

無限回転軸の自由度を追加した高効率・高速移動ヘビ型ロボットに関する研究

Study of a highly efficient, high-speed snake-like robot with an additional degree of freedom of infinite rotation axis

研究代表者 大阪公立大学工学研究科 助教 山野 彰夫*

Akio Yamano

Snake-like robots have attracted attention as robots that can travel over rough terrain where wheeled mobility mechanisms cannot. Previous research on snake-like robots has mainly focused on the biological movement of snakes; therefore, the issue of power consumption caused by driving a large number of actuators still remains unaddressed. In this study, we propose a mechanism that transforms the forward and backward links of a snake-like robot into a wheel-like shape to realize a two-wheeled vehicle mode of movement on the flat ground, which provides the same reliability, moving speed, and efficiency of movement as a wheeled mobile robot. A numerical analytical model was used to search for a control law that would avoid rolling over in the two-wheeled vehicle mode. Next, an experimental model was developed to evaluate switching between wheeled vehicle mode and undulation mode. After that, we evaluate the feasibility of traveling by wheels.

要旨

ヘビ型ロボットは、車輪型の移動機構では移動できないような不整地を走行するロボットとして注目されている。これまでのヘビ型ロボットの移動方法の研究では、主に生物学的なヘビの移動に着目した研究が多くなされてきたため多数のアクチュエータを駆動させることによる消費電力の課題は依然として残されている。

本研究では、平地の地面上の移動において、ヘビ型ロボットの前方と後方のリンクを車輪状に変形させて2輪車の移動モードを実現させる機構により、車輪移動式のロボットと同等の信頼性・移動速度・移動の効率性を実現させる機構を提案する。数値解析モデルを用いて2輪車の移動モード時の転倒を回避するような制御則の探索を行った。次に、実験モデルを製作し、車輪移動モードとうねり駆動モードの切替、および車輪移動の実現性を評価した。

1. まえがき

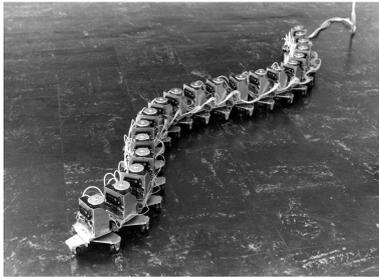
現在、地上を移動するロボットのほとんどは、車輪を備えた機構を持つ。このような車輪型の機構は、滑らかな平地では、その他の地上を移動する機構に比べて移動効率が良く、制御が容易であるという利点がある一方で、起伏や岩場の多い地形、狭い通路、砂地や泥地などの軟弱地形では移動できないという

欠点も持つ。

この問題に対応する機構としてヘビ型ロボットが注目されている。ヘビ型ロボットは多数の関節で連結された細長いリンクを持つ索状ロボットである。索状ロボットは多数のジョイントを同時に様々な方向・角度に動かすことで滑らかな曲線を描き、ヘビのような動きが可能となる。これによりヘビが移動可能な、不整地や水中などのあらゆる環境に対応できるため、惑星探査や災害現場での活躍が期待されている。例えば、Ennerらは、直線パイプの内側と外側の両方を移動するロボットを開発しており、これは、パイプ内外の目視検査や非破壊検査など幅広い用途での活用が期待される⁽¹⁾。Matsumotoらは、折りたたみ式のアームを搭載したヘビ型ロボットを提案し、工場プラント内の複雑な環境下でバルブを回転させたりドアを開けたり高所にアクセスして検査を行うなどの複雑な行動を実現した⁽²⁾。その他、火災現場⁽³⁾、水中での作業⁽⁴⁾、および宇宙探査⁽⁵⁾等での運用を想定した研究がある。

ヘビの移動に関する最初の定量的な研究は、1946年にGrayによって行われた⁽⁶⁾。そして、1972年にHiroseによって、図1(a)のような最初のヘビの運動に着想を得た受動輪付きのヘビ型ロボットが製作された⁽⁷⁾。また、Satoらにおいて、車輪のないヘビ型ロボットの蛇行運動のモデル化・フィードバック

