

# チンアナゴを参考とした土中推進を行う索状移動体 —第1報：土中推進の基本原則—

## Burrowing Cord Robot Inspired by Spotted Garden Eel -1st Report: Basic Principle of Burrowing Locomotion-

渡辺 祥広 (東工大)    ○学 楯 貴志 (東工大)  
正 塚越 秀行 (東工大)

Yoshihiro WATANABE, Tokyo Institute of Technology  
Takayuki TATE, Tokyo Institute of Technology, t.tate@cm.ctrl.titech.ac.jp  
Hideyuki TSUKAGOSHI, Tokyo Institute of Technology

In this study, we propose a smooth propulsion method for cord robot to move underground. Inspired by the motion of spotted garden eel from the family of *congridae*, we focused on the propulsion method to generate propulsion force in whole body by actively undulate the body, carry out the research of the basic movement principle. We made an observation of moving eels in granular medium and analyzed the motion of the eels. As a result, the tip undulated at high frequencies, while the body moved through the same trajectory. Joint driving device was made to make an experiment in the granular medium. We proposed a hybrid undulate motion inspired by the eel which can move faster under the granular than the snake's motion. This motion is a combination of snake's sinusoidal motion and high frequency motion of the tip.

**Key Words:** Biomimetic, Burrowing, Propulsion

### 1. 緒言

土砂災害における救助作業や土中の環境観測作業などにおいて、土中を効率よく推進して情報収集を行える装置の需要が高まりつつある。土・砂・泥などの粒子や流体で満たされた閉塞空間を自由に移動する装置として、これまでに、スクリュを用いる方式や流体を噴射する方式[1, 2]、蠕動運動により推進する方式[3]、アームを用いてかき分ける方式[4]などが提案されてきた。しかしながら、これらの方式では探査機に接続されている通信・エネルギー供給用のケーブルが土中では摩擦抵抗となるため、方向操舵や深部への移動が妨げられる問題がみられた。

この問題を解決する移動法として、ケーブル自体を能動的に蛇行させながら体幹全体で推進力を生成する方法に注目することにする。本研究では、海底の砂に穴を掘ることで知られているチンアナゴの動作を参考にし、索状体が粒子中で効率よく推進する動作方法の構築を目指している。

その第一段階として、本稿では砂中にスムーズに潜り込めるチンアナゴの動作を解析し、索状能動体が土中を推進するために望ましい動作について新たな提言を行う。

### 2. チンアナゴの動作解析

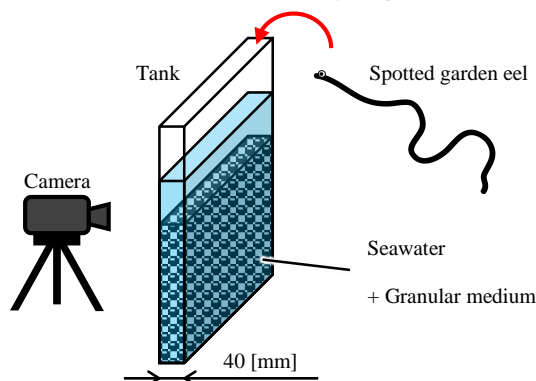


Fig. 1 Filming a spotted garden eel's motion

チンアナゴは直径約8[mm]、長さ約350[mm]のアナゴ科の海水魚で、尾から順に砂に潜って行くことが知られている。砂中の動作を可視化するため、図1のように幅の狭い水槽に砂の代わりに直径6[mm]の球形の吸水性ポリマー粒子を入れ、チンアナゴの推進動作を撮影した。

実験より、チンアナゴは進行方向に対して前から後ろに向かって横波を伝えながら推進していることが確認できた。図2は先端部と胴体部の斑点模様(全長の約1/2に位置する)の2箇所の移動軌跡を追跡したものである。青色で示される先端部は高周波数の積極的な動作をしているのに対し、赤色で示される胴体部は同じ軌道を通るような動作が見られ、先端部と胴体部で異なる蛇行動作をしていることが明らかになった。

