

令和 6 年 6 月 21 日現在

機関番号：32503

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03982

研究課題名（和文）長期間の調査・監視を目的としたクモヒトデ型水底移動体の開発

研究課題名（英文）Development of brittle star type robot moving on water-bottom for long term survey and monitoring

研究代表者

青木 岳史（Aoki, Takeshi）

千葉工業大学・先進工学部・教授

研究者番号：20397045

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では水底を移動して長期間の調査・監視を行う水底移動体の実現を目的とし、クモヒトデ型ロボットの開発を行った。クモヒトデは腕骨で構成する長くて柔軟な腕を持ち、各腕部の運動を組み合わせて全方向移動を行う。本研究では省自由度化を目的とし、腕骨と同じ構造の3本の連続体脚がワイヤ駆動によって螺旋捻転運動を行う。連続体脚の螺旋捻転運動は拡張円錐螺旋式を用いて定義し、水底へ接地する1周期目の接地点での移動量を制御することによって全方向移動を実現した。さらに水中での長時間の作業を実現するために、海中でレーザー光による無線給電システムを構築するための基礎検討を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の成果はクモヒトデ型ロボットを開発し、腕部の運動の組み合わせによって全方向移動を実現した点である。従来の研究では生物模倣のロボットとしてクモヒトデの動作計画や機能再生などを扱われていたが、長い腕部の構造を構築し、動作を再現した研究はなされていなかった。本研究は実用化を見据え、生物模倣からのアプローチではなく、力学的なアプローチにより少ない能動自由度によって全方向移動を実現したことに意義があると考えられる。さらに水中ロボットの活動時間を拡大するために、緑色レーザーとGaInP太陽電池を用いた水中無線給電システムを構築した点が産業界へ寄与すると考える。

研究成果の概要（英文）：In this study, we have been developing brittle star robots to realize a submersible that can move along the bottom of the water for long-term investigation and monitoring. Brittle stars have long and flexible arms composed of small bones, and can move in all directions by combining the motions of each arm. The three continuum legs, which have the same structure as the small bones, are driven by wires to perform spiral twisting motion. This motion of the continuum legs is defined using the extended conical spiral equation, and omni-directional movement is realized by controlling the amount of travelling at the contact point of the first cycle when the legs touch the water bottom. In addition, a basic study was conducted to construct a wireless power supply system using laser beams in the sea to realize long hours of work underwater.

研究分野：ロボット工学

キーワード：クモヒトデ ソフトロボット 全方向移動体

1. 研究開始当初の背景

水中での探査や調査を行うロボットとしては、水中を航行して情報収集を行うAUVやROVの研究は盛んに行われているが、水底を移動するロボットの研究はほとんど行われていない。海底や川底などは起伏のある地形であり、かつ砂などの軟弱地盤も混在するため、陸上での移動機構をそのまま適応するのは難しい。しかし水流のある環境下で長時間の定在が必要となる監視業務や、海底での掘削による資源回収作業では、水底を拘束条件として使用できる点は非常に有効であり、水底を移動できるロボットの研究は必要であると考えられる。

2. 研究の目的

本研究では海底に生息するクモヒトデに着目し、図1に示すような水底での長時間の定在が可能であり、かつ不整地である水底での移動性能に優れた水底移動ロボットの実現と、長時間の動作を実現するための水中無線給電システムの構築を目的とする。

クモヒトデは5放射相称(5角形)の胴体(盤)から放射状に伸びる5本の長い腕を持つ棘皮動物の1種である。同じ棘皮動物であるヒトデ類とは構造が異なり、ヒトデは細かな骨片で外殻を構成する構造に対し、クモヒトデでは骨片が癒合してできた腕骨を腕部の中央に持つ構造となっている。腕骨全体は関節が連なった構造となっているため、腕骨と周りを囲む筋繊維によって腕部は柔軟な動作が可能であり、クモヒトデはこの5本の腕部によって海底において全方向移動を実現している。本研究では螺旋捻転運動を用いてクモヒトデの腕部の省自由度化を行い、腕部の運動を組み合わせた全方向移動の実現を目的とする。

