

令和 6 年 4 月 18 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究

研究期間：2021～2023

課題番号：21K14118

研究課題名（和文）袋状折紙構造体の循環により不整地でも高走破が可能な超密閉式履帯駆動メカニズム

研究課題名（英文）Closed Skin Drive Mechanism Enables High Mobility on Rough Terrain with Origami Structure Track Belt

研究代表者

渡辺 将広（Watanabe, Masahiro）

東北大学・タフ・サイバーフィジカルAI研究センター・助教

研究者番号：00823452

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：研究期間全体の成果は、従来にはない折紙構造と履帯を組み合わせた機構を提案し、その機構を搭載した移動体を実現したことだ。具体的には、設計論として、蛇腹形の履帯ボディを効果的に曲げるための設計手法とその性能を明らかにし、また、多数の屈曲部を有する折紙構造の履帯を小さな駆動抵抗で駆動させるためのローラーを用いた摩擦低減構造やピンチローラ式の駆動装置などの実装方法を確立した。さらに、走行テストを行い、推進速度や旋回半径などの移動体の運動性能を測定した。以上により、原理的に完全気密構造、環境と無摺動、方向選択が可能という、不整地走行に有効となり得る機能を有する索状クローラのコンセプトが実現された。

研究成果の学術的意義や社会的意義  
研究成果の学術的意義と社会的意義は、折紙構造と履帯を組み合わせることで、三次元的に変形可能な新しい表面循環機構を提案し、その応用例として不整地移動体を示し、設計手法を明らかにしたことにある。この機構は、内部の駆動装置が袋状の履帯で包まれているため、原理上、防水・防塵構造を備え、ボディの上面・下面・側面との接触による摺動抵抗を低減可能で、移動の方向選択も可能である。これにより、複雑で劣悪な環境を走行する移動体への活用が期待される。

研究成果の概要（英文）：The main achievement of our research period is the proposal and realization of a mechanism combining a novel origami structure with a continuous track belt. Specifically, we've clarified the design methodology and performance of a mechanism to effectively bend a origami tracked body. Furthermore, we established implementation methods for driving belts with multiple bending parts with minimal resistance, utilizing anti-friction rollers and pinch roller drive mechanisms. Additionally, we conducted mobility tests to measure the performance of the vehicle, such as propulsion speed and turning radius. Consequently, we have realized the concept of a snake-like mono-track that possesses functions beneficial for off-road travel, namely a theoretically perfect hermetic structure, non-sliding interaction with the environment, and selectable directionality.

研究分野：ソフトロボティクス

キーワード：クローラ 折紙 索状体 ソフトロボット

## 1. 研究開始当初の背景

地震や水害などの自然災害あるいは人災発生時の初動・応急・復旧対応時には、倒壊した建物や瓦礫の中を移動して情報収集や作業を行うことが求められる状況がある。このような場合、ロボットによる遠隔操作により人間がアクセスしづらい、安全性の確保も困難な脆弱で狭く複雑な環境へのアクセスが必要となる。極限環境にアプローチできなければ、目的の作業をすることさえ困難になるため、モビリティは極めて重要な要素技術である。

これまでに、車輪型、クローラ型、脚型、ヘビ型、蠕動運動型など、様々な移動方式がロボットに提案されている。これらの多くの機構は、転倒や姿勢変化、駆動力が出せないボディの表面と障害物との接触によって、運動性能の低下や走行不能を招く恐れがあった。

このような背景の中、ロボットの体表面全体が一枚の履帯として無限循環し、なおかつ体を自在に曲げたり伸縮したりすることができるような柔軟な袋状の履帯を持つ構成が実現できないかを考える。この構造は、軟弱地・凹凸地形・狭隘部などの環境中の任意方向への推進や、転倒や姿勢変化時への対応、防水・防塵性の兼備等を機能として持ち合わせることが可能となる。これにより、不整地への適用が期待されるが、申請者が調べた限り、このようなロボットが具現化された例は少なく、またどのように構成にすればよいのかの方法論も確立されていない。