* 大阪府立大学 工学研究科 助教



(a) リンク上の受動輪による移動⁽⁷⁾



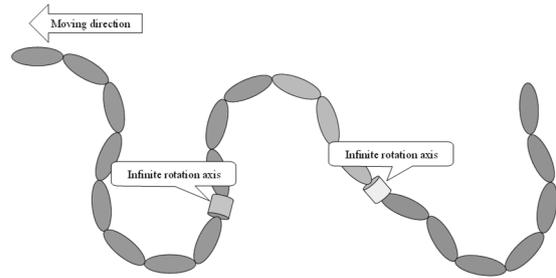
(b) ヘビ型ロボット⁽¹³⁾のサイドワインディングによる移動

図 1 ヘビ型ロボットの既存の移動モード

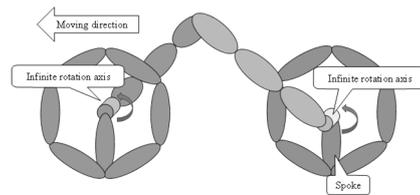
制御・電力効率の分析が行われた⁽⁸⁾. Transeth らは、障害物を利用して平地を高速に移動する手法と、それを検証するための接触を伴う三次元の数値モデルを提案している⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾. また、車輪のないヘビ型ロボットの蛇行運動の一つとして、ガラガラヘビが砂の環境を横切って移動するためのうねり運動の一種であるサイドワインディング運動(図 1(b))に関する研究も多い. Tesch らは、サイドワインディング運動と他のうねり駆動の移動方法について、エネルギー消費量を比較しており、サイドワインディング運動の移動効率の高さを示した⁽¹¹⁾. Ariizumi らの研究では、数値解析により移動速度とエネルギー効率の関係性評価し、摩擦の異方性が十分に大きくない環境下で最も効率的な移動方法であることを示した⁽¹²⁾.

以上の研究では、主に生物学的なヘビの運動に注目して、移動性や安定性を検証している. 一方で、ヘビ型ロボットは、多数のアクチュエータを同時に駆動させる必要があるため、車輪型のロボットに比べて、移動速度が遅く、エネルギー効率が悪いという欠点や、自由度の高さから移動メカニズムやその制御が複雑になるという欠点を持つ. したがって、関節の多数のアクチュエータを動かして操作するため、大幅なエネルギー効率の向上は見込めないと考えられる.

そこで本研究では、車輪での移動の方が効率的で



(a) 蛇行移動モード



(b) 車輪移動モード

図 2 提案する無限回転軸の自由度を有するヘビ型ロボット

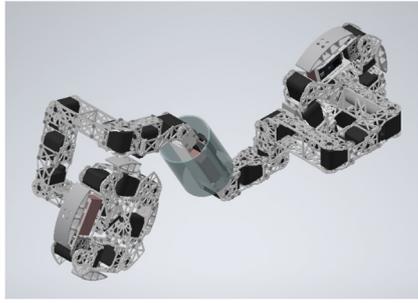
あると考えられる平坦な地形では、図 2 のように車輪で移動することを選択できるような機構を持った索状ロボットを提案し、整地と不整地の間で適切な移動形態を選択することで移動効率を改善する手法を提案する. 提案手法では、前方と後方のリンクを車輪状に変形させて 2 輪車の移動モードを実現させる. 2 輪車の移動モード時には前後の車輪の重心が車軸から偏心した状態となり、高速回転時には振動が発生して転倒のリスクが高くなる. そこで、マルチボディ・ダイナミクスによりヘビ型ロボットの動力学的数値解析モデルを構築し、走行安定性の評価および安定性を向上させる制御則の評価を行う. 次に、実験モデルを設計・製作し、提案手法の有効性を評価する.

2. 解析モデル

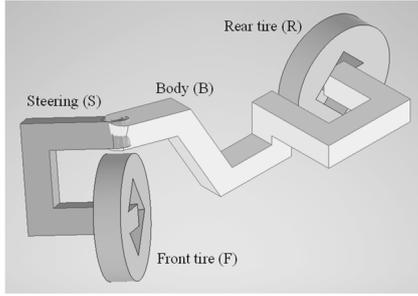
2.1 索状ロボットの設計とモデル化

図 3 のように、解析の対象となる車輪移動モードのヘビ型ロボットの詳細設計を行い、解析に必要な諸量を決定した. 基本リンクの軸間距離を 70 mm に設定し、自転車移動モードに変形した際のタイヤ部分が四角形になると構成とする. 三次元の動きを可能とするために、リンクが交互に直角に動くよう配置されている. したがって、タイヤとなる四角形の一辺の長さは基本リンク長の 2 倍の 140 mm となる.

