

## 蠕動運動型移動ロボットの開発

増淵維摩\*<sup>1</sup> 關根正裕\*<sup>2</sup> 栗原英紀\*<sup>3</sup> 半田隆志\*<sup>3</sup>

## Development of Peristaltic Mobile Robot

MASUBUCHI Yuma \*<sup>1</sup>, SEKINE Masahiro\*<sup>2</sup>, KURIHARA Hideki \*<sup>3</sup>,  
HANDA Takashi\*<sup>3</sup>

抄録

ミミズは蠕動運動により移動を行う生物である。本研究では、起伏のある環境や狭い空間を移動可能なロボットの実現を目指し、ミミズの運動を模した蠕動運動型移動ロボットの開発を行うことを目的とした。ミミズの運動を模した蠕動運動型移動ロボットを開発するにあたり、シミュレーション環境を構築し、ロボット本体の移動について評価を行った。また、ロボットの各体節の膨張・収縮のモデル化を行い、既存のモデルの組み合わせシミュレーション上にて体節膨張による評価を行った。また、ロボットの移動速度向上を今後実施していく。

キーワード：移動ロボット、生物模倣、蠕動運動

## 1 はじめに

ミミズは蠕動運動により移動を行う生物である。多数の体節を持ち、体節の伸長・収縮動作を先頭から後方へ伝播させることで、環境との摩擦力を利用して運動を実現している。本研究では、起伏のある環境や狭い空間を移動可能なロボットの実現を目指し、ミミズの運動を模した蠕動運動型移動ロボットの開発を行うことを目的とした。効率的な移動を実現するため、動力学モデルを構築し、動力的解析を行った。

本研究では、体節が膨張・収縮する動作を考慮したモデルを構築し、既存のモデルと組み合わせ、シミュレーションによるロボットの移動について評価を行った。

## 2 ロボットのモデル化

本研究では、体節の長さ(質点間距離)を入力とする変位入力モデルを構築した。体節の膨張量に応じて、垂直抗力が変化すると仮定して、摩擦力を表現した。

## 2.1 モデリング

ミミズは複数の体節からなる構造をしている。それらを複数の質点が直列の連結したものを捉え、モデル化する。図1に示す5体節5質点のモデルを提案する。

各質点の質量を $m_1 \sim m_5$ 、各質点の位置を $x_1 \sim x_5$ 、各体節の長さを $u_1 \sim u_5$ 、各質点と接地面との摩擦力を $F_1 \sim F_5$ 、各体節の接地面に対する垂直抗力を $N_1 \sim N_5$ とした。

図1より、各質点の力のつり合いを考えると、ロボット本体の運動方程式は、

$$(\sum_{i=1}^N m_i) \ddot{x}_g = -\sum_{i=1}^N F_i \quad (1)$$

\*<sup>1</sup> 事業化支援室 製品開発支援担当\*<sup>2</sup> 事業化支援室 (現 技術支援室)\*<sup>3</sup> 技術支援室 戦略プロジェクト推進担当

と導出された。  $x_g$  はロボット本体の重心の位置であり、蠕動運動ロボットの各質点に働く摩擦力の総和がロボット本体の重心の加速度を生み出していることになる。ロボット本体の重心、各質点の変位、各質点の位置の関係は図1で表現した。本研究では、静止摩擦と動摩擦を連続的に表現可能であるLuGreモデル<sup>(2)</sup>を適用した。

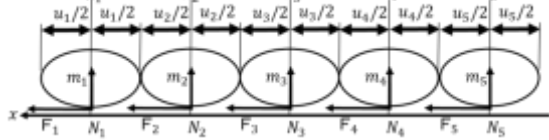


図1 蠕動運動型ロボットのモデル

### 2.3 体節膨張を考慮した体節のモデル

本研究では、体節の伸縮に応じて、体節の太さが変化することを想定した。体節表面の長さを変化せず、円弧形状に変形するものとした。

図2に体節の形状のモデルを示す<sup>(2)</sup>。体節の最大伸長時における長さを  $l_0$ 、その時の直径を  $d_0$  とした。また、体節伸縮時の体節の長さを  $l$ 、収縮量  $u$ 、体節の直径を  $d_m$  とした。膨張量 (半径差)  $d_{m2}$  は、

$$d_{m2}(u) = \frac{(l_0 - u)}{2} \tan \frac{\varphi_0}{2} \quad (2)$$

と表現した。ただし、角度  $\varphi_0$  は各体節の変位  $u$  を用いて、

$$\varphi_0(u) = \frac{2 \cdot \alpha \cdot l_0^{1.5} \cdot u^{0.5}}{(l_0 - u)^2 + a^2 \cdot u \cdot l_0} \quad (3)$$

