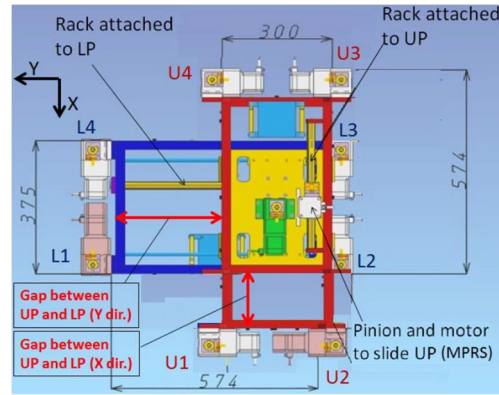


Fig.2 設計したデッキスライド機構

(3) 掘削動力と移動動力を装備

(4) 海底の位置を正確に検出できること

今回の設計において、問題なく動作し、坂道登坂能力も確認できたが、上記の機能を実現するには、今後さらに検討を進める必要がある。

### B) 歩行制御アルゴリズム、最適移動方法の考え方の整理

歩行の制御アルゴリズムは基本的にシーケンス制御とする。まず、ロボットは開始点から目標点に向かって X または Z 方向に一定距離移動する。移動距離は、デッキのスライド距離と傾斜の検出によって計算できる。坂道を登るときは、前に向かって上げていた足を下げながら、坂道を感知すると足の下降を止めることで、自動的に坂を登っていくことを確認した。現時点では、X 方向と Z 方向の両方を同時に制御することはできず、ロボットは常に X 方向または Z 方向のいずれかに前進するしかない。各脚の上下動はフィードバック機能付きのサーボモーターで行った。

X 方向のステージ移動量を  $X$ 、片足の可能な高さを  $H$  とすると、昇降可能な理論上の傾斜角は、 $\tan = H / X$  で与えられる。そこで、各脚を可動部の最大高さ  $H$  まで上昇させ、X 方向に所定距離移動させた。この方法では、傾斜角度が小さい場合に不必要な高さまで脚を上げてしまうため、時間的にもエネルギー的にも非効率である。従って、実際のシステムではロボット前方の斜面の傾斜角を前方ソナー等によって計測し、必要最小限の高さで脚を上げ下げしなければならないことが分かった。

脚の先に付いているタッチセンサーが効果的である。タッチセンサーが海底を感知すると脚の降下を自動停止できる。非常にシンプルな機構でありながら、甲板上的タッチセンサーと姿勢センサーにより、凹凸のある海底でも甲板を水平に保つことができ、斜面の上り下りも容易に行えることが後述する実験を通じて明らかになった。

### C) 機器の水中化の検討

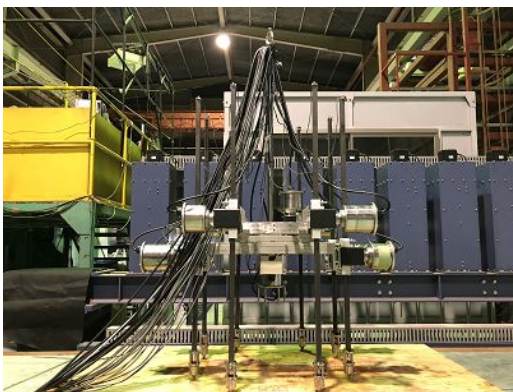


Fig.4 製作した水中歩行ロボット

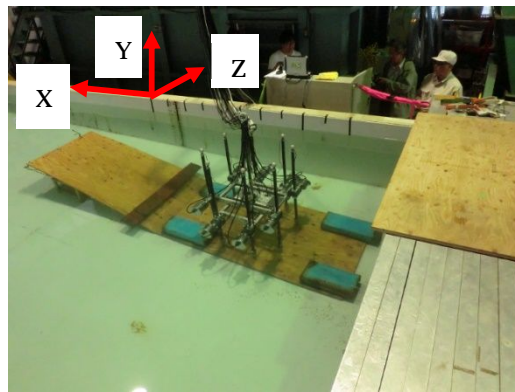


Fig.5 水中歩行実験の様子

8脚掘削プラットフォームの歩行アルゴリズムを研究するために、Fig.3に示すような実験装置を製作した。モーターを防水容器に収納し、水中歩行実験を行った。各デッキには姿勢(ロール、ピッチ)センサーが取り付けられており、デッキが水平になるように各脚の長さが調整される。また、各脚の先端には海底に触れたことを知るためのタッチセンサーを取り付けた。この実験の目的は、水槽の底に障害物を置いてロボットが歩行できることと、約30度の坂道を上り下りできることを確認することである。Fig.4に示すように、タンク内にスロープを設置

