

令和 3 年 4 月 28 日現在

機関番号：11401

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18872

研究課題名（和文）テーリングダム調査を目的とした地中ドローンの開発

研究課題名（英文）Development of underground drone for tailings dam investigation

研究代表者

川村 洋平（KAWAMURA, YOUHEI）

秋田大学・国際資源学研究所・教授

研究者番号：40361323

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,600,000円

研究成果の概要（和文）：採鉱活動の副産物となる“ずり”の貯蔵場である“テーリングダム”の内部を調査可能な地中ドローンを開発するものである。研究は次の4つの研究開発領域からなる。【二重反転ドリル掘削機構の開発】、【3次元へび型推進機構設計・製作】、【機械学習による制御系設計とモータトルク分配の最適化】、【全開発項目実装と実証実験】であった。開発した2つの機構を地中ドローンのプロトタイプに実装し、実砂槽にて自由に移動が可能であるか検証実験を行った。結果として本助成期間中では掘削部分と推進部分の相互作用の最適化が実現できず、双方の部分最適に止まった。しかしながら、へび型推進機構によるスラリー内の自由な移動を実現した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

最終的には開発した機構を地中ドローンのプロトタイプに実装し、実砂槽・スラリー槽にて自由に移動が可能であるか検証実験を行った。結果として本助成期間中では掘削部分と推進部分の相互作用の最適化が実現できず、双方の部分最適に止まった。しかしながら、へび型推進機構によるスラリー内の自由な移動を実現し、掘削部分の小型化により本構想の完全な実現が可能である見通しを得た。また、テーリングダムでの調査を視野に入れた自己位置推定とRGB-Dカメラを用いた遠隔操作のための第三者視点提示を開発するに至った。ここで得られた要素技術および実験結果は、今後の実テーリングダムでの実用のために活用される。

研究成果の概要（英文）：The aim of this research is to develop underground drone which can investigate the inside of tailing-dam in mine site. This research project had 4-stages. The 1st one was "Development of contra-rotating drill". The 2nd one was "Designing 3-D Snake locomotion thrust mechanism". The 3rd one was "Motor torque optimization by machine learning". The last one was "Validation test with the prototype". The validation test in real sand tank with all implemented prototype has been conducted. As a result, partial optimization of both drilling and trusting were achieved, overall optimization has not been achieved, though. However, it was confirmed that the snake locomotion thrust mechanism had a big potential for free movement in slurry tank.

研究分野：鉱山工学・計測工学

キーワード：DigBot 地中ドローン 2重反転ドリル テーリングダム 汚染物質 へび型推進機構 機械学習

### 1. 研究開始当初の背景

申請者は鉱山工学をその研究バックグラウンドに持ちながら、ロボティクス分野の強い機関に所属していた。地盤の研究では、例えば非破壊検査の研究であっても（例えば音波法による地中映像化）、検証として実際の地盤調査を特定業者に依頼する必要があった。その費用は非常に高価であり、“研究者泣かせ”な調査項目であったため、本申請課題の地中ドローンを開発する動機となった。さらに、調査対象を地球から宇宙開発まで広げたことにより、多数の掘削ロボット技術を知ることとなったが、世界的に見ても十分な掘削能力を実現した例は見られなかった。一方、テーリングダムに貯蔵される“ずり”は粒状の主に環境汚染物質であり、その内部モニタリングが切望されているが、その方法は未だ開発されていない。抵抗の非常に大きい粒状物質中を移動できる地中ドローンの実現のために求められるコア技術は、革新的な掘削機構・推進機構およびその小型化である。

### 2. 研究の目的

本申請課題は、採鉱活動の副産物となる“ずり”の貯蔵場である“テーリングダム”の内部を調査可能な地中ドローンを開発するものである。空中・水中・陸上のロボティクス技術十分な進化を遂げたが、地中（粒状物質中）を自在に移動可能な地中ドローンは世界的にも見られない。抵抗の非常に大きい粒状物質中を移動できる地中ドローンの実現のために求められるコア技術は、革新的な掘削機構・推進機構およびその小型化である。本申請課題ではこれまでに開発した二重反転ドリル掘削機構の効率化と3次元運動によるヘビ型推進機構の新開発をおこなう。この2つのコア技術を組み合わせることで、粒状物質中（砂中やスラリー中）を自在に動き回り、必要な情報を収集することが可能となる地中ドローンを提案する。