## 2. 研究の目的

折紙構造に着目し、完全気密な蛇腹型の袋状履帯を能動的に変形させて循環させることにより、不整地でも高走破性を実現可能な折紙移動体の推進機構の確立を目的とする(図1)。このような三次元折紙構造の履帯が循環し変形することは、どちらも実現された例はない。また、理論的な履帯の構成方法が明らかになっていないだけでなく、その具体的な製作方法や移動体としての性能の限界も不明確である。本原理を具現化することができれば、これまでに無く高い不整地走破性の実現が期待でき、学術的・実用的にも表面循環機構として画期的な機械要素になり得ると考える。

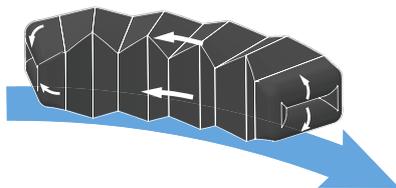


図1：折紙構造と袋状の履帯を有する移動体のイメージ

## 3. 研究の方法

本研究では、折紙移動体の推進性能を理論的・実験的に明らかにし、設計と製作により移動体の基盤技術を構築する。そのために、以下の項目に取り組む。

- (1) 移動方向を選択するためにボディを湾曲させることと袋状履帯を循環駆動させる駆動装置をそれぞれ検討し、試作により機構を具現化する。
- (2) 蛇腹折り構造のボディの最大曲げ角を求めるモデルを構築し、曲げ角度の測定により理論の妥当性を検証する。
- (3) 蛇腹折り構造の形状とボディの曲げが曲げ抵抗や推進効率に与える影響を実験により明らかにする。
- (4) 完全に閉じた履帯を有する移動体の試作機を製作し、動作実験により提案手法の有効性を検証する。実機の推進速度や旋回性能を測定する。

## 4. 研究成果

### (1) 移動体の開発

開発した移動体の外観を図2に、内部の駆動装置とボディを図3に示す。移動体は、表面の袋状履帯と、中央部のワイヤ駆動式のピッチ・ヨー2軸のボディ湾曲装置、およびボディ両端のピンチローラ式の袋状履帯で構成される。全ての駆動装置は、閉じた履帯の内側に存在している。ピンチローラ式の履帯駆動装置用のモーターは合計で4つあり、フィードバック制御により等速回転する。移動体の質量は2.1 kg、外寸は750 mm x 150 mm 150 mmであった。



図 2 : 実機の外観

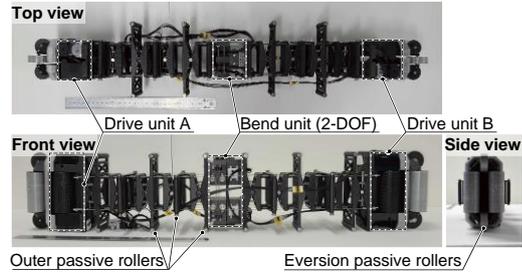


図 3 : 実機内部の駆動装置

(2) ボディの最大湾曲角

履帯膜を非伸縮膜と仮定したとき、幾何学モデルから蛇腹の最大曲げ角度を計算した。図 3 をパラメータとしたとき、最大曲げ角度は図 4 のようになった。モデルにより、次のことが明らかになった。

- ① 軸方向に膜状履帯の弛みが無くても、原理的にボディを曲げることが可能である。これは、軸方向へのテンションが必ずしも必要でないことを意味する。
- ② ボディを曲げるには、膜状履帯を内部装置に対して周方向に長くする必要がある。計算では、膜を周方向にわずかに 1% 長くすることで、単関節を  $10^\circ$  曲げることが可能である ( $l=50$ ,  $w_1=75$ ,  $w_2=150$  mm 時)。
- ③ 履帯膜の蛇腹折りを鋭角にすればするほど、最大曲げ角が大きくなる。