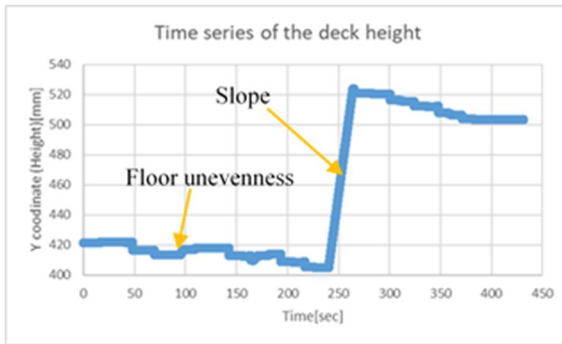


Fig.5 水中歩行実験 Z 方向座標の結果

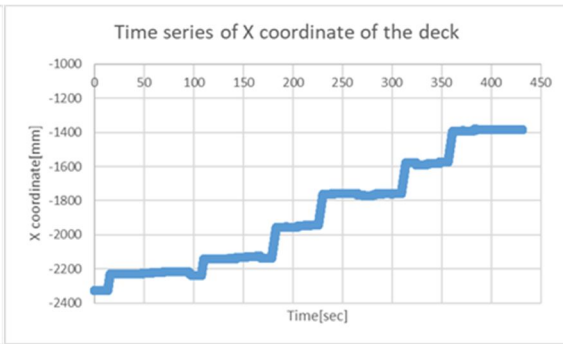


Fig.6 水中歩行実験 X 方向座標の結果

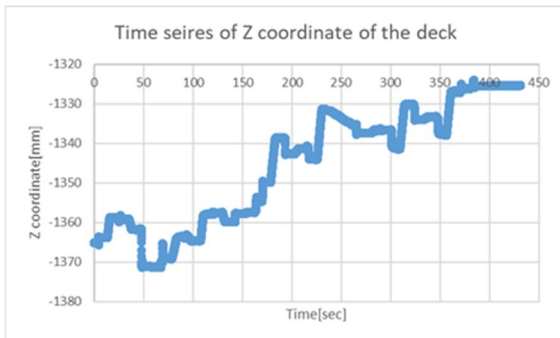


Fig.7 水中歩行実験 Y 方向座標の結果

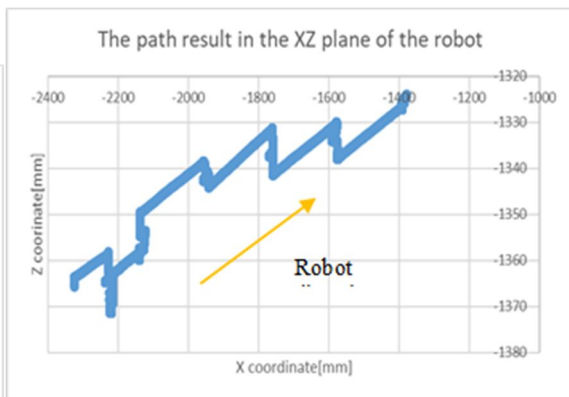


Fig.8 水中歩行実験 XY 平面内軌跡の結果

し、タンクの底にいくつかのブロックを配置して凹凸を実現した。

この実験では、3D 画像処理システムを用いて陸上から水槽内のロボットの座標を算出した。実際の海底システムでは、LBL などの測位システムを海底に設置する必要がある。座標系は Fig.4 に示すとおりである。

Fig.5~8 にタンク実験の結果を示す。Fig.5 にデッキ部の高さの移動量である Y 座標を示す。図の縦軸は Y 方向の移動量、横軸は時間を表す。開始から約 240 秒までのグラフの凹凸は水槽底に置いた凹凸を反映している。約 240 秒から 260 秒まで、グラフは坂を上る動きを示している。今回の実験では水槽の大きさの制限によりロボットは約 100mm の距離しか登らせることができなかったが、陸上実験では同じロボットがより長い距離や 45 度の斜面を登ることができることを確認した。

Fig.6 に斜面登坂実験時のデッキの X 座標の時系列を示す。-2350mm 付近から始まり、1000mm 程度歩行させた。この実験の結果によると、前進速度は約 2.8 mm/sec となる。このモデルを 1/100 スケールとすると、実機の前進速度はフルードの相似の法則から計算すると 28mm/秒となる。この速度は、実用的には遅すぎるが、前進速度は、この研究で使用したサーボモーターの制御速度によって物理的に決定された。また、前進速度は足を上げる距離にも依存する。今後はこれらの点を考慮しながら前進速度を速める最適な方法を検討する必要があることが分かった。