と与えた。

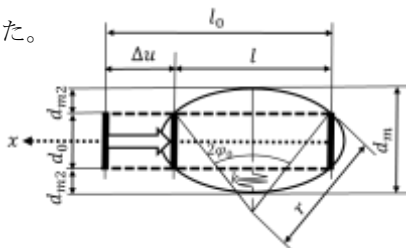


図2 各体節の膨張モデル

接触面に対し質点に垂直抗力が発生するが、他の質点の膨張・収縮により垂直抗力が変動する。他の質点と垂直抗力の関係モデルを図3に示した。

各質点に係る垂直抗力  $N_i$  は縦方向への変位  $d_{m2}$  とバネ定数  $k$  を用いて、

$$N_i = m_i \cdot g + g \cdot \left( k \cdot d_{m2i} - \frac{(\sum (k \cdot d_{m2i}) - k \cdot d_{m2i})}{N-1} \right) \quad (4)$$

と与えた。

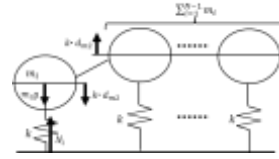


図3 各質点に発生する垂直抗力のモデル

## 3 結果及び考察

### 3.1 ロボットの動作シミュレーション

体節の膨張が無による動作の違いを数値シミュレーションにより検証した。収縮・伸長動作を後方へ伝播させる蠕動運動の動作パターンを与えるため、以下の式で表わす変位入力を与えた。

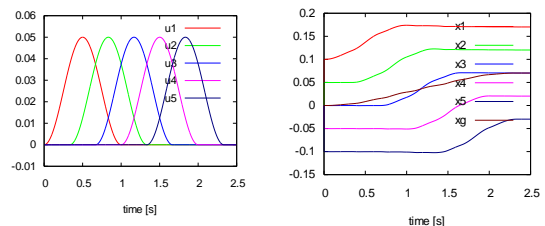
$$\Delta u_i = \begin{cases} \frac{A}{2} - \frac{A}{2} \cos(\omega t - i\theta) & \frac{i\theta}{\omega} \leq t \leq \frac{i\theta + 2\pi}{\omega} \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (5)$$

$$u_i = u_0 + \Delta u_i$$

ただし、 $A$  は体節の変位振幅、 $\omega$  は角周波数、 $\theta$  は体節間の位相差、 $i$  は先頭からの体節番号 (0~5)、 $u_0$  は体節の基本長である。

シミュレーション時の位置制御に用いたパラメータは、 $l_s = 1.22 \times 10^{-2} \text{ m}$ 、 $l_c = 6.6 \times 10^{-4} \text{ m}$ 、 $\sigma_2 = 0.2$ 、 $v_s = 0.2 \text{ m/s}$ 、 $\mu = 0.5$ 、 $A = 0.05 \text{ m}$ 、 $\omega = 2\pi \text{ rad/s}$ 、 $\theta = 2\pi/3 \text{ rad}$ 、 $m = 8.7 \times 10^{-1} \text{ kg}$ 、 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ 、 $N = 5$ 、 $l_0 = 0.1 \text{ m}$ 、 $d_0 = 0.03 \text{ m}$ 、 $k = 20 \text{ kg/m}$ 、 $u_0 = 0.05 \text{ m}$  とした。

図4に体節の膨張がなく、一定の摩擦条件の場合の結果を示した。(a)に位置制御パターン、(b)に各体節と重心の位置変化を示した。動作状態と停止状態を繰り返しながら、徐々に前進していることが確認できる。1サイクルの動作で  $0.068 \text{ m}$  前進した。