3. 研究の方法

2方向への屈曲が可能な関節を持つ腕骨を多数連結して螺旋形状を形成し、さらにその表面へ螺旋状に配置した複数本の伸縮可能なアクチュエータによって駆動すると、無限回転を行うことなく螺旋形状を回転させることができる。これを螺旋捻転運動と呼ぶ。螺旋捻転運動では地面との接地点を順に伝播することができるため、摩擦の影響を受けることなく全体を移動させることができ、かつ圧力が分散されるので軟弱地盤上でも動作が可能となる。この運動をクモヒトデ型ロボットへ適用させて、螺旋捻転運動の1周期目で移動に必要な変形を加えて胴体を移動し、その後は変形を腕先まで伝播して移動を完結する。複数本の腕部の動作を組み合わせることによって全方向移動を実現する。

水底での長時間の動作を実現するために、海中でレーザー光による無線給電システムを構築するシステムの基礎検討を行う。

4. 研究成果

螺旋式の導出

螺旋捻転運動は、螺旋状の腕部が腕骨の各関節の屈曲運動の組み合わせによって螺旋形状を維持したまま、無限回転を行うことなく螺旋形状の回転を捻転運動で実現するものである。研究当初は常螺旋式を用いて螺旋捻転運動を実現する予定であったが、その場合は基部も常螺旋と同じ直径の円軌道で回転する必要があり、実機を設計を困難にしていた。そこで基部が一点から始まり、最終的に常螺旋へ収束する螺旋式が必要となり、一点から始まる円錐螺旋と常螺旋を連続的に収束する拡張円錐螺旋式を構築した。また腕部は短い腕骨が連結した状態の多リンクモデルとして扱う必要があるため、求めた螺旋式から多リンクモデルへ近似をし、螺旋が再現可能であることを証明した。螺旋に沿って端からリンクを配置すると誤差が蓄積して理想の螺旋軌道から外れてしまうため、収束計算を用いて逆運動学を解き、リンクを配置することによって解決した。

屈曲機構の検討

螺旋捻転運動を具現化するために、これまでは屈曲ユニットの開発として空気圧駆動方式とワイヤ駆動方式を並行して進めてきた。空気圧駆動は高出力の屈曲動作を実現できるが、同じ姿勢で静止する場合は気室同士の圧力の釣り合いや、外骨格である弾性体の復元力との釣り合いが必要となり、剛性のみを向上させることができない。その点に関しては、ワイヤ駆動方式はワイヤ同士の釣り合いのみであるため、全てのワイヤに掛かる張力を大きくすれば剛性を向上さ

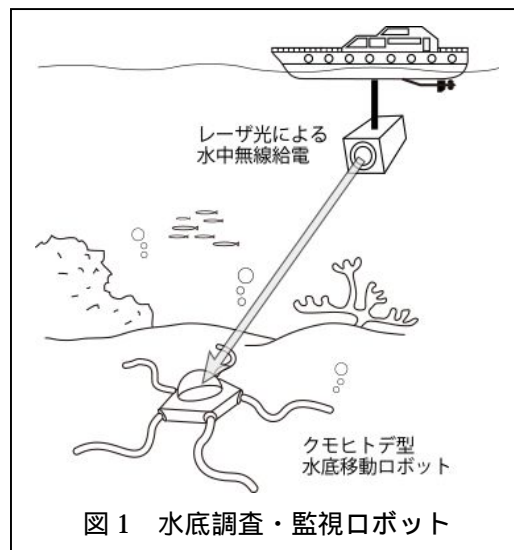


図1 水底調査・監視ロボット

せることも可能である。しかしワイヤ駆動様式は各節（腕骨）を貫通してワイヤを配置する必要があるため、ワイヤガイドでの摺動抵抗の蓄積が問題となり、腕部の全長が長くなると高出力を得ることが難しくなる。

