

課題番号	Q20T-01
課題名（和文）	摩擦特性を考慮した蠕動運動型ロボットの運動制御
課題名（英文）	Motion control of peristaltic mobile robot with considering friction property
研究代表者	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 未来科学部 ロボット・メカトロニクス学科 教授
	氏名 釜道 紀浩
共同研究者	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 氏名
	所属（学部、学科・学系・系列、職位） 氏名

研究成果の概要（和文）

ミミズの動作を規範にした蠕動運動型ロボットは、連なった体節ユニットの伸張・収縮動作を後方へ伝播させることで、路面との間に摩擦力を発生し、その摩擦力の合力を推進力として移動を実現している。蠕動運動は摩擦力を利用した移動様式であることから、路面との間に生じる摩擦力の変化によって運動特性が変動する。本研究では、路面環境の摩擦特性や負荷が変化する状況においても効率的に移動を実現するための方法を検証した。ロボットの運動状態を検出して、運動パターンを切り替えることで、滑りを抑制した適応的動作が実現可能であることを確認した。

研究成果の概要（英文）

A peristaltic mobile robot inspired from the motion of the earthworm can locomote by traveling expanding motions of segmented body units. The driving force of the peristaltic motion is generated by frictional forces acting between the ground and contact body segments. Therefore, the motion is affected by the friction characteristics and motion pattern of each segment. In this research, we aim to realize adaptive motion in response to changes of friction characteristics or external load. The adaptive motion with reducing the slippage was realized by detecting the robot's motion and switching the motion patterns.

1. 研究開始当初の背景

蠕動運動はミミズの移動や人間の消化管の動きに見られる運動である。筋肉の伸張・収縮動作を後方へ伝播させることで進行波を生成し、自身を移動させたり、物体を移動させたりすることができる。体の断面が入る隙間があれば動作できるため、とくに細い空間での移動に適している。ロボット開発において、生物の形態や機能を工学的に観察し、設計に取り入れるバイオロボティクスが注目されているが、ミミズの運動様式である蠕動運動を利用した移動ロボットも、配管内や狭い空間内の点検、探索などへの適用を目指して研究・開発が行われている。

蠕動運動は環境との間に発生する摩擦力を利用した移動様式である。環境との間に生じる摩擦力は、摩擦係数の変化などの路面状況や、ロボットの質量分布、運動パターンによっても変化する。そのため、それら要因によってロボットの移動量や移動効率が大きく変化する。これまでに行ってきた数値解析や実験により、摩擦が減少する状況や、物体を押したり牽引したりするなどの外力が加わる状況では、動作パターンしだいで路面との間に滑りが発生し、移動量や移動効率の低下を招くことが明らかになっている。

先行研究で実現されている蠕動運動ロボットの実機システムは、多くの場合一定の動きを繰り返すのみであり、不整地や細い配管内を運動する際に、理論通りの移動を実現できていない。とくに探索や検査のための自律ロボットとして利用するためには、限られたエネルギー源で長時間稼働できることが望ましく、滑ることなく滑らかに推進することが求められる。エネルギー効率に優れた移動を実現するためには、路面環境の変化や外部からの負荷の有無に応じて、運動パターンを切り替え、速度低下することなく前進するように制御することが重要である。

2. 研究の目的

本研究では、上記背景のもと、路面環境の摩擦特性や負荷が変化する状況において、蠕動運動ロボットを効率的に移動させる運動制御の実現を目的とす

る。これまでの研究において構築してきたモデリング方法と運動パターン生成法、およびセンサ情報に基づく制御法を組み合わせ、運動制御法を構築し、実験により有用性を検証する。

3. 研究の方法

(1) 実機開発

路面状況に応じて動作パターンを変化させることを想定し、各体節ユニットを個別に制御できる実機システムを設計・製作する。RC サーボモータを搭載したユニットが、ラック&ピニオン機構でフレキラック上を移動する構造を採用する。

(2) 計測系構築

ロボットに搭載したセンサにより、ロボットの推進状態、とくに滑りの有無を検出する。具体的には、ロボットの先頭ユニットに設置した加速度センサ（KXSD9-2050）を用いる。フィルタリングした加速度信号を数値積分して移動量を算出し、動作制御に用いる。

(3) 運動制御

後方の体節に生じる摩擦力に比べて、前方の体節に生じる摩擦力が小さい場合、すなわち、滑りやすい環境に進入した場合は、滑りが大きくなり移動量の低下が顕著になる。本研究では、理想的な一定の摩擦環境と滑りが生じやすい不均一な摩擦環境それぞれに対して適した入力パターンをあらかじめ設定し、計測系により検出した移動量から滑りの有無を検出し、動作パターンを切り替える。