基本リンク長を参考に、車輪移動モードに変形し



(a) 詳細な設計モデル



(b) 数値解析用の4剛体モデル

図3 詳細な設計モデルおよび数値解析用に簡略化された4剛体モデル

た際に各部が干渉しないように、その他のリンクの長さを適切に決定した。それらの値より、車輪移動モードの索状ロボットを構成する各部分の形状・寸法を決定した (図3(a))。

次に、解析を行うために、車輪移動モードの索状ロボットのモデル化を行う。通常、ヘビ型ロボットは多数のリンクから構成されるため、その運動解析を行うには、構成要素のリンク一つ一つの運動について考える必要がある。しかし、車輪移動モードのとき、各部分を構成するリンクの位置関係は変わらないため、各部分は1つの剛体であると考えることができる。本研究では、図3(b)のように4つの部分から構成されていると考え、それぞれを、フロントタイヤ (F)、ステアリング (S)、ボディ (B)、リアタイヤ (R) としてモデル化する。

2.2 運動方程式

ヘビ型ロボットは、多数のリンクが連結した構造になっていることから、それぞれのリンクの動きに制約が生じる。したがって、マルチボディ・ダイナミクスの手法を用いて運動方程式を導出する必要がある。マルチボディ・ダイナミクスによる運動方程

表1 車輪移動モードでの各剛体の諸元

Front tire (F)	Mass [kg]	1.52
	COG [mm]	[0.987 -0.268 0.223]
Rear tire (R)	Moment of inertia [kg m ²]	$\begin{bmatrix} 5.36 & 0.06 & 0.01 \\ * & 5.31 & 0.01 \\ & & 10.0 \end{bmatrix} \times 10^{-3}$
Steering (S)	Mass [kg]	0.919
	COG [mm]	[0 -97.0 -70.6]
	Moment of inertia [kg m ²]	$\begin{bmatrix} 20.2 & 0.00 & 0.01 \\ * & 9.10 & 5.92 \\ & & 11.5 \end{bmatrix} \times 10^{-3}$
Body (B)	Mass [kg]	2.50
	COG [mm]	[-194 35.6 -56.9]
	Moment of inertia [kg m ²]	$\begin{bmatrix} 25.9 & 31.7 & -25.7 \\ * & 166 & 2.12 \\ & & 164 \end{bmatrix} \times 10^{-3}$

式には、物体同士の拘束条件が含まれ、本研究における車輪移動モードの索状ロボットの運動方程式は次のようになる。

$$\begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} & \mathbf{C}_r^T & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & 4\mathbf{L}^T \mathbf{J}' \mathbf{L} & \mathbf{C}_\varepsilon^T & \mathbf{C}_{E\varepsilon}^T \\ \mathbf{C}_r & \mathbf{C}_\varepsilon & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{C}_{E\varepsilon} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{r}} \\ \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}} \\ \boldsymbol{\lambda} \\ \boldsymbol{\lambda}_E \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \mathbf{f} \\ 2\mathbf{L}^T \mathbf{n}' + 8\dot{\mathbf{L}}^T \mathbf{J}' \dot{\mathbf{L}} \boldsymbol{\varepsilon} \\ \boldsymbol{\gamma} \\ \boldsymbol{\gamma}_E \end{bmatrix}.$$

ここで、 \mathbf{r} は各部分の重心位置をグローバル座標系で表した位置ベクトルで、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ は物体座標系の姿勢を表す変数であるオイラーパラメータであり、 $(\dot{\cdot})$ は時間微分である。また、 \mathbf{M} , \mathbf{J}' はそれぞれ質量行列および重心を原点とする物質座標系における慣性テンソルであり、 \mathbf{f} , \mathbf{n}' はそれぞれ外力および重心を原点とする物質座標系におけるトルクである。

$\mathbf{C}(\mathbf{r}, \boldsymbol{\varepsilon})$ は各部分同士の拘束条件式で、 $(\cdot)_{\mathbf{r}}$, $(\cdot)_{\boldsymbol{\varepsilon}}$ はそれぞれ位置 \mathbf{r} での偏微分、オイラーパラメータ $\boldsymbol{\varepsilon}$ での偏微分である。 \mathbf{C}_E はオイラーパラメータの正規化条件式である。 $\boldsymbol{\gamma}$ は、 $\boldsymbol{\gamma} := \mathbf{C}_r \ddot{\mathbf{r}} + \mathbf{C}_\varepsilon \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ という形で定義される。同様に、 $\boldsymbol{\gamma}_E$ は、 $\boldsymbol{\gamma}_E := \mathbf{C}_{E\varepsilon} \ddot{\boldsymbol{\varepsilon}}$ という形で定義される。

2.3 衝突力モデル

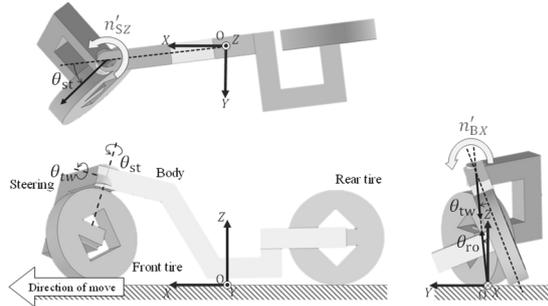


図 4 姿勢角及び制御入力トルクの定義

本研究において、物体自体は変形せず地面を透過するとして、物体の最下点が地面を透過した量を物体の移動量 δ として定義する. このとき衝突力は、衝突点Pにおける物体表面の単位法線ベクトル \mathbf{n}_P を用いて、

$$\mathbf{f}_{\text{cont}} = f_{\text{cont}}(\delta, \delta) \mathbf{n}_P, \quad (2)$$

と表現される. 本研究では Spring dashpot model⁽¹⁴⁾ を採用した.

