

補助事業番号 2022M-185

補助事業名 2022年度 円状断面クローラ機構に基づく全方向移動メカニズムの開発補助事業

補助事業者名 東北大学 タフ・サイバーフィジカルAI研究センター 多田 隈 建二郎

1 研究の概要

円状断面クローラの研究開発

2 研究の目的と背景

クローラ車両の機動性向上を目指してOmni-Crawler”[1]や“ODD-Crawler”[2]などの全方向駆動クローラ機構が創案・実機具現化されたが、特異姿勢の存在や段差踏破性能の異方性に課題があった。本研究においては、前後左右の踏破能力が同等で、ホロノミックな全方向移動が可能な新規のクローラ機構として、双ベルト式円状断面クローラ機構の基本原則を創案し、実機の具現化および動作検証を行ったので報告する

3 研究内容

([掲載ページ](#) → [双ベルト式円状断面クローラ機構](#))

1. 双ベルト式円状断面クローラ機構

2.1 機構の基本構成

原理創案・実機具現化した双ベルト式円状断面クローラ機構の外観を図2に示す。これは同等な大きさ・形状を有する2つの履帯が、履帯の進行方向を回転軸として位相を 90° ずらして配置された構造を有するものである。履帯の回転（自転と定義）により進行する方向を前後方向と定義すると、創案機構の断面は円状となっているため、機構全体が転がるように回転（公転と定義）することで、左右方向へも能動的な移動が可能である[3]。

クローラ機構の内部には後述する偏心遊星差動歯車機構が搭載されており、内外に連続した2本の動力伝達軸に独立した2つの回転入力を与えることで、前後方向および左右方向への移動が出力される。

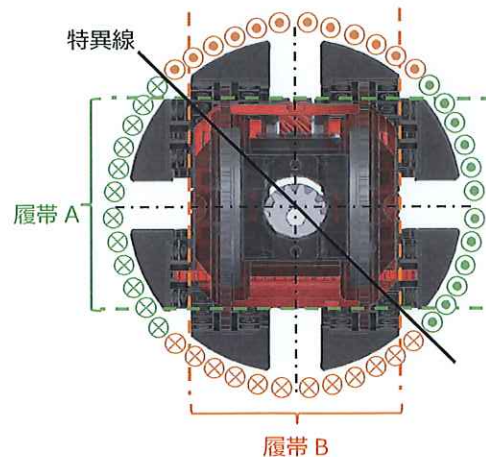


図3 履帯各部の回転方向（円状断面表示）

2.2 幾何学的な特異線の存在

創案した双ベルト式円状断面クローラ機構の履帯各部の回転方向を図3に示す。図3に示すとおり、自転を1自由度の入力で実現する場合、履帯の進行方向が連続的とならない特異線が存在する。したがって双ベルト式円状断面クローラ機構による連続的な移動を可能にするためには、地面に対して常に履帯の直線部が同一方向に進行するように2つの履帯の回転方向を整流する必要がある。また、前後左右だけではなく旋回動作も含めた全方向駆動を実現するために、創案機構を2組以上組み合わせさせた移動体を構成した。