本研究では外骨格型空気圧アクチュエータの試作を行うために、弾性体のシミュレーション環境の構築と基礎実験を行った。外骨格型空気圧アクチュエータはマッキベン型人工筋肉をモデルとし、繊維部分を熱可塑性ポリウレタンで製作する。また膨張要素をゴムチューブとすることにより気密性を担保する。このアクチュエータの弾性要素は変形が大きく、通常のシミュレータでは解析が難しい。そこで本研究ではSOFA (Simulation Open Framework Architecture) を採用し、ダイヤモンド形状、六角形状、矩形形状の各モデルで解析結果と試験片を用いた実験との比較を行い、有用性を確認した。

ワイヤ駆動型モデルの試作

本研究では腕骨によって構成する連続体脚を3本のワイヤによって螺旋捻転運動を実現する、ワイヤ駆動型モデルの試作を行った。腕骨の各関節の屈曲は楕円ボールジョイントによって行う。楕円ボールジョイントは2方向への屈曲が可能であり、かつ捻じり方向の運動を拘束することができる。今回は連続体脚の腕骨の断面に120度等配で3本のワイヤを配置し、各関節ごとに20度の位相で捻じった構造とした。29節連結した連続体脚を根元に配置したサーボモータを用いて駆動した。

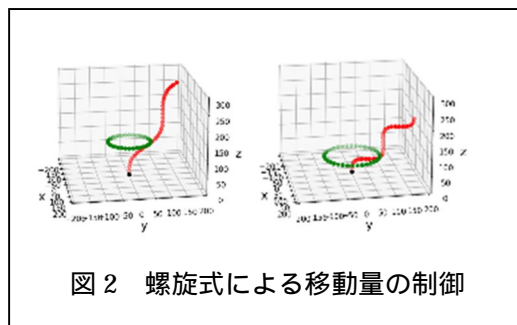


図2 螺旋式による移動量の制御

全方向移動の実現

連続体脚の螺旋の1周期目の接地点が地面を押すことにより胴体部が持ち上がり、移動を行う。また胴体が接地する際は連続体脚が持ち上がり、これを交互に繰り返すことによって胴体部は横方向へ移動する。1脚モデルを用いた移動実験よりほぼ理論値通りの移動が実現できていることを確認した。また図2に示すように螺旋式の変数によって1周期目の接地点での移動量を制御することができる。

連続体脚による螺旋捻転運動によって全方向移動を実現するために3脚モデルの試作を行った。多くのクモヒトデは5本の脚を持つが、本研究では省自由度化を目的とするため、脚を5本から3本に減らすことにした。3本は全方向移動を実現する際の最低本数である。オムニホイールと同様に、移動方向に合わせて各脚の1周期目の接地点での移動量を制御し、その他の方向への移動では接地点が順にずれていくスキッドスライドを利用して相殺する。各脚の螺旋捻転運動の周期は同じであり、3本の脚が同じタイミングで胴体部を持ち上げる。動作実験より全方向移動が実現できていることを確認した。

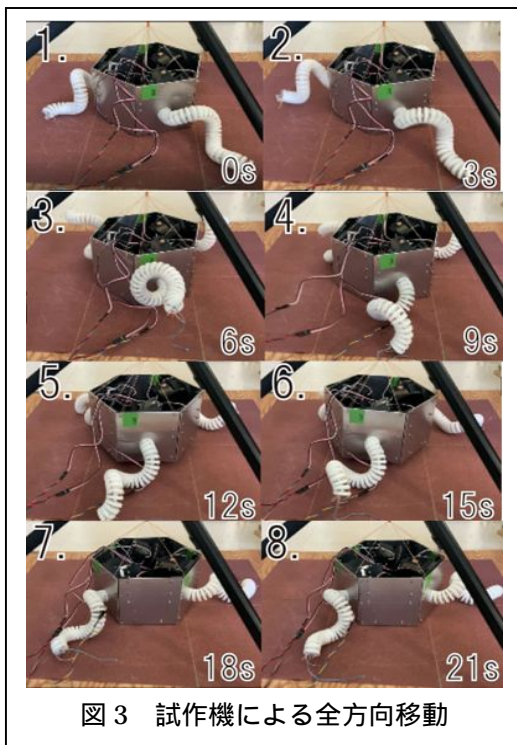


図3 試作機による全方向移動

移動性能の向上

当初の予定では水中での移動を実現するために、連続体脚と胴体部の防水化を行う予定であった。しかし可動範囲が大きく、かつ連続体脚を構成する腕骨の間に噛み込まない防水カバーの製作が難しく、本研究では移動性能の向上を優先して進めることにした。