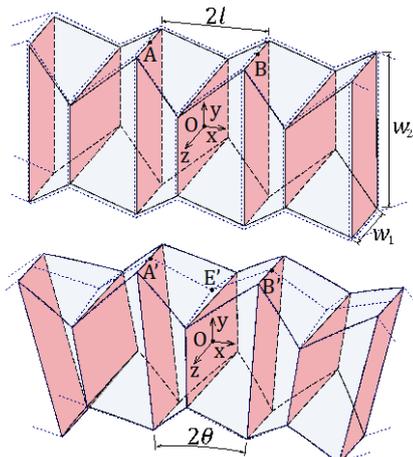


図 3 : 蛇腹のパラメータ

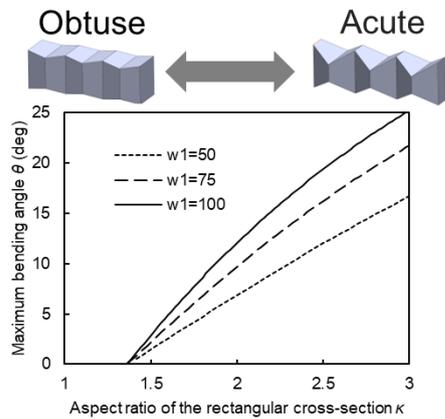


図 4 :  $l=50\text{mm}$  のときの最大曲げ角度  $\theta$

(3) 蛇腹折り形状と曲げ抵抗、駆動抵抗の関係

履帯膜の蛇腹折りを鋭角にすればするほど、曲げ抵抗が低減されるものの、履帯の駆動抵抗の増加を招くことが予想される。そこで、2つのピッチ関節と2つのヨー関節を有する実験用履帯を製作し、それぞれボディの曲げモーメントと力を測定することで、それらの影響を明らかにした。

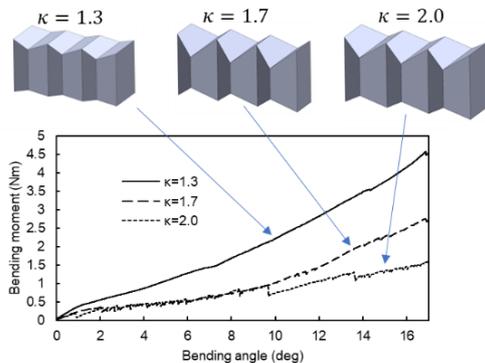


図 5 : 蛇腹折り形状とボディの曲げモーメントの関係

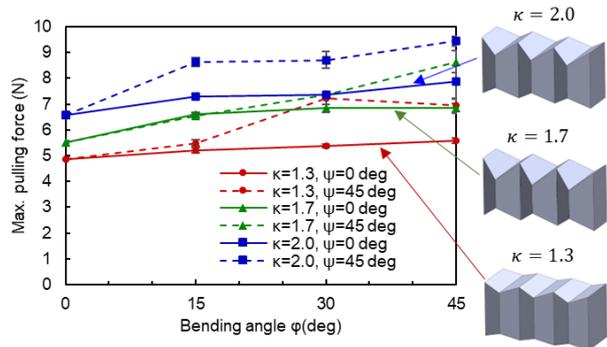


図 6 : 蛇腹折り形状と駆動抵抗の関係

#### (5) 実機の製作

バッテリーと Bluetooth の無線機を搭載させ、全装置を履帯内部に収納させた移動体を開発した。図7に示すように、前進・後退・旋回の動作が確認され、折紙構造のボディを有する移動体の全表面の循環駆動が確認された。今後はカメラやLED、マイクなどの外部環境をセンシングするためのセンサを取り付け、遠隔操作により狭隘複雑環境を探索できる移動体の開発を目指す。また、より高耐久で防塵防水性に優れ、トラクションが高い履帯の開発も行う。



図7：ボディを湾曲させ、前進後退する移動体。移動体は無線によって操作される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Masahiro Watanabe, Yuto Kemmotsu, Kenjiro Tadakuma, Kazuki Abe, Masashi Konyo, Satoshi Tadokoro
2. 発表標題 Toroidal Origami Monotrack: Mechanism to Realize Smooth Driving and Bending for Closed-Skin-Drive Robots
3. 学会等名 2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 渡辺将広, 釘持優人, 前澤侑大, 阿部一樹, 多田隈建二郎, 昆陽雅司, 田所諭
2. 発表標題 トーラス型折紙クローラ
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2022
4. 発表年 2022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
---------------------------	-----------------------	----

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