

令和 2 年 6 月 27 日現在

機関番号：11301

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2018～2019

課題番号：18H05880・19K21061

研究課題名（和文）履带上での進行波生成により任意方向移動を可能とする超柔軟無限軌道メカニズムの研究

研究課題名（英文）Soft Continuous Track Mechanism That Enables Omnidirectional Motion by Generating Traveling Waves on a Track

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） 2,100,000円

研究成果の概要（和文）：不整地や防塵・防水が要求される極限環境で移動でき、無限軌道と進行波の双方を駆動させることで全方向移動が可能な進行波生成クローラの実現が目的である。研究を通じ、進行波生成式クローラの基盤となる要素技術として、進行波生成アクチュエータの推進機構を開発した。また、駆動システムの実装と設計手法の構築のための移動体のモデル化を行った。特に、進行波生成アクチュエータに関して、円周配置された複数の螺旋軸を回転させることで連続的で滑らかな蠕動運動の生成を実現し、その設計手法の提案と実機による測定で移動特性を明らかにした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的意義は、これまで開発例のほとんど無い無限軌道と進行波の組み合わせによる全方向移動機構の具現化方法を明らかにし、また構造の違いにより一般的な車輪やクローラ型ロボットとの特性の違いを整理した。特に本研究で開発した進行波推進機構は、連続的で滑らかな蠕動運動を生成できること、単一のモータで無限回転させることで高速駆動ができること、円形断面で高剛性なデバイスを構成できること、という従来には無い特徴を実現できた点に価値がある。また社会的意義としては、本成果を一つの機械要素として、様々な不整地や防塵・防水が要求される産業・工業分野の現場に応用可能な点である。

研究成果の概要（英文）：The aim is to realize a traveling wave crawler that can move in rough terrain and in extreme environments where dust-proofing and waterproofing are required, and can move in all directions by driving both endless tracks and traveling waves. Through the study, we developed a propulsion mechanism for a traveling wave actuator as an elemental technology that forms the basis of a traveling wave generation crawler. In addition, we modeled a moving body for implementing the drive system and constructing the design method. In particular, regarding the traveling wave generation actuator, continuous and smooth peristaltic motions are generated by rotating multiple spiral axes arranged around the circumference, and the movement characteristics are clarified by a theoretical model and measurement by a prototype.

研究分野：ソフトロボティクス，ロボット機構

キーワード：全方向移動機構 進行波推進

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 極限環境を移動するロボットの必要性と求められる機能

災害対応やその復旧作業において安全かつ迅速に目的地にアクセスし、遠隔操作で情報収集や救助作業を行うロボットが求められている。様々な機能・性能が求められるが、その中でもロボットのモビリティにおいては、複雑な荒地に対応できる頑強な全方向移動機構を実現した例はほとんど無い。要求される主要な機能として、以下の3つを挙げる。

- ① ぬかるんだ軟弱地や脆弱な瓦礫上の移動
- ② 狭い場所での移動(小回りの良さ)
- ③ 周囲の瓦礫や自身の損傷の防止(衝撃吸収)

(2) 従来の移動機構の問題点

移動機構として、車輪や脚型ロボットは軟弱地での走行が困難であり、体節型やUAVはペイロードに制約がある。また、一般的なクローラ機構は移動方向切替えのためのスペースを必要とすることや、軟弱地を旋回する際に地面にめり込むこと、環境を傷つけやすいこと、落下時に自身が損傷する可能性があることが問題となっている。

2. 研究の目的

(1) 目的と研究対象

上記の問題を鑑み、従来の移動機構では実現できなかった高い走破性を有する『進行波生成式クローラ』の具現化を目的とする。移動体の駆動システムと設計、制御手法を確立し、走行実験により推進速度やペイロード、段差踏破性能などの基本的な知見を明らかにする。さらに、これを利用した遠隔操作により瓦礫上で情報収集するロボットシステムの構築を目指す。

また、本研究課題は“不整地移動ロボットの究極の姿とは何か”という問いを考える上で一つの材料になると考えており、全方向移動機構の拡張という観点で不整地移動メカニズムの確立に寄与するものと考えている。

(2) 目的達成のための課題要素と解決策

「超柔軟無限軌道メカニズム」構築することで目的を達成することを試みる。具体的には形状可変で耐衝撃性に優れた柔軟な履帯を有し、履帯上での進行波の生成により任意方向移動を可能とする駆動体を開発する。履帯自体を軸方向に推力を生成できる空圧駆動の進行波生成アクチュエータで構成することにより、従来の課題となっていた3つの項目に対し、次の3つの新しい機能を実現する。