まず、あらかじめ同定した摩擦モデルを用いて、それぞれの条件下で動作パターンを生成する。動作パターン生成には、各体節の伸長速度を入力とする動力学モデルと、メタヒューリスティック最適化方法の一つである Particle Swarm Optimization (PSO) アルゴリズムを用いる。具体的には、まず入力パターンをベジエ曲線で定義し、最適化のための評価関数を1周期あたりの移動量とする。そして、各体節の伸長量の上限を設定し、評価関数を最大化する曲線のパラメータを探索することで、入力パターンを生成する。

動作切り替えには、算出した入力周期ごとの移動距離を用いる。滑りが発生しないときの平均移動距離の半分を閾値に設定し、閾値以下になったときに低摩擦条件で導出した滑りを抑制する入力パターンに切り替える。また、滑りが回避されたときには、高摩擦条件で導出した通常の動作パターンに切り替える。

4. 研究成果

本研究で設計・製作した蠕動運動ロボットを図 1 に示す。先頭ユニットに搭載した加速度センサを用いて、動作状態を観測し、運動パターンの切替制御を行う。

動力学モデルと数値最適化法によって導出した動作パターンを図 2、3 に示す。理想条件である均一な摩擦環境と、滑りやすい条件である前方が低摩擦の環境でそれぞれ入力パターンを生成した。

実機検証では初期位置を高摩擦領域（マット）とし、50 mm 先の地点で低摩擦領域（紙）に切り替わり、再度 300 mm 先の地点で高摩擦領域（マット）に切り替わる環境を設定した。

図 4 に実験結果を示す。図 4(a)が周期的入力パターンを与え場合の結果であり、図 4(b)が提案方法で生成した入力パターンをセンサ情報に基づいて切り替えた結果である。周期的入力パターンの場合は、高摩擦と低摩擦の両領域にまたがっているときに、滑りが生じて大幅に時間が経過していることがわかる。一方、センサ情報に基づき入力パターンを切り替えた図 4(b)の場合は、一時的に移動速度が低下するものの、滑りを回避していることがわかる。

これらの結果から、摩擦環境に応じて入力パターンを切り替えることで、蠕動運動型ロボットの移動距離向上が実現できることが確認できた。

5. 主な発表論文等

〔学会発表〕（計 2 件）

- ① 杉山翼, 釜道紀浩, 「路面環境に適応した蠕動運動型ロボットの運動制御」, 日本機械学会ロボット・メカトロニクス講演会, 2P1-E08,

2021.6.8

- ② 秋葉智貴, 釜道紀浩, 「数値最適化による蠕動運動型ロボットの方向転換動作生成」, 日本機械学会ロボット・メカトロニクス講演会, 2A1-I17,

2021.6.8

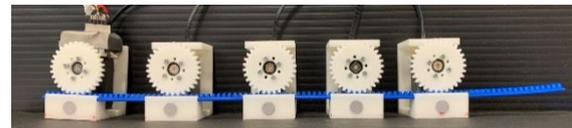


図 1 蠕動運動ロボット

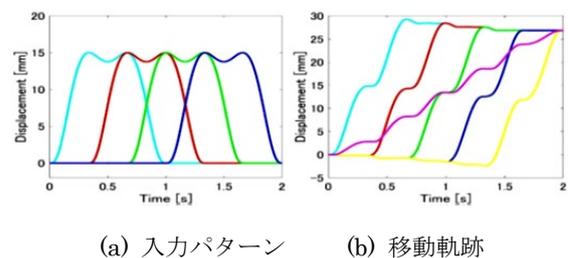


図 2 入力パターンの生成結果（均一な摩擦環境）

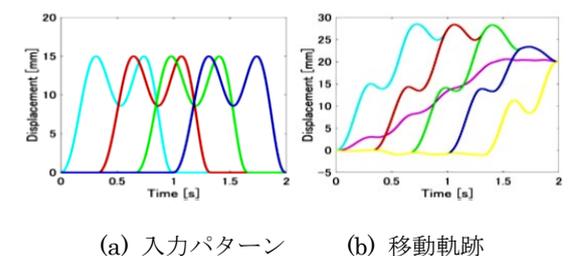
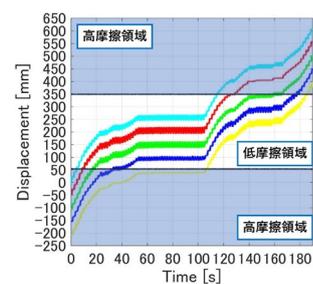
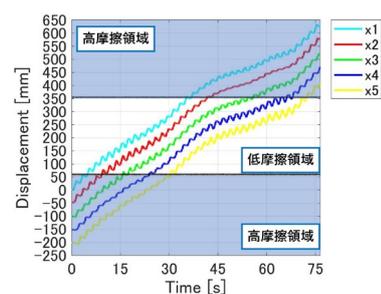


図 3 入力パターンの生成結果（前方低摩擦）



(a) 入力パターン一定の場合



(b) 動作パターン切替制御適用の場合

図 4 蠕動運動ロボットの実験結果