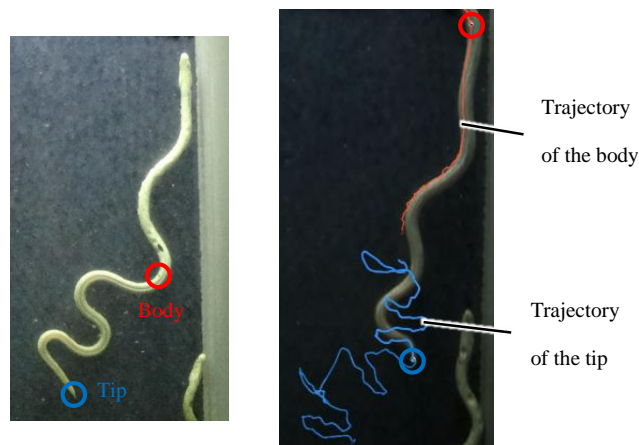


Fig. 2 Trajectory of spotted garden eel's body and tip

### 3. 多関節駆動装置による基礎実験

#### 3.1 構成

粒子中で移動実験を行うため、図3のようにリンクを直列に連結した多関節駆動装置を製作した。各関節に搭載したサーボモータにより屈曲する。今回の実験ではサーボモータを

10個使用した10関節モデルを使用する。水平方向への移動実験においては、リンクに取り付けた板のみが、図4のように粒子の中に埋没して動作するようにする。また鉛直方向への移動実験においては、板を取り外し、図5のように布製の防塵カバーで覆って装置全体を埋没させながら推進実験を行う。

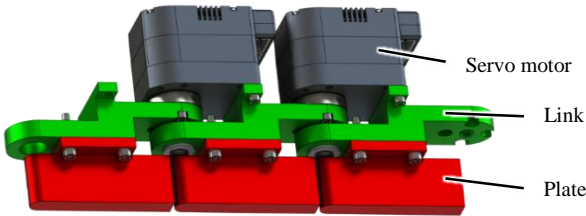


Fig. 3 Structure of the joint driving device

Table 1 Specification of joint driving device

Number of servo motors	10
Link length	57[mm]
Thickness of plate	8[mm]
Stall torque	4.6[Nm]



Fig. 4 Experiment of horizontal locomotion



Fig. 5 Joint driving device with cloth cover

### 3.2 ヘビ式動作の生成

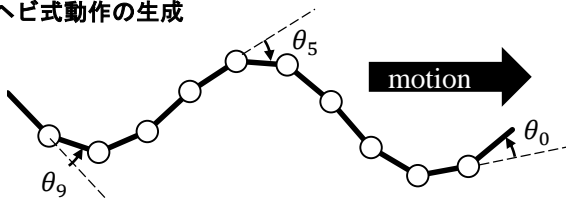


Fig. 6 Angle of the joints

はじめに、先端部も胴体部も同じ動作で、前から後ろに波を伝える動作で粒子中を移動できるのか実験を行った。このような蛇行動作は陸上を移動するヘビで知られており、単純な動作であることから多くの索状体でも導入されている。装置のサーボモータに番号を付け、先端を  $i = 0$  として順に割り振る。図6のように、 $i$  番目のサーボモータによる角度を  $\theta_i$  [rad] と表すとき、各関節の角度の指令値は、次式で与えることにする。

$$\theta_i = \theta \sin \left\{ 2\pi \left( \frac{n}{N+1} i - ft \right) \right\} \quad (1)$$

ただし、振幅  $\theta$  [rad] は最大屈曲角であり、 $n$  は波の数を表す波数、 $N$  は連結するモータの数、 $f$  [Hz] は蛇行周波数、 $t$  [s] は時間である。位相を進行方向の前から後ろに向かって進ませることにより波送りを実現する。

### 3.3 ヘビ式動作の限界

粒子としてポリプロピレン製のペレットを用いて水平方向への推進実験を行った。実験条件として、 $\theta = 30$  [deg],  $n = 1.3$  とし、周波数を変えながら平均前進速度を測定した。図7のように蛇行周波数に応じて推進速度も増加し、樹脂ビーズ中で推進できることを確認した。

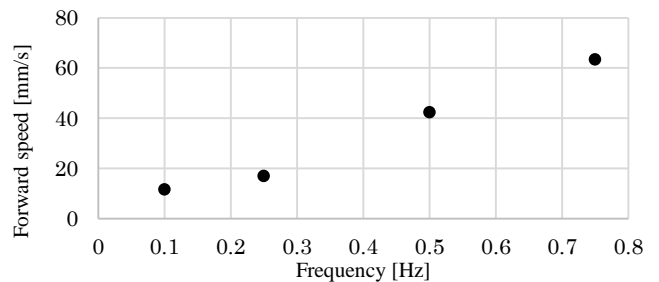


Fig. 7 Forward speed vs. frequency

次に、目指とする実環境に近い条件として、黒土を使って水平方向への推進実験を行った。黒土は樹脂ビーズよりも粒子を押しつけるのに必要な力が大きいため、先端節が土から受ける抵抗は大きくなる。図8は  $\theta = 45$  [deg],  $n = 1.3$ ,  $f = 0.4$  [Hz] で実験を行った様子である。ヘビ式移動では土中ではスタックし、継続して移動することが困難であった。