- ① 無限軌道と進行波の双方を駆動させることによる任意方向移動
- ② 環境に合わせてロボットの構造自体が変形する対地適応性
- ③ エアバッグ状アクチュエータの無摺動・柔軟性による耐衝撃・防塵・防水化

3. 研究の方法

進行波生成式クローラの開発にあたり、最初にロボット機構の観点からクローラ全体の構成の検討し、続いて履帯に適した進行波生成アクチュエータの開発し、最後に試作機を用いてその推進特性を明らかにすることで評価する。

(1) 基本構造の検討：差動機構を搭載した面状クローラの構成

全方向移動体を実現するためには、一般に少なくとも2つの入力が必要である。また、無限循環する履帯の推進方向に対して直交方向に推進力を伝達できる動力伝達機構を構成する必要がある。本研究課題では履帯を駆動するためのチェーンを主部品とし、また履帯を複数の節に分割して各節に対して回転動力を伝達することが可能な機構を検討する。

(2) 履帯用の進行波生成アクチュエータの開発

本課題に関しては、従来の進行波を生成する機構は、推進速度、防水・防塵性、無限循環機構への搭載を満たすものが無いため、新たに開発することが必要である。

(3) 基本推進特性の測定：進行波生成アクチュエータを用いた測定

進行波による推進は、車輪やクローラのような単純な推進機構とは異なり、移動速度を明らかにするためには表面の波の動きを理解する必要がある。本研究では幾何に基づく理論解析とモーションキャプチャによる移動体表面の動きの計測、移動速度の測定を行うことで、推進原理を明らかにする。

4. 研究成果

(1) 履帯上で進行波を生成できる全方向移動機構の考案

履帯そのものを進行波生成するユニットで構成することで全方向移動を実現する構成を検討した。

① 流体駆動による波動伝播方式

流体圧を用いた駆動と履帯駆動を活用した全方向クローラを考える。その利点としては、流体がもつ柔軟性によって対地適応性・耐衝撃性の向上や、ポンプなどの駆動源を任意に配置可能ということが挙げられる。

ぜん動運動単一ユニットを搭載した試作実機を図1に示す。この構成から、ユニットに空気を供給するチューブがスプロケット駆動時にねじれるため、これを防止する機構が必要であり、また履帯上で駆動に関与したいユニットへの空気の供給を断つ機構の必要性がある。

なお、波動による推進原理としては一般的な蠕動運動を活用した機構と同様に、空圧によって収縮膨張するユニットを3つ以上連結させた構成である。アクチュエータは McKibben 型ゴム人工筋だけでなく、Plated muscle などが考えられる。

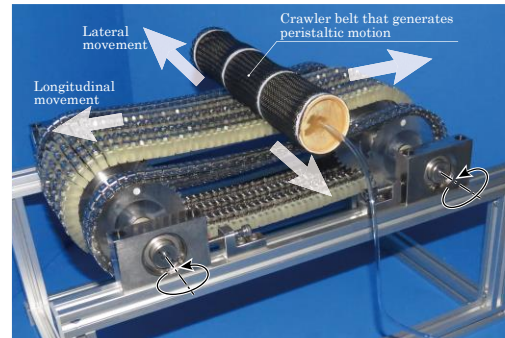


図1 流体駆動による波動伝播方式

② 無限回転による波動伝播方式

履帯上で循環する無限回転軸へ動力を伝達し、軸回転で進行波を生成するユニットを駆動させる方法を検討する。波を生成する機構としては、螺旋を活用する方法が考えられ、履帯上で循環するピッチ軸周りの無限回転軸へ動力を伝達機構として、申請者らの研究チームが取り組んできたラックチェーン機構の活用が考えられる[1]。図2の波動伝播ユニットをスプロケット軸と平行に配置された具現化方法の一例を示す(図3)。

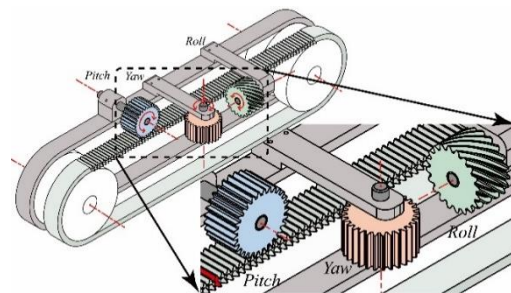


図2 ラックチェーン機構[1]