従来の螺旋軌道の断面は円であったが、移動の際に垂直方向へ胴体部を大きく動かす必要が無い場合、螺旋軌道の断面が楕円になるよう腕骨の再設計を行った。腕骨の内部を貫通するワイヤガイドと中心からの距離の比率により水平方向が垂直方向よりも2倍の可動範囲で動作を行う。また連続体脚を駆動するワイヤの摺動抵抗の軽減と、張力の拡大を行うために機体の再設計を行った。

海中での水中無線給電で実現

水底でロボットを長時間動作させるために、海中でレーザー光による無線給電システムを構築するための基礎検討を行った。実際に様々な海域の海水を採取しレーザー光(450nm, 532nm, 635nm)の透過性を調査した結果、湾岸海水では532nm, 635nm, 450nmの順に、深海水では、532nm, 450nm, 635nmの順にレーザー光の到達度が高い事が分かった。また、これらのレーザー光を受光可能な素子

として GaInP 太陽電池を開発しその変換効率を 532nm 及び 635nm で 40%前後まで高める事に成功し、532nm レーザ光を電力に変換する効率として深海水で 31.3%を達成した。

本研究では、水中でのロボットの移動実験と、水中無線給電による効果の実証までは及ばなかったが、実際の深海水を用いて緑色レーザと GaInP 太陽電池を用いて伝送効率 31.3%を実現した意義は大きい。

5. 主な発表論文等

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

1. 著者名 Takahashi Ryusei, Hayashi Shunki, Watanabe Kosuke, Jikun Li, Iida Takehiro, Suzuki Junichi, Uchida Shiro	4. 巻 17
2. 論文標題 Optical Wireless Power Transmission under Deep Seawater Using GaInP Solar Cells	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Energies	6. 最初と最後の頁 1572 ~ 1572
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/en17071572	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 小林 望, 青木 岳史
2. 発表標題 クモヒトデを規範とした連続体脚ロボットの開発 -連続体脚の省自由度化に有効な螺旋の検討-
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 羽田 拓也, 青木 岳史
2. 発表標題 面状柔軟変形移動体のための空気圧自励弁の開発
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青木 岳史, 田中 誠弥, 川原 敏樹
2. 発表標題 クモヒトデを規範とした連続体脚ロボットの開発 -螺旋捻転運動を用いた全方向移動の実現-
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2023
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 林 駿希, 内田 史朗, 高橋龍成, 黄 耀リョウ
2. 発表標題 III-V族化合物太陽電池による水中光無線給電の高効率化
3. 学会等名 レーザー学会学術講演会第43回年次大会シンポジウム
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 渡邊康祐, 渋井駿昌, 古賀誠啓, 西館優太, 高橋龍成, 飯田健寛, 李紀コン, 内田史朗
2. 発表標題 水中光無線給電用GaInP太陽電池の高効率化検討
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 R. Takahashi, S. Hayashi, K. Watanabe, T. Maeda, Y. Wakabayashi and S. Uchida
2. 発表標題 Investigation of optical wireless power transmission under seawater in Okinawa
3. 学会等名 The 5th Optical Wireless and Fiber Power Transmission Conference (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 高橋龍成, 林 駿希, 渡邊 康祐, 李紀コン, 飯田健寛, 鈴木淳一, 内田史朗
2. 発表標題 GaInP 太陽電池を用いた海中光無線給電の検討
3. 学会等名 第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川原 紘樹, 青木 岳史, 原田 武蔵
2. 発表標題 クモヒトデを規範とした連続体脚ロボットの開発 -脚長の拡大に伴う脚機構の改良
3. 学会等名 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会2024
4. 発表年 2024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	内田 史朗 (Uchida Shiro) (50761095)	千葉工業大学・工学部・教授 (32503)	

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