2. 4 数値解析条件

車輪移動モードの索状ロボットをモデル化し、数値解析を行うために必要な各部分の諸元を表 1 に示す. なお、解析プログラムは MATLAB で作成し、ode15s で式(1)の運動方程式を解き、車輪移動モードの索状ロボットの運動解析を行った. また、式(1)の拘束条件を満足させるため、本研究では Baumgarte の拘束安定化法⁽¹⁵⁾ を用いた.

3. 走行安定性の評価

3. 1 安定化トルクの導入

車輪移動モードのへび型ロボットにおいて、前後の車輪は車軸から偏心した状態となり、高速回転時には転倒のリスクが高くなる. また、蛇行移動モードから車輪移動モードへ変形した直後は走行速度が $V = 0$ となるため、静止時にも姿勢を保つ必要がある. そこで、適切なフィードバックによる安定化トルクを付加して、安定に走行させることを考える.

図 3(b)のステアリング部とボディ部の接続部分がステア軸およびロール軸として可動する. 車輪移動モードでの姿勢を表す量として、図 4 に示すようにステア角 θ_{st} 、ロール角 θ_{ro} 、ねじれ角 θ_{tw} を定義

表 2 走行速度に対するフィードバックゲインの設定値

	0 m/s	0.5 m/s	2.0 m/s
K_{Bro}^P [Nm/rad]	-20	-13	-1.5
K_{Bro}^d [Nms]	-8	-5	-0.01
K_{Bro}^i [Nm/s]	-3	-2	-1
K_{Btw}^P [Nm/rad]	-13	-12	-1.2
K_{Btw}^d [Nms]	-2	-0.2	-0.01
K_{Btw}^i [Nm/s]	3	3	3
K_{Sro}^P [Nm/rad]	0	1	2
K_{Sro}^d [Nms]	0	-0.5	-0.01
K_{Sro}^i [Nm/s]	0	0	1
K_{Stw}^P [Nm/rad]	-2	-4	-0.9
K_{Stw}^d [Nms]	-0.2	-0.02	-0.015
K_{Stw}^i [Nm/s]	-3	-0.5	-1

する.

ステアリング部を操作するトルクは、ステアリングの物体座標系に対してZ軸周りのトルクとなり、ボディ部を操作するトルクは、ボディの物体座標系に対してX軸周りのトルクとなる.

$$\begin{aligned} \mathbf{n}'_{BX} = & K_{Bro}^P \theta_{ro} + K_{Bro}^d \omega_{ro} + K_{Bro}^i \int \theta_{ro} dt \quad (3) \\ & + K_{Btw}^P \theta_{tw} + K_{Btw}^d \omega_{tw} + K_{Btw}^i \int \theta_{tw} dt, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{n}'_{SZ} = & K_{Sro}^P \theta_{ro} + K_{Sro}^d \omega_{ro} + K_{Sro}^i \int \theta_{ro} dt \quad (4) \\ & + K_{Stw}^P \theta_{st} + K_{Stw}^d \omega_{st} + K_{Stw}^i \int \theta_{st} dt. \end{aligned}$$

各制御ゲインは、各走行速度 V に応じて、表 2 のように転倒しない値を試行錯誤で決定した.

3. 2 静止安定性の評価

静止した状態 ($V = 0$) の車輪移動モードのへび型ロボットに対して、初期ロール角を与えた場合に、式(3)および(4)のフィードバックにより直立した状態に収束するかどうかを検証した.

図 5(a)は、フィードバック制御がない場合、図 5(b)は、フィードバック制御がある場合の、ロール角 θ_{ro} 、ステア角 θ_{st} 、およびねじれ角 θ_{tw} の時刻歴を示している.