2. 偏心遊星差動歯車機構

3.1 機構の基本構成

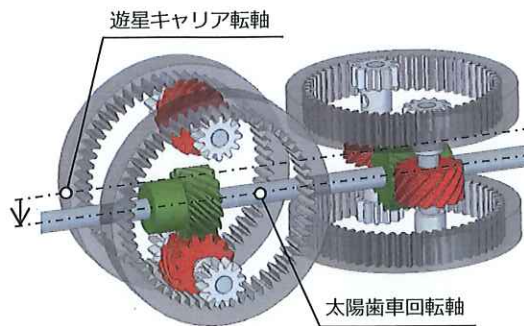


図4 偏心遊星差動歯車機構

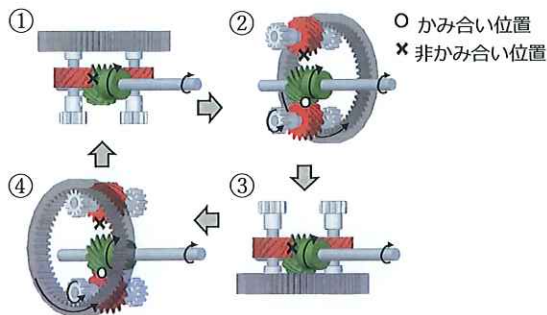


図5 回転方向整流作用

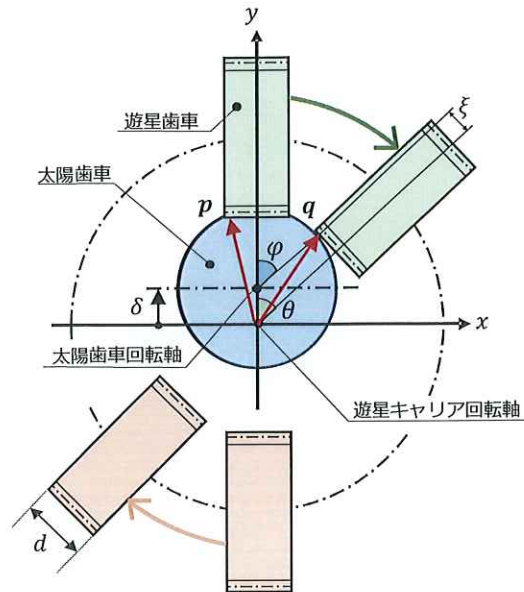


図6 偏心遊星差動歯車機構の詳細パラメータ

回転方向の整流と円状断面クローラ機構の駆動の双方を実現するために、偏心遊星差動歯車機構を新たに原理創案した。本機構の外観を図4に、履帯の回転方向整流動作の流れを図5にそれぞれ示す。偏心遊星差動歯車機構は2本の入力軸の回転を、自転および公転に変換する差動装置の構造と、履帯の回転方向を整流する作用を併せ持つ。本機構は従

来の遊星歯車機構の太陽歯車と遊星歯車をはすば歯車に置き換えて、太陽歯車の回転軸を遊星キャリアおよび内歯車の回転軸からずらした構造を有する。

偏心遊星差動歯車機構は、従来の遊星歯車機構と同様に太陽歯車、遊星歯車、遊星キャリア、内歯車の4つの要素で構成されているため、2つの回転入力转自転および公転に変換する差動歯車機構として使用可能である。また太陽歯車の回転軸が遊星キャリアおよび内歯車の回転軸からオフセットした位置に存在するため、太陽歯車とかみ合う遊星歯車を1つに限定することができる。太陽歯車と接触する遊星歯車を1つに限定した結果、クローラ機構が公転したときに太陽歯車とかみ合う遊星歯車が切り替わり、履帯の回転方向を整流することが可能となる。双ベルト円状断面クローラ機構の内部には、偏心遊星歯車機構が2つ入力軸方向へ直列に配置されている。

3.2 幾何学的な性質

図6に示すように2つの遊星歯車を有する偏心遊星差動歯車機構を考える。太陽歯車のねじれ角を α_1 [rad]、歯数を z_1 、遊星歯車のねじれ角を α_2 [rad]、歯幅を d 、モジュールを m 、遊星キャリアの回転軸からみたかみ合い限界の公転角度を θ [rad]、太陽歯車の回転軸からみたかみ合い限界の公転角度を φ [rad]とすると、かみ合い限界時の太陽歯車と遊星歯車の接触位置 $\mathbf{q} = [x_q \ y_q]^T$ は

$$\begin{bmatrix} x_q \\ y_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{m(z_1 + 2)}{2 \cos \alpha_1} \sin \varphi \\ \frac{m(z_1 + 2)}{2 \cos \alpha_1} \cos \varphi + \delta \end{bmatrix}, \quad (1)$$

により定まる。ただし、太陽歯車と遊星歯車を歯直角方式のはずば歯車とする。また \mathbf{q} は位置ベクトル \mathbf{p} を回転して得られるため、反時計まわりを正とした公転軸まわりの平面上の回転行列を $Rot(\theta)$ とすると

$$\mathbf{q} = Rot(-\theta)\mathbf{p}, \quad (2)$$

の関係が得られる。かみ合い限界の状態のかみ合い位置に対応するパラメータ ξ を以下のように定義する。なお、 $u(d)$ は単位ステップ関数である。

$$\xi = \frac{d}{2} + \left(\frac{2m \sin \theta}{1 - \cos \theta} - \frac{d}{2} \right) u \left(\frac{d}{2} - \frac{2m \sin \theta}{1 - \cos \theta} \right). \quad (3)$$

位置ベクトル $\mathbf{p} = [x_p \ y_p]^T$ は

$$\begin{bmatrix} x_p \\ y_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\xi \\ \frac{mz_1}{2 \cos \alpha_1} - \frac{m}{\cos \alpha_2} + \delta \end{bmatrix}, \quad (4)$$