Fig. 8 Experiment in black soil

## 4. チンアナゴ式動作の提案

### 4.1 連結式

チンアナゴの実験より明らかになった先端部と胴体部の周波数の違いを参考に、連結式と重ねあわせ式の2種類の動作を考え、ヘビ式動作との比較実験を行った。

連結式は、先端部と胴体部の異なる動作をつなぐ手法であり、式(2)、(3)のように  $f_1 < f_2$  として与える。

$$\theta_i = \theta_1 \sin \left\{ 2\pi \left( \frac{n_1}{11} i - f_1 t \right) \right\} \quad (i = 6 \sim 9) \quad (2)$$

$$\theta_i = \theta_2 \sin \left\{ 2\pi \left( \frac{n_2}{11} i - f_2 t \right) \right\} \quad (i = 0 \sim 3) \quad (3)$$

先端部と胴体部の周波数が異なることにより波の位相がずれるため、連結部 ( $i = 4, 5$ ) のモータ角度を制御することでその差を吸収する。

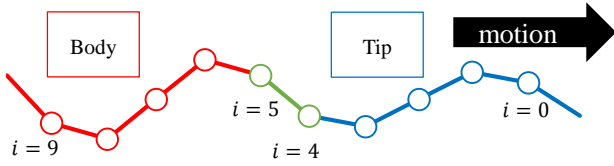


Fig. 9 Angle of the joints

#### 4.2 重ねあわせ式

重ねあわせ式は、へび式動作の先端部に高周波数の動作を重ね合わせる手法である。式(4), (5) のように、胴体部 ( $i = 5 \sim 9$ ) はへび式動作であり、先端部 ( $i = 0 \sim 4$ ) は胴体部の動作に別の高周波数の動作を重ね合わせる。

$$\theta_i = \theta_1 \sin \left\{ 2\pi \left( \frac{n_1}{11} i - f_1 t \right) \right\} \quad (i = 5 \sim 9) \quad (4)$$

$$\theta_i = \theta_1 \sin \left\{ 2\pi \left( \frac{n_1}{11} i - f_1 t \right) \right\} + \theta_2 \sin \left\{ 2\pi \left( \frac{n_2}{11} i - f_2 t \right) \right\} \quad (i = 0 \sim 4) \quad (5)$$

### 5. 実験と検証

#### 5.1 推進速度の比較実験

表 2 のような条件で水平方向への推進実験を行った。(1)は重ねあわせ式、(2) は連結式、(3) は胴体部の動作のへび式、(4) は先端部の動作のへび式であり、推進速度を比較した。図 10 に樹脂ビーズ、図 11 に土中における実験結果を示す。どちらの環境でも、(1)の重ねあわせ式が最も推進速度が大きい結果となった。特に土中においては、重ねあわせ式は先端部で削穿運動が見られ、先端部で土を押し進んでいくのに対し、へび式では土の抵抗により移動が妨げられていた。

Table 2 Experimental conditions

		Altitude $\theta [deg]$	Wave number $n$	Frequency $f [Hz]$
(1)	Tip	30	2.86	0.1
	Body	55	2.2	0.01
(2)	Tip	30	2.86	0.1
	Body	55	2.2	0.01
(3)		55	2.2	0.01
(4)		30	2.86	0.1