本方式の利点としては、流体駆動方式で発生するようなチューブなどの配線のねじれが生じないことや、軸の無限回転による高速駆動が可能点が挙げられる。さらに、チェーンにたわみを設けることにより、部品が剛体であっても環境になじむような柔軟性を付与することが可能である。その一方で、従来のリンクを用いた波生成方式は、防塵性や部品点数が多く装置が複雑化する課題が残されている。

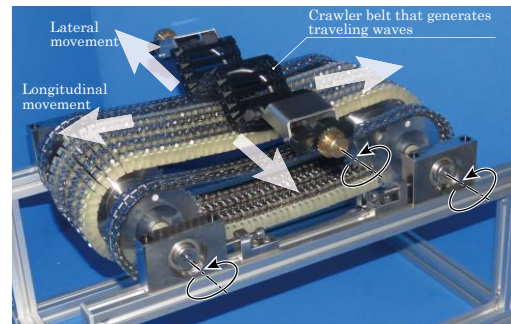


図3 無限回転方式

(2) 履帯用の進行波生成アクチュエータの考案

① Wave Wheel の提案

軸の無限回転によって進行波を生成する機構として、Wave Wheel を提案した(図4)。複数のらせんを同期して回転させることにより、スムーズな蠕動運動を生成できる。このメカニズムには、次の従来の進行波生成機構には無い特性がある。i) 滑らかで連続的な蠕動運動の生成可能。機構の表面には、環境や物体に引っかかる可能性のある段差や無限の回転軸が無い。(ii) 単一のモータによる駆動。これにより、軸の無限回転により高速で波の伝播が可能。(iii) 円形断面構造の高剛性な構成ができるため、アクチュエータ単体でも波駆動とホイール駆動を組み合わせた全方向駆動車輪として利用可能。

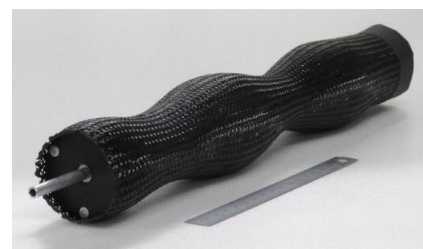


図4 Wave Wheel の外観

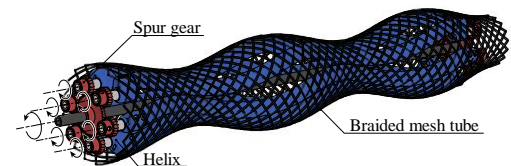


図5 Wave Wheel の基本構成

② 基本構成と推進原理

Wave Wheel は、主に内部に配置されたメッシュチューブと複数の螺旋で構成される(図5)。各螺旋は両端の平歯車と同期して同じ方向に回転する。外側の編組メッシュチューブは軸方向に引張り、両端で固定することで螺旋の形状に沿ってくびれを生成しながら変形する。以上の構成に

より、装置全体は螺旋が回転することにより、蠕動運動を生成する。図6に蠕動運動による推進手順を示す。

③設計手法

幾何的な特性に基づき、波形、推進速度、螺旋同士の干渉条件などの基本的な理論モデルを導出した。仮定としてメッシュチューブの断面が完全な円形、メッシュチューブは常に螺旋と接触、メッシュの厚さを無視することとした。過程は省略するが、以下に導出結果を示す。

横断面における編組メッシュチューブの半径は、次のように表される。

$$r(\theta) = \max_{0 \leq \varphi \leq 2\pi} \left\| r_w \mathbf{i} + \mathbf{R}_z(\theta) r_c \mathbf{i} + \mathbf{R}_z(\theta) \left(r_h \cos \varphi \mathbf{i} + \frac{r_h}{\cos \alpha} \sin \varphi \mathbf{j} \right) \right\|$$

$$= \max_{0 \leq \varphi \leq 2\pi} \left\| \begin{array}{l} r_w + r_c \cos \theta + r_h \cos \varphi \cos \theta - \frac{r_h}{\cos \alpha} \sin \varphi \sin \theta \\ r_c \sin \theta + r_h \cos \varphi \sin \theta + \frac{r_h}{\cos \alpha} \sin \varphi \cos \theta \end{array} \right\| \quad (1)$$