図 5(a)のように、制御がない場合はロール角の時刻歴から転倒していることが分かるが、ロール軸の

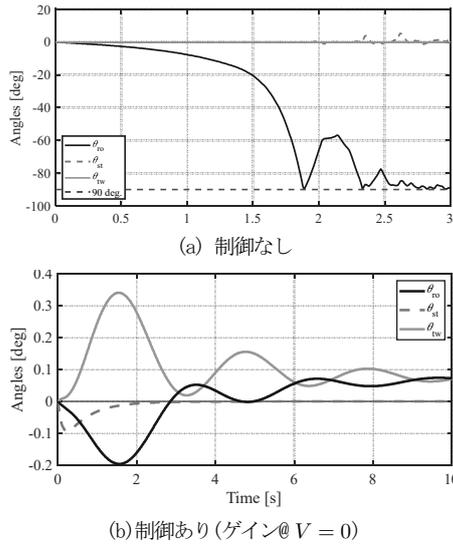


図 5 静止時の安定性の評価

制御入力を追加することで、図 5(b)のように転倒を回避できていることが分かる。ただし、図 3(b)のように前後輪に左右に重心の偏りが存在するため、定常偏差が生じている。

3.3 走行安定性の評価

各走行速度の状態の車輪移動モードのヘビ型ロボットに対して、フィードバックにより直立した状態に収束するかどうかを検証した。

図 6(a) および (b) は、それぞれ走行速度 $V = 2.0, 0.5$ m/s の条件で、表 2 の $V = 2.0$ m/s のゲイン値を用いた場合の角度の時刻歴を表している。 $V = 2.0$ m/s で姿勢を安定化可能なフィードバックゲインを用いた場合でも、図 6(b)のように低速走行時 $V = 0.5$ m/s の場合に不安定化することが分かる。また、表 2 のように低速域でボディ部を操作するトルク n'_{BX} の比例ゲインを大きくすることで、図 6(c)のように安定化を実現できることを確認した。

また、角度の時刻歴は収束後も振動しているが、これは前後輪が偏心しているためであり、タイヤ半径を R としたとき $V/2\pi R$ の振動数を持つ。しかしながら、安定した走行に支障がないことを確認した。

4. 実験モデルの設計・製作

4.1 機構の詳細設計

2章で走行安定性の評価を行った基本設計を基に、胴体を構成する多リンク機構、及びタイヤ形状のリ

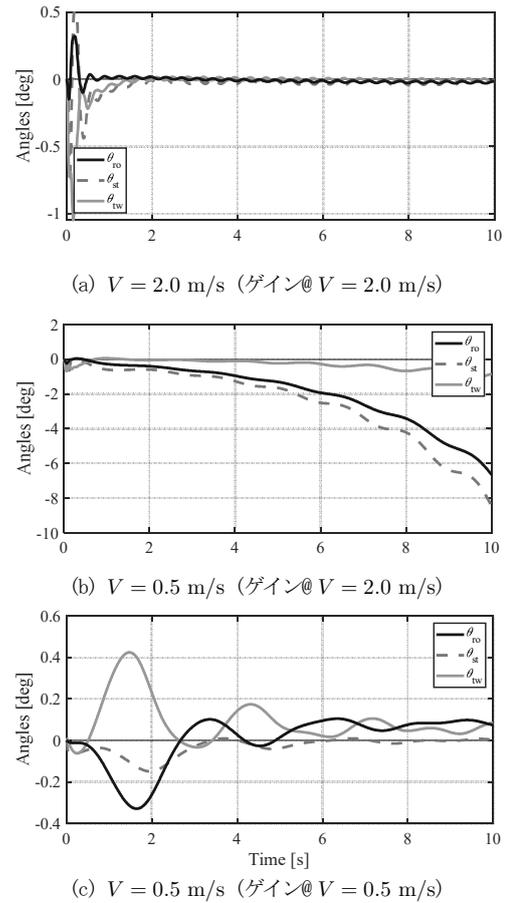


図 6 走行安定性の評価

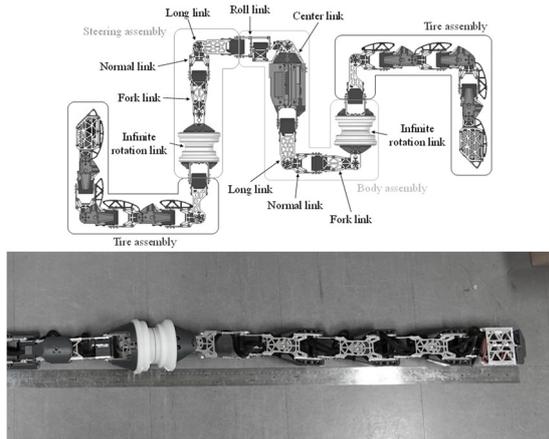
ンクを回転させる無限回転軸の詳細設計を行った。

4.1.1 タイヤ形状に変形可能なリンクの設計・製作

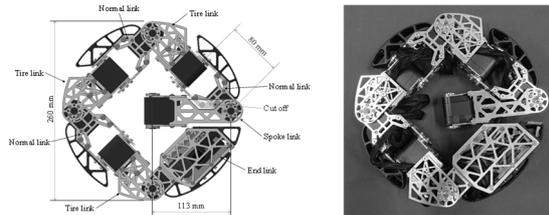
リンク機構の構成図および製作後の実験モデルを図 7 に示す。ヘビ型ロボットは軸が直交するリンク機構で構成されており、図 7(a) に示されるように、無限回転軸で分割された、前輪構成部分・胴体部分・後輪構成部分の 3 つの部分から構成される。