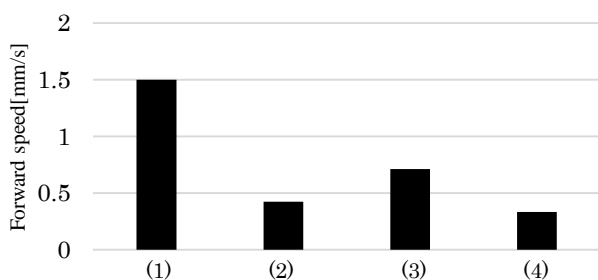


Fig. 10 Experimental result in plastic beads

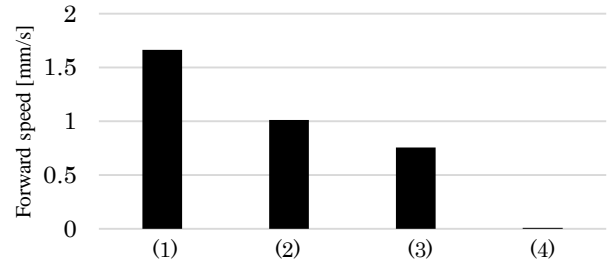


Fig. 11 Experimental result in black soil

#### 5.2 移動仕事率の比較

重ねあわせ式は推進速度が大きいですが、先端部を高周波数で動作させているため、消費するエネルギーが大きくなることが予想される。そこでサーボモータで消費される電力を測定し、移動仕事率を比較した。表 3 のように(1)重ねあわせ式、(2)へび式の胴体部動作、(3)へび式の先端部動作の条件で樹脂ビーズ中において消費電力と水平方向の移動速度を計測し、その結果を表 4 に示す。移動仕事率は式(6)のように、索状体の重量  $M = 2.5 [kg]$ 、重力加速度  $g$  を用いて計算し、その結果を図 12 に示す。重ねあわせ式は消費電力は大きくなるが、移動速度が十分大きいいため、移動仕事率は小さくなり、エネルギー的にも効率的であることが分かった。

$$\epsilon = \frac{P}{Mgv} \quad (6)$$

Table 3 Experimental conditions

		Altitude $\theta [deg]$	Wave number $n$	Frequency $f [Hz]$
(1)	Tip	20	2.86	0.5
	Body	30	2.2	0.2
(2)		30	2.2	0.2
(3)		20	2.86	0.5

Table 4 Experiment result

	Motor power consumption $P [W]$	Forward speed $v [mm/s]$
(1)	88.8	21.4
(2)	83.8	11.1
(3)	79.6	3.2

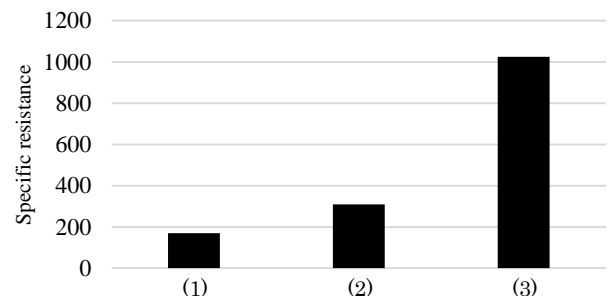


Fig. 12 Forward speed vs. number of motors of the tip

#### 5.3 先端部の個数を変えた実験

重ねあわせ式において、これまで式(5)で示される先端部の動作を行うモータの個数は 5 個であった。この先端部のモータの個数を変えたとき、推進速度がどのように変化するのか実験を行った。実験条件は 5.1 の(1)とし、樹脂ビーズ中に

おける水平方向の推進速度を測定した結果を図 13 に示す。先端部の個数が増加すると推進速度も増加していくが、6 個を過ぎてから推進速度が低下する現象がみられた。理由としては、先端部の個数を増やしすぎると、先端部の削穿運動の反力を胴体部で支えられずに後退してしまうため、推進速度が低下したと考えられる。

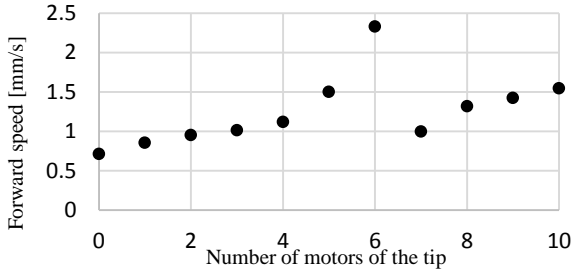


Fig. 13 Forward speed vs. number of motors of the tip

#### 5.4 振幅を変えた実験

振幅を変えて推進速度を比較する実験を行った。ヘビ式で実験を行ったが、重ねあわせ式の動作でも共通の傾向が見られると考えられる。蛇行周波数  $f = 0.25[Hz]$ 、波数  $n = 1.3$  が一定の条件で振幅を変えたときの前進速度を測定した結果を図 14 に示す。振幅を増加させていくと、前進速度も増加する結果となった。陸上を移動するヘビのように同じ軌道を通って移動する場合、一般的に振幅を大きくすると前進速度は減少する。そこで、図 15 のようにデジタルフォースゲージをある位置に固定し、押される力の最大値を測定した。その結果を図 16 に示す。振幅を大きくすると推進力も増加することが分かる。したがって、振幅を大きくすると粒子を押しつけるための推進力が増加し、推進速度が増加したと考えられる。