であることに注意し、(1)(2)(4)式から φ を消去することで、設定すべき偏心率 δ が2次方程式の解の形で以下により与えられる。

$$\delta = \frac{-b + \sqrt{b^2 - 4ac}}{2a}. \quad (5)$$

ただし各係数 a, b, c は

$$a = 2(1 - \cos \theta), \quad (6)$$

$$b = 2m \left(\frac{z_1}{2 \cos \alpha_1} - 1 \right) (1 - \cos \theta) - 2\xi \sin \theta, \quad (7)$$

$$c = \xi^2 - \frac{2m^2 z_1}{\cos \alpha_1}, \quad (8)$$

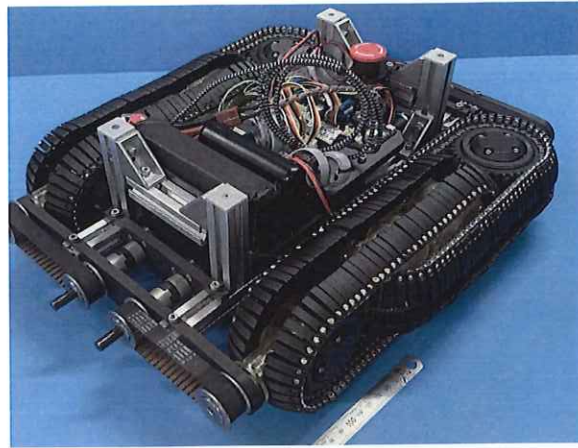


図 7 実機具現化した検証用移動体

により定まる. (5)式の解は $\theta \rightarrow 0$ の極限において無限大に発散するため, かみ合い限界の公転角度 θ はある程度大きな値に設定する必要がある. また, 双ベルト円状断面クローラ機構への応用時は, 公転角度 θ を

$$\frac{\pi}{4} < \theta < \frac{\pi}{2}, \quad (9)$$

の範囲に設定する必要がある.

3. 実機具現化

創案原理の有効性を確認するために, 検証用移動体を実機具現化した.

表 1 検証用移動体の仕様

| | |
|------------------------------------|---------|
| Number of Motors | 4 |
| Material of Grocer | ONYX |
| Material of frame | AR-M2 |
| Width of Machine | 370 mm |
| Length of Machine | 450 mm |
| Cross section diameter of Crawlers | 104 mm |
| Weight of Machine | 9.32 kg |

移動体は双ベルト式円状断面クローラ機構を2つ左右に配置して構成した. 検証用移動体の外観を図7に, 仕様を表1にそれぞれ示す.

具現化した移動体は, 4つのモータの回転入力を平面上の移動および旋回動作して出力する. スプロケットの基準円半径を R_{Rot} [mm], 円状断面半径を R_{Rev} [mm], 入力軸-スプロケット間の減速比を β , 公転軸間距離を $2R$ [mm], 目標速度を v [mm/s], 旋回速度を ω



[rad/s], 各モータの回転速度を ω_i ($i = 0 \sim 3$) [rad/s]とすると, 検証用移動体の逆運動学は

$$\begin{pmatrix} \omega_0 \\ \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \end{pmatrix} = \frac{1}{R_{Rev} R_{Rot} \beta} \begin{pmatrix} R_{Rot} \beta & 0 & 0 \\ -R_{Rot} \beta & -R_{Rev} & -R_{Rev} \\ R_{Rot} \beta & 0 & 0 \\ -R_{Rot} \beta & -R_{Rev} & RR_{Rev} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix}, \quad (10)$$

により与えられる. ただし, モータの回転方向は出力軸からみて反時計回りの方向を正とする.

4. 動作検証実験

具現化した実機を用いて, 創案原理の確認を目的とする実証実験を行った. 実証実験では, 実機に対してななめ方向への直線軌道を描く入力を与え, 移動の様子を観察した. ななめ方向への直線軌道を描く入力は

$$\begin{pmatrix} v \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A \\ B \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (11)$$

により与えられる. ただし, A, B を任意の定数とする. 入力を与えた場合の実機の動作を図8に示す. 図8より, 試作した実機がななめ方向への直線的かつ連続的な移動を実現したことが分かる. したがって, 創案機構がホロノミックな全方向移動機能を有することが明らかとなった. しかし, $\omega = 0$ の入力を与えているにもかかわらず, 移動体が旋回動作を行う場合があった. 上記について, 偏心遊星差動歯車機構の特性によって履帯の回転方向が切り替わる瞬間の歯車のかみ合い率が小さく, 十分に動力が伝達されていないことが要因として考えられる.