Fig.7 にデッキの Z 座標の時系列を示す。約 -1365mm から開始して約 40mm 移動した。これは、ロボットが Fig.4 に示すタンク床のベースに沿ってほぼ X 方向のみに移動したことを意味している。この実験では、動きは X 方向のみにプログラムされており、Z 方向の動きはプログラムされていません。従って、ここで観察される変動は底面の凹凸に起因すると考えられるが、X 方向に 1000mm 移動する際に 40mm の変動であったことを示す。フィードバック制御が必要となる可能性も考えられるが、本手法は原理的には航行型ロボットよりも安定しており、直進性能が高いことが示唆された。

図 8 は、XZ 平面内軌道の結果を示す。海底の凹凸や斜面を移動することを考慮すると、この変動は非常に小さいと考えられ、本システムが提示する歩行法は原理的に直進性能が高く、海底鉱物資源の開発に有望な可能性が高いと考えられる。

コロナ禍によって実験が中断され、研究室に入れられない状態が続いたが、耐圧容器内に水漏れが生じており、実験を再開しようとした際に中のサーボモーターが腐っていた。修理を試みたが、使用したサーボモーターが生産中止になっており、モータードライバーとサーボモーターが一对一対応になっており、モーターだけでなくドライバーもリプレイスする必要が生じ、予算的に全く対策できないことが判明した。そのため、様々に条件を変更して行いたかった水中での歩行



実験が不可能になってしまった。このようなアクシデントがあったが、基本的には、水中歩行実験による性能を確認し、上記の知見を得ることができた。

今後の課題として、歩行スピードが遅すぎる問題を解決すること、回頭動作ができない問題を解決すること、実際にドリルを装着して装着反力や振動下で問題ないことを確認すること、などがあげられる。

以上。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 4件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Keisuke Watanabe	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a Seabed Walking Platform for Ore Sample Drilling in Deep Sea Mining	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2022)	6. 最初と最後の頁 793-796
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 -

1. 著者名 Keisuke Watanabe, Masatoshi Shimpō	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a USV Testbed and Its System Check Experiments at Sea	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the 2022 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2022)	6. 最初と最後の頁 789-792
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 -

1. 著者名 Yoshiyasu Watanabe, Keisuke Watanabe, Hideyuki Suzuki	4. 巻 6
2. 論文標題 RESEARCH AND DEVELOPMENT OF A SELF-WALKING VERTICAL MINING SYSTEM AND THE SCALE MODEL TEST	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of ASME 2019 38th 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） 10.1115/OMAE2019-95394	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 -

1. 著者名 Keisuke Watanabe, Koshi Utsunomiya, Kazumasa Harada	4. 巻 -
2. 論文標題 Development of a Floating LBL System and a Lightweight ROV for Sky to Water System	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Xplore	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） 10.23919/OCEANS40490.2019.8962848	査読の有無 無
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 該当する

1. 著者名 Yoshiyasu Watanabe, Keisuke Watanabe, Hideyuki Suzuki, Fumio Yuasa, Teruo Ooshima	4. 巻 1
2. 論文標題 Scale Model Test of a Self-Walking Vertical Mining System Using DTH for Seafloor Mining and Sampling	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO)	6. 最初と最後の頁 1-5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/OCEANSKOB.2018.8559103	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4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Keisuke Watanabe
2. 発表標題 Development of a Seabed Walking Platform for Ore Sample Drilling in Deep Sea Mining
3. 学会等名 ICAROB2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Watanabe
2. 発表標題 Development of a USV Testbed and Its System Check Experiments at Sea
3. 学会等名 ICAROB2022 (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Watanabe
2. 発表標題 Development of Subsea Creature Monitoring Station for AUV Exploration Assistance
3. 学会等名 The 2020 International Conference on Artificial Life and Robotics (ICAROB2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yoshiyasu Watanabe
2. 発表標題 Scale Model Test of a Self-Walking Vertical Mining System Using DTH for Seafloor Mining and Sampling
3. 学会等名 2018 OCEANS - MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO) (国際学会)
4. 発表年 2018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
研究分担者	鈴木 英之  (Suzuki Hideyuki)  (00196859)	東京大学・大学院工学系研究科(工学部)・教授    (12601)	

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
---------	---------