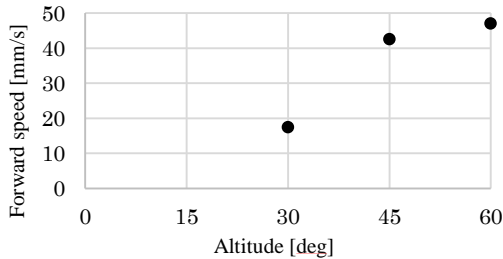


Fig. 14 Forward speed vs. altitude

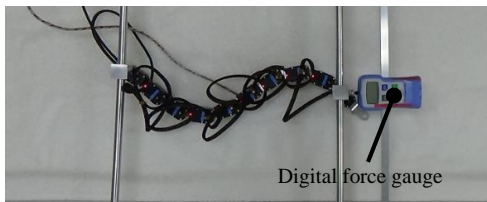


Fig. 15 Measurement of propulsion force

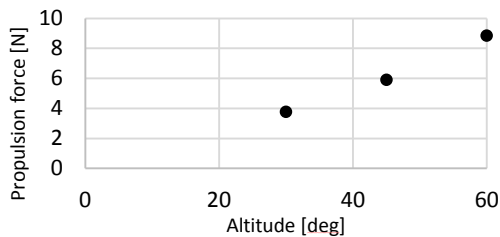


Fig. 16 Propulsion force vs. altitude

#### 5.4 鉛直方向への推進実験

樹脂ビーズ中における鉛直方向への推進実験を行った。表 5 のように(A)ヘビ式、(B)重ねあわせ式の動作で推進深さを比較した。3[min] 蛇行動作させたところ、図 17 のように(A)ヘビ式は 170[mm]、(B)重ねあわせ式は 280[mm]の深さまで到達した。したがって、重ねあわせ式は水平方向だけでなく、鉛直方向も効率的に推進することが確認できた。

Table 5 Experimental conditions

		Altitude $\theta[deg]$	Wave number $n$	Frequency $f[Hz]$
(A)		55	2.2	0.02
(B)	Tip	30	2.86	0.2
	Body	55	2.2	0.02

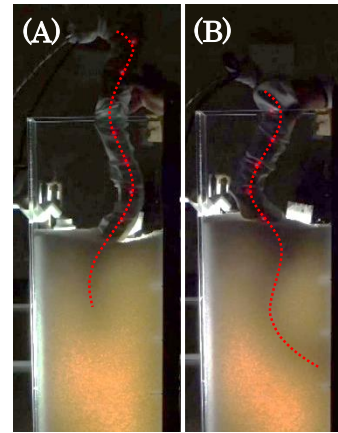


Fig. 17 Experiment of vertical locomotion

### 6. まとめ

索状能動体による土中の効率的な推進を目指して、チンアナゴの動作解析をもとに、全体の正弦波運動と先端部の高周波運動とを重ね合わせた新たな移動手法を提案した。また、提案手法の有効性を検証するため、多関節駆動装置を製作し、様々な環境において動作実験を行った。その結果、提案した重ねあわせ式は、先端部の高周波運動により削穿効果があると考えられ、土中を効率よく移動するうえで有効であることを確認した。今後は、提案した動作をスリムな構造で実現できる索状体の開発を行う予定である。

### 文献

- [1] 塚越秀行, 小山輝憲, 北川能, "人命探査を目指した土内推進ホースの開発(挿入抵抗軽減と方向操舵検討)", 日本機械学論文集(C編) 71巻, 704号, 1334-1341.
- [2] 塚越秀行, 宮本哲昌, 北川能, 木村哲也, "雪中・土中探査作業の効率向上を目指したジェット推進ボールの提案", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2005, 2A1-S-095.
- [3] 村上太郎, 大森隼人, 矢田剛之, 中村太郎, "蠕動運動機構を併用した月地中探査ロボットの掘削機構の検討", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会 2009, 1A2-F15.
- [4] 小林敬, 塚越秀行, 北川能, 駱均泰, "かき分け動作による土中推進探査機の開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会 2012, 2A2-005.
- [5] Ryan D. Maladen, Yang Ding, Paul B. Umbanhowar, Adam Kamor and Daniel I. Goldman: "Biophysically inspired development of a sand-swimming robot", Science & Systems (RSS) 2010.
- [6] 広瀬茂男, "生物機械工学 やわらかいロボットの基本原理と応用", 工業調査会.