### 3. 研究の方法

研究は次の4つの研究開発領域からなる。(1)【二重反転ドリル掘削機構の開発】、(2)【3次元ヘビ型推進機構設計・製作】、(3)【機械学習による制御系設計とモータトルク分配の最適化】、(4)【全開発項目実装と実証実験】であった。研究は鉱山工学、ロボティクス、システム最適化の専門家で構成され、各研究開発領域は互いの成果を逐次生かしながら進める。

実施期間は3年間とし、初年度は各研究項目のすり合わせと研究体制の確立、研究機材の計測条件や評価手法などを調整する。これらの準備が整い次第、本格的な研究開発を開始し、研究精度とシステムの完成度を高めていく。最終年度は総括の年とし、補足のシステム調整を行いながら研究目的の達成を目指した。併せて国内外会議、展示会での発表、ならびに報告書作成、学術誌への投稿を行う。



### 4. 研究成果

掘削機構の開発では“1-1)ドリルビット形状の開発”を執り行った。これまでのドリルビットは土用と砂用が共用であり、砂に対して最適な形状とは言い難い状況であった。粘性のない砂では、よりプロペラに近い形状が望まれ、また、ドリル自体からの推進力も期待できる。そこで、一般的な文献による知識から砂用ドリルビット形状を算出し、3Dプリンタで作製、評価した。さらに“1-2)二重反転ドリル別制御の機構開発”および“1-3)ドリルシミュレータの開発”を行った。本申請課題では、上下2つのドリルビットを2つの動力で別に動作させ、本体の回転を検知して上下のドリルビットの回転数を任意に制御し、完全な反力相殺の実現を目指した。ドリルシミュレータはドリルビットの形状の違いを反映できるシミュレータとして開発した。これにより、ある程度の試作と実験の後には、試作を繰り返すことなくシミュレータによって効率的に上

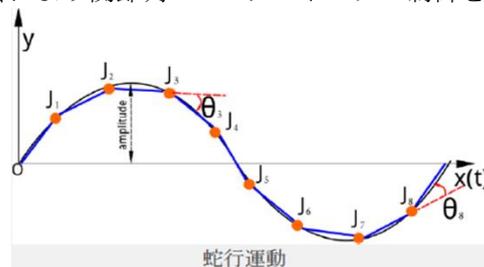
下ドリルビットの最適形状を得ることが可能となった。最終的には 1-1)の結果と合わせて、金属製のドリルビットを作製した。

推進機構ではインターフェース部では“2-1)3次元運動へび型推進機構設計”、“2-2)3次元運動へび型推進機構製作”および“2-3)推進機構シミュレータ開発・解析”を行った。主にへび型移動ロボットに使用されている2次元の機械モデルを3次元のモデルに補完・拡張した。ピッチ・ロール・ピッチ・ヨー3自由度を持つ関節ユニットを開発する際、主体的な動きと補助的な動きを明確にモデリングすることにより、関節モーターの要求トルクに制限を設けた。これにより、関節が小さく設計可能となった。また、実際のへびの蛇行モデルを基準にしつつ、砂中・スラリー中移動に特化した3次元の機械モデルを開発した。同時にシミュレータを作成し、3次元の動きを解析することで、既成概念に捕らわれない効率的な動きを見つけ出し、設計にフィードバックして地中ドローンプロトタイプに実装を試みた。以下に開発した地中ドローンを示す。



制御系では、研究開発領域 (3) 【機械学習による制御系設計とモータートルク分配の最適化】として、機械学習により関節角・モータートルクの制御を行った。シミュレータで得られた計算値を初期値として、実際の砂槽

およびスラリー槽でへび型推進機構を動かすことにより得られる実験値をフィードバックし、機械学習により最適化を目指した。結果として以下に示すサーペノイド曲線での関節制御が最も効率的であることを明らかにした。