タイヤ形状へ変形後のリンク機構の構成を図 7(b) に示す。変形後は、直径 260mm の円形形状となる。回転軸近傍の関節内のサーボモータに最大の負荷トルクが作用することになるため、静荷重に対応できるサーボモータとして、B3M-SC-1170-A (Kondo Kagaku, Japan) を選定した。防水性および耐衝撃性を実現させるため、駆動時にはアメゴム&ナイロン製の防水カバーをかぶせて運用する。

4.1.2 無限回転軸の設計・製作



(a) タイヤ形状変形前のリンク機構の構成



(b) タイヤ形状変形後の構成

図 7 タイヤ形状に変形可能なリンク機構の実験モデル

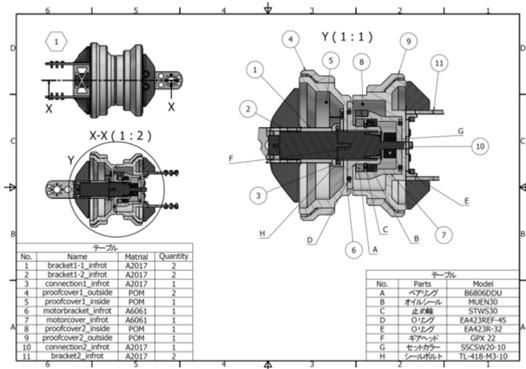
無限回転軸を図 8 に示す. 無限回転軸は, 蛇行移動モードではロール方向の相対角度が変化しないように位置制御として駆動し, 車輪移動モードでは一定の走行速度を実現するために角速度制御として駆動するサーボモータとして運用する必要がある. そこで, 最大トルクおよび最大回転数, およびサイズの制約条件を考慮し, エンコーダ付ギヤード DC モータ (DCX22L GB KL 12V & GPX22HP 16:1 & ENX16 EASY Absolute, Maxon, Swiss) を選定した. また, 防水を実現するために, オイルシールおよび O リングを内蔵している (図 8(a)).

強度が要求される内部の部品は A2017 および A6061 を用い, 外装は衝撃の吸収および軽量化のため, POM を用い製作した (図 8(b)).

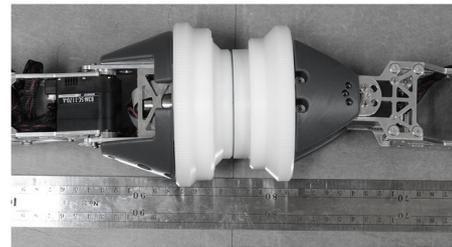
4.2 制御システムの設計

無限回転軸では配線のねじれが発生するため, 無限回転軸を挟んで配線を有線接続することは難しい. この問題を解決するため, 無線通信を用いて無限回転軸 前後のサーボモータの制御を行うことを考える.

図 9 は, 胴体部分と前後リンク機構の制御システム構成を示している. 胴体部分と前後リンク機構にそれぞれ, 制御用のマイクロコントローラ (LPC1768,



(a) 断面図



(b) 製作後の実験モデル

図 8 無限回転軸の断面図および実験モデル

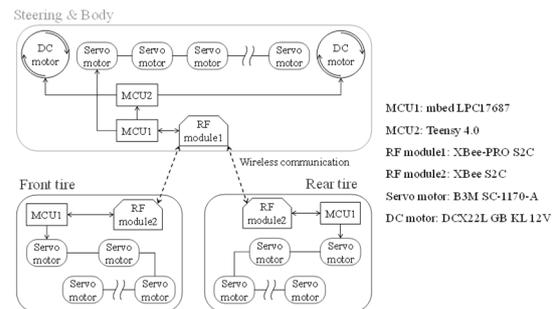


図 9 制御システムの構成

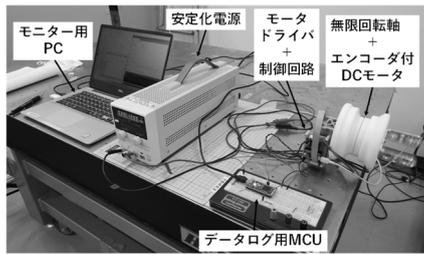
NXP, Netherlands) が配置されている. それぞれの部分で運動を同期させるため, RF モジュール (XBee-PRO S2C/ XBee S2C, Digi, USA) による無線通信を行う.