ただし、各パラメータは図7のように定義される。

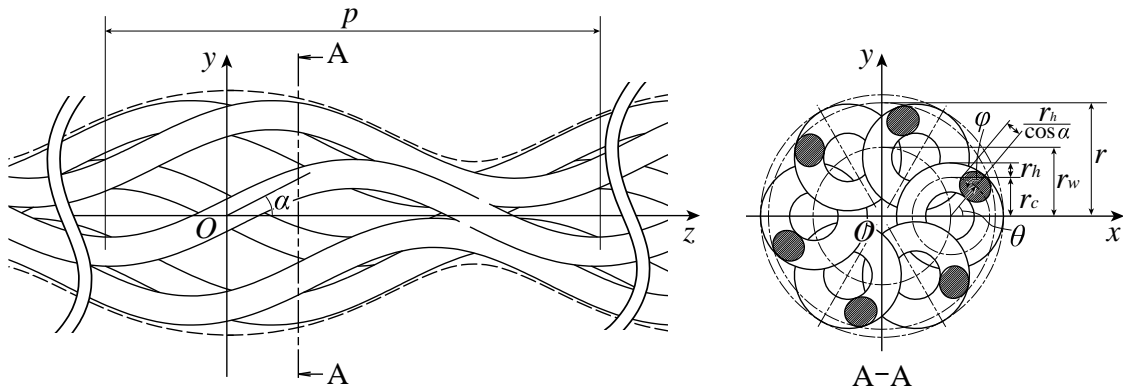


図7 内部構造の側面図および横断面の断面図

また、螺旋の角度とZ軸方向の距離は以下のように表される。

$$z = \frac{p}{2\pi} \theta. \quad (2)$$

一方、速度は次のように表される。

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & r_w + r_h + r_c \\ \delta/2\pi & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_h \\ \omega_w \end{bmatrix}. \quad (3)$$

ただし、図8のようにメッシュの角度を定義し、変位δも以下のように計算する。

$$\delta = \int_0^p \left[\sqrt{1 + \tan^2 \gamma \left\{ 1 - \left(\frac{r(z)}{r_w + r_h + r_c} \right)^2 \right\}} - 1 \right] dz. \quad (4)$$

最後に、螺旋の干渉条件は、螺旋数nを用いて以下のようにになる。パラメータを図9に示す。

$$r_w - r_c - \left\| r_h \cos \beta \mathbf{i} + \frac{r_h}{\cos \alpha} \sin \beta \mathbf{j} \right\| \cdot \frac{\sin(\beta + \frac{\pi}{n})}{\sin(\frac{\pi}{n})} > 0. \quad (5)$$

$$\beta = \text{atan} \left(\frac{1}{\cos \alpha \tan \frac{\pi}{n}} \right). \quad (6)$$

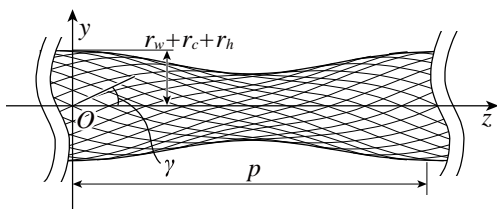


図8 メッシュ角度

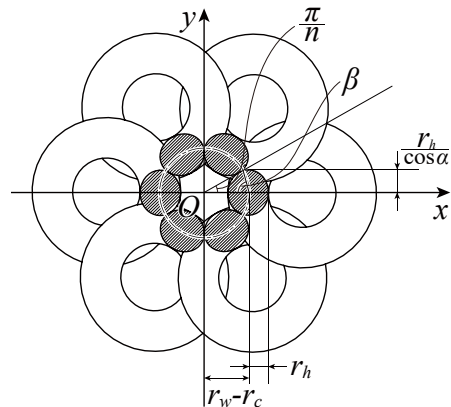


図9 螺旋干渉条件

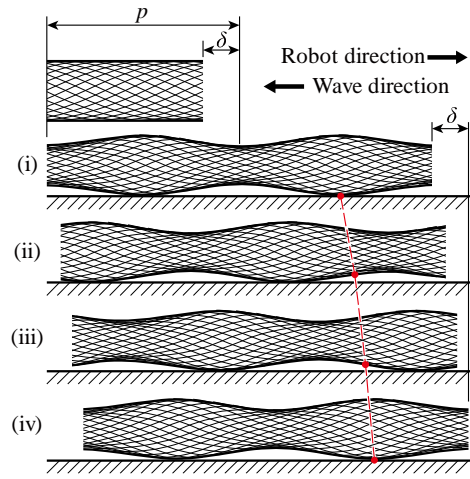


図6 蠕動運動による推進

(3) 基本推進特性

移動速度の測定結果を図10に示す。理論値と同様に、螺旋の角速度におおよそ比例して速度が増加した。しかしメッシュと螺旋間の摩擦の影響によりメッシュに十分な軸方向の張力を付与できなかったためにメッシュが螺旋の形状に適応できず、実測値は理論値を下回った。また、実測値は角速度の増加に伴い、移動速度の勾配が減少しているが、これは進行波の伝播による振動で推進効率が低下したためと考えられる。