(a) 位置制御  $u_i$  (b) 動作パターン

図4 位置制御とロボットの動作パターン

### 3.2 アクチュエータの選定

蠕動運動型移動ロボットの動作速度、動作軌跡は直動型のアクチュエータの性能に依存する。本研究では、想定するアクチュエータと制御信号について、それぞれ位置制御時のロボットの動作速度のシミュレーションにて比較を行った。

想定するアクチュエータとして、図5に示す回転式のステッピングモータを用いて、図6に示すスライダクランク機構で直動動作させることを想定する。本アクチュエータのパラメータとロボットの動作結果を表1に示す。



図5 ステッピングモータ SPG-332

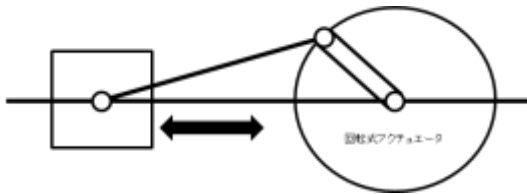


図6 スライダクランク機構

表1 位置制御の入力パラメータ

変位量 A [m]	変位速度 $\dot{u}_i$ [m/s]	位相 $\theta$ [rad]	ロボットの 速度[m/s]
0.04	0.04	$2\pi/3$	0.0097
0.04	0.04	$3\pi/4$	0.0085
0.04	0.08	$2\pi/3$	0.0194
0.04	0.08	$3\pi/4$	0.0170
0.02	0.04	$2\pi/3$	0.0062
0.02	0.04	$3\pi/4$	0.0025
0.02	0.08	$2\pi/3$	0.0124
0.02	0.08	$3\pi/4$	0.0050

### 3.3 膨張モデルの結合

既存のモデルに2.3に示した各体節が移動方向とは垂直に膨張・収縮した際の動作モデルについて、ロボットの動作シミュレーションを行った。

図7に体節の膨張を考慮した場合の結果を示す。(a)に入力パターン、(b)に各体節と重心の位置変化、(c)に体節の直径(膨張量)、(d)に垂直抗力変化を示す。入力パターンは図4(a)と同じである。

各体節の伸長量に応じて、各体節の膨張量が変化した。また、各体節の膨張・収縮に応じて接触面で発生する垂直抗力も変化していることがわかる。動作の様子は、膨張を考慮しない場合と比べて大きな差はないが、1サイクルの前進距離は0.071mとなり、増加した。摩擦特性の変化により、膨張している体節の摩擦力が大きくなり、すべりによる後退量が減少したためであると考えられた。

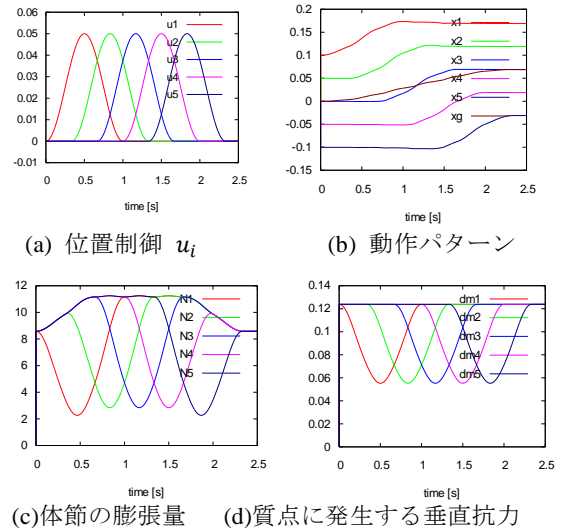


図7 体節膨張時のロボットの動作

## 4 まとめ

本研究では、蠕動運動型ロボットにおいて体節膨張の効果を数学モデルの構築を行い、数値シミュレーションにて検証を行った。体節の膨張・収縮により摩擦力が変化し、速度が向上することを確認した。

今後は実験での検証を行い、モデルの有効性を検証するとともに、効率的に移動可能なロボットおよびその動作制御について検討を進める。

謝 辞

本研究を進めるに当たり、客員研究員として御指導いただきました東京電機大学の釜道紀浩准教授に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) K. J. Astom, "Revisit the LuGre Friction Model," IEEE control systems magazine, pp.101-114, 2008
- 2) T. Nakamura and H. Shinohara, "Position and Force Control Based on Mathematical Models of Pneumatic Artificial Muscles Reinforced by Straight Glass Fibers," Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 4361-4366, 2007