5. 実験モデルの動作検証

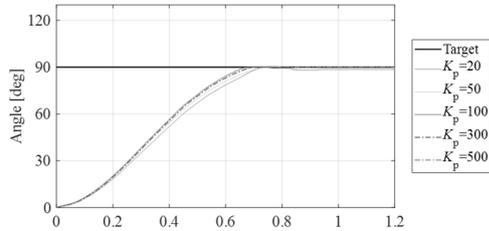
5.1 無限回転軸の駆動試験

無限回転軸の制御実験の機器構成および制御性能の評価の結果を図 10 に示す.

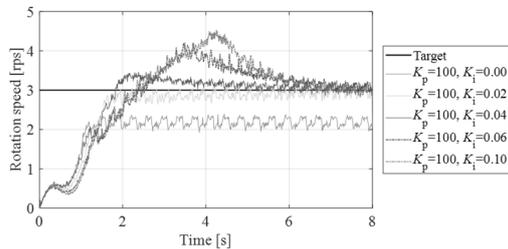
図 10(a) は, 制御実験の機器構成を示しており, PI 制御により無限回転軸内の DC モータが目標値に収束するように制御され, 角度および角速度の時刻歴は MCU ボード内の保存される. 図 10(b) および図 10(c) は, それぞれ無限回転軸の制御系の角度および角速度のステップ応答を示している. 適切にフィー



(a) 機器構成



(b) 位置制御の評価



(c) 角速度制御の評価

図 10 無限回転軸の制御実験の機器構成および評価

ドバックゲインを設定することで、目標値に収束することを確認した。

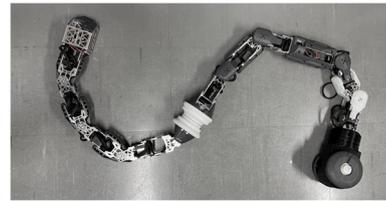
5.2 タイヤ移動モードへの変形動作試験

図 11 に、無限回転軸の動作確認用実験モデルを示す。無限回転軸の動作確認のため、タイヤを構成するリンク・無限回転軸・胴体リンクから成り、頭部に受動輪を備える。また、図 12 に、車輪移動モードへの変形動作のスナップショットを示す。無限回転軸を挟んだタイヤを構成するリンクと胴体リンクの間で無線通信を行い、車輪移動モードへの変形動作を同期して実現できることを確認した。

5.3 走行・操舵試験

図 13 に、車輪移動モードでの走行および操舵制御のスナップショットを示す。

角速度制御により、従来のヘビ型ロボットが用いる蛇行運動では実現困難な 0.5 m/s の走行速度を実現した。



(a) 蛇行移動モード



(b) 車輪移動モード

図 11 無限回転軸の動作確認用実験モデル

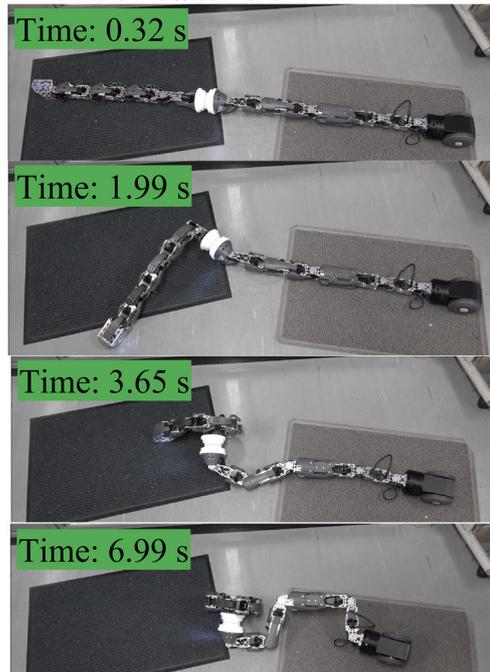


図 12 車輪移動モードへの変形動作



(a) 初期配置



(b) 車輪移動モード

図 13 走行・操舵試験 <https://youtu.be/ZqPs4-hxcnw>

6. まとめ

本研究では、車輪で移動することを選択できるような機構を持った索状ロボットを提案し、整地と不整地の間で適切な移動形態を選択することで走行速度および移動効率を改善する手法を提案した。まず、マルチボディ・ダイナミクスにより数値解析モデルを構築し、走行安定性および安定性を向上させる制御則の評価を行った。次に、実験モデルを設計・製作し、提案手法の実現性および有効性を評価した。