蛇行運動

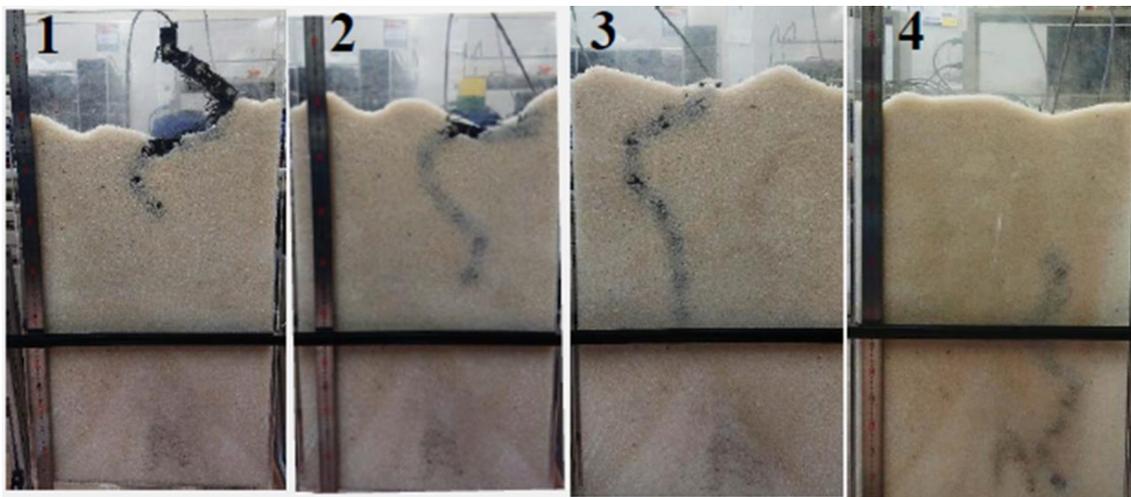
サーペノイド曲線

$$\theta_i = A \sin \left( \frac{2\pi}{T} t + \frac{2\pi}{N} i \right)$$

$\theta_i$  : 関節角度  
 $T$  : 周期  
 $A$  : 振幅  
 $N$  : 波数



最終的には研究開発領域 (4) 【全開発項目実装と実証実験】として上記で開発した2つの機構を地中ドローンのプロトタイプに実装し、実砂槽・スラリー槽にて自由に移動が可能であるか検証実験を行った。結果として本助成期間中では掘削部分と推進部分の相互作用の最適化が実現できず、双方の部分最適に止まった。しかしながら、以下の実験結果に示すとおり、へび型推進機構によるスラリー内の自由な移動を実現し、掘削部分の小型化により本構想の完全な実現が可能である見通しを得た。また、テーリングダムでの調査を視野に入れた自己位置推定とRGB-Dカメラを用いた遠隔操作のための第三者視点提示を開発するに至った。ここで得られた要素技術および実験結果は、今後の実テーリングダムでの実用のために活用されていく。



5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Yuan Gu, Hisashi Date, Yohei Kawamura
2. 発表標題 Underground locomotion by snake-like robot
3. 学会等名 Robotics and Mechatronics Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Abe Taro; Date Hisashi; Kamegawa Tetsushi; Suzuki Yosuke
2. 発表標題 Odometry of a Three-Dimensional Snake-like Robot and its Application
3. 学会等名 The 2019 IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 阿部 太郎; 伊達 央
2. 発表標題 ヘビ型ロボット自己位置推定とRGB-Dカメラを用いた遠隔操作のための第三者視点提示
3. 学会等名 第7回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Mining Technology Lab  
<http://kawamuralab.jp/>  
 DIAMOND online宇宙ビジネス注目2研究! 「月の水」発掘、地上3.6万mで太陽光発電...  
<https://diamond.jp/articles/-/221973>  
 Mining Technology Lab  
<http://kawamuralab.jp/jp/>  
 週刊ダイヤモンド 5年で大化けサイエンス&ベンチャー105発、2019.10.26

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	伊達 央  (Date Hisashi)  (50531985)	筑波大学・システム情報系・准教授   (12102)	
研究分担者	澁谷 長史  (Shibuya Takeshi)  (90582776)	筑波大学・システム情報系・助教   (12102)	

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