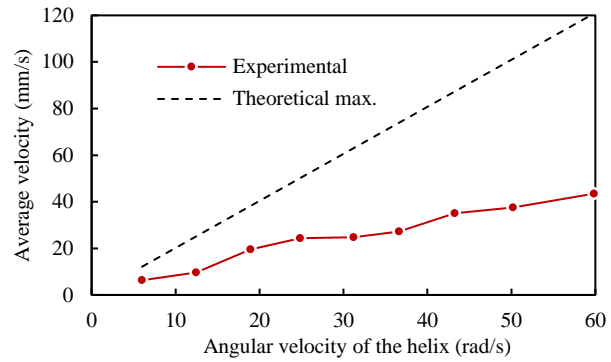


図10 推進速度の測定結果

さらに、蠕動運動する装置に対し、モーションキャプチャで表面の動きの軌跡を測定した。その結果、表面は楕円的な周期運動を行うことが示されたが、位置によって軌跡の形状が異なることがわかり、端部の固定とメッシュの伸縮運動の相互作用により複雑な運動が生成されていることが明らかとなった。

(4) 国内外における位置づけとインパクト

目的であったクローラ全体の完成には至らなかったものの、その経過の報告や進行波生成アクチュエータに関する発表に対して評価を得られた。国内学会である日本機械学会 Robomech2019 にて発表した「履带上で進行波により全方向移動可能なクローラ機構」の発表に対し、日本機械学会ロボメカ部門 ベストプレゼンテーション表彰を受賞したことから、本研究がインパクトを与え、評価されたことが伺える。また、国際ジャーナルである IEEE Robotics and Automation Letters にて研究タイトル“Bundled Rotary Helix Drive Mechanism Capable of Smooth Peristaltic Movement”が採択され、国外からも一定の評価を得たと考える。さらに、特許出願“多重螺旋回転装置”，特願 2020-054135，出願日：2020年3月25日を行い、高い新規性と産業への応用の可能性を含んでいる。

(5) 今後の展望

進行波生成アクチュエータに関しては、防水・防塵は未実装であり、波の生成を阻害しないカバーの開発が必要である。さらに案機構のクローラへの実装と構造の洗練化を進めていく。

一方で空圧式の波動クローラは空圧源や配線の取り回し等の実装上の問題があり、その対策の検討などさらなる研究が望まれる。

<参考文献>

[1] 西城 直人, 清水 杜織, 小澤 悠, 高橋 知也, 恩田 一生, 高根 英里, 渡辺 将広, 多田 隈理一郎, 多田 隈建二郎, 昆陽 雅司, 田所 諭, “ピッチ軸型ラックチェーン機構”, 第20回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 3C3-08, 香川, 2019年12月12-14日.

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 Watanabe Masahiro, Tadakuma Kenjiro, Konyo Masashi, Tadokoro Satoshi	4. 巻 to appear
2. 論文標題 Bundled Rotary Helix Drive Mechanism Capable of Smooth Peristaltic Movement	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Robotics and Automation Letters	6. 最初と最後の頁 to appear
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/LRA.2020.2986993	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3件（うち招待講演 1件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 渡辺将広
2. 発表標題 履帯上での進行波生成により全方向移動可能なクローラ機構
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Watanabe Masahiro, Tadakuma Kenjiro, Konyo Masashi, Tadokoro Satoshi
2. 発表標題 Bundled Rotary Helix Drive Mechanism Capable of Smooth Peristaltic Movement
3. 学会等名 RoboSoft 2020（国際学会）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 渡辺将広
2. 発表標題 メカ屋が考える“いいかげん”ロボットの価値
3. 学会等名 異分野融合で“いいかげん”を科学するソフトロボット学（招待講演）
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔出願〕 計1件

産業財産権の名称 多重螺旋回転装置	発明者 渡辺, 藤本, 多田隈, 昆陽, 田所, 西村	権利者 同左
産業財産権の種類、番号 特許、特願2020-054135	出願年 2020年	国内・外国の別 国内

〔取得〕 計0件

〔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
--	---------------------------	-----------------------	----