本研究で得られた結果を以下に示す。

1. フィードバック制御時の安定性の評価

- ねじれ角 θ_{tw} への安定化トルクを導入することで、静止時にも姿勢を安定化できる。
- 速度域に応じて適切なフィードバックゲインが異なる。低速域では、ボディ部を操作するトルク n'_{BX} の比例ゲインを大きくする必要がある。
- タイヤ重心の偏心の影響により、タイヤ半径を R としたとき $V/2\pi R$ の振動数を持つ振動が発生する。

2. 実験モデルによる提案手法の評価

- 無線通信により、車輪移動モードへの変形動作を実現できることを確認した。
- 蛇行運動では実現困難な 0.5 m/s 以上の走行速度を実現した。

口頭発表、受賞等

- [1] 今井 溪太, 山野 彰夫, 千葉 正克, 無限回転軸を有する索状移動探査ロボットの移動法に関する基礎検討, 日本機械学会, Dynamics & Design Conference 2020, 501, 堺市, 大阪。
- [2] 今井 溪太, 山野 彰夫, 千葉 正克, 無限回転軸を有する索状惑星探査ロボットの開発, 日本機械学会, Dynamics & Design Conference 2021, 506, 東京。
- [3] 今井 溪太, 山野 彰夫, 千葉 正克, 無限回転軸を有する索状惑星探査ロボットの開発, 日本機械学会, 関西支部第96期定時総会講演会, 20705, 2022, 豊中市, 大阪。

参考文献

- (1) F. Enner, D. Rollinson, and H. Choset, "Motion estimation of snake robots in straight pipes," 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2013, pp. 5168-5173.
- (2) N. Matsumoto, M. Tanaka, M. Nakajima, M. Fujita, and K. Tadakuma, "Development of a folding arm on an

- articulated mobile robot for plant disaster prevention," *Advanced Robotics*, Vol. 34, No. 2, 2020, pp. 89-103.
- (3) P. Liljebäck, C. Stavadahl, and A. Beitnes, "Snakefighter - development of a water hydraulic fire fighting snake robot," 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision, 2006.
- (4) E. Kelasidi, K. Pettersen, J. Gravdahl, S. Strømsøyen, and A. Sørensen, "Modeling and propulsion methods of underwater snake robots," 2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA), 2017.
- (5) X. Hou, Y. Shi, L. Li, Y. Tian, Y. Su, T. Ding, and Z. Deng, "Revealing the mechanical characteristics via kinematic wave model for snake-like robot executing exploration of lunar craters," *IEEE Access*, Vol. 8, 2020.
- (6) J. Gray, "The mechanism of locomotion in snakes," *Journal of Experimental Biology*, Vol. 23, No. 2, 1946, pp. 101-120.
- (7) S. Hirose, P. Cave, and C. Goulden, "Biologically Inspired Robots: Snakelike Locomotors and Manipulators, Oxford science publications," Oxford University Press, 1993.
- (8) M. Sato, M. Fukaya, and T. Iwasaki, "Serpentine locomotion with robotic snakes," *IEEE Control Systems Magazine*, Vol. 22, No. 1, 2002, pp. 64-81.
- (9) A. A. Transeth, R. I. Leine, C. Glocker, K. Y. Pettersen, and P. Liljebäck, "Snake robot obstacle-aided locomotion: Modeling, simulations, and experiments," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 1, 2008, pp. 88-104.
- (10) A. A. Transeth, R. I. Leine, C. Glocker, and K. Y. Pettersen, "3-d snake robot motion: Nonsmooth modeling, simulations, and experiments," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 24, No. 2, 2008, pp. 361-376.
- (11) M. Tesch, K. Lipkin, I. Brown, R. Hatton, A. Peck, J. Rembisz, and H. Choset, "Parameterized and scripted gaits for modular snake robots," *Advanced Robotics*, Vol. 23, No. 9, 2009, pp. 1131-1158.
- (12) R. Ariizumi, and F. Matsuno, "Dynamic analysis of three snake robot gaits," *IEEE Transactions on Robotics*, Vol. 33, No. 5, 2017, pp. 1075-1087.
- (13) A. Yamano, K. Shimizu, M. Chiba, and H. Ijima, "Fluid force identification acting on snake-like robots swimming in viscous fluids," *Journal of Fluids and Structures*, Vol. 106, 2021, pp. 1-18.
- (14) J. Špička, L. Hynčík, M. Hajžman, "Double pendulum contact problem," *Applied and Computational Mechanics*, Vol. 8, 2014, pp. 115-128.
- (15) J. Baumgarte, "Stabilization of Constraints and Integrals of Motion in Dynamical Systems," *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 1, 1972, pp. 1-16.