5. 偏心遊星差動歯車機構の展望と応用

6.1 連続転位はすば歯車の実機具現化

創案した偏心遊星差動歯車機構は, 太陽歯車とかみ合う遊星歯車を切り替えることで対象へ動力を伝達するだけでなく回転の整流作用を有する. しかし, かみ合う遊星歯車の切り替え時のかみ合い率の変化によって動力伝達経路に不確実な領域が存在することが実証実験により示唆された.

そこで, かみ合い率を一定値にするための機械要素として連続転位はすば歯車を創案する. 連続転位はすば歯車は軸方向の位置に応じて異なる転移係数を有するはすば歯車である. 偏心遊星差動歯車機構において太陽歯車の基準円筒と円軌道を描く遊星歯車の基準円筒が最も近づく位置 D は, 図9に示すとおり遊星キャリアの回転角度 θ に応じて単調に変化する. したがって位置 D に対応して転移係数 x の値が変化するようなはすば歯車を遊星として使用することで, かみ合い率が一定の偏心遊星差動歯車機構を構成することができると考えられる.

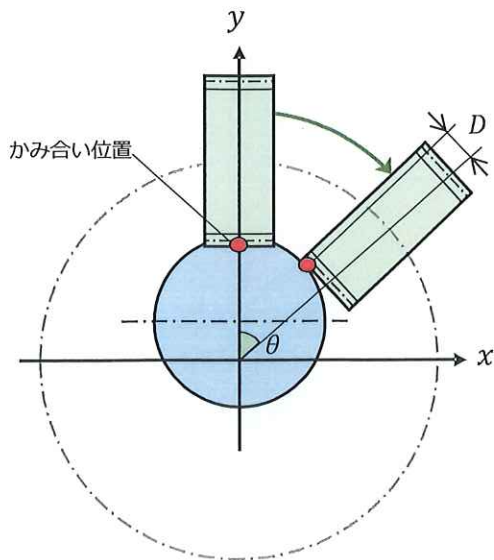


図9 太陽歯車と遊星歯車のかみ合い位置と
かみ合い率の変化



図10 球状全方位車輪機構[4]



図11 双リング式全方位車輪機構[5]

6.2 整流作用を必要とする機構への適用

双ベルト式円状断面クローラ機構では2つの遊星歯車を有する偏心遊星差動歯車機構を2つ直列に配置し、ホロノミックな全方位移動を実現した。さらなる拡張として、図10に示す球状全方位車輪機構[4]への適用機や図11に示す双リング型全方位車輪機構[5]への適用機などをはじめとする、偏心遊星差動歯車機構の整流作用を活用した機構の創案が挙げられる。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

物流・農業・海底探査などの足回りを刷新する全方向不整地走破メカニズムとしての移動の拡張提供。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

円状断面クローラ機構の第6代目にあたる最新の機体であり、これまでに問題であった特異線の最小化と特異線通過時の方向切り替え機構の導入など、画期的な機構原理の創案と実機具現化を達成した。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

・栢分 峻汰郎, 佐野 峻輔, 清水 翔也, 阿部 一樹, 渡辺 将広, 多田隈 建二郎, 田所 諭, ``双ベルト式円状断面クローラ機構``, 日本機械学会 ロボティクス・メカトロニクス講演会 講演予稿集, 2023.

・栢分 峻汰郎, 佐野 峻輔, 阿部 一樹, 渡辺 将広, 多田隈 建二郎, 多田隈 理一郎, 田所 諭, ``双ベルト式円状断面クローラ機構``, 第41回 日本ロボット学会学術講演会 講演予稿集, 2023.

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの
該当なし.

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

- ・日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門2023予稿集,
- ・日本ロボット学会学術講演会2023予稿集

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名: 東北大学タフ・サイバーフィジカルAI研究センター

住 所: 〒980-8579

仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-01

担 当 者: 准教授 多田隈 建二郎 (タダクマ ケンジロウ)

担 当 部 署: 多田隈研究室 (タダクマケンキュウシツ)

E - m a i l: tadakuma@rm.is.tohoku.ac.jp

U R L: <https://www.rm.is.tohoku.ac.jp/~tadakuma/>