

令和 4 年 5 月 31 日現在

機関番号：24403

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14699

研究課題名(和文) センチュウの環境適応性に基づいた推進体の制御手法の実験的検討

研究課題名(英文) Experimental study of control method of undulating robot based on environmental adaptability of nematode

研究代表者

山野 彰夫 (Yamano, Akio)

大阪府立大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：90844184

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：水中・潤滑油I・潤滑油IIの各粘性流体中で泳動実験を行い、推進体に作用する流体力を同定することで、実験結果を再現する数値解析モデルを構築した。次に、実験で用いた各粘性流体中において、各関節に位相をずらした正弦波トルクを入力する条件のもと、消費電力および推進速度を評価関数とするトレードオフ関係を算出した。うねり運動の波長において、流体の粘度が大きくなると泳動形態の波長が小さくなる傾向が確認された。流体の粘度に応じて適切な泳動形態を実現させる適応運動については、実験モデルにおいて運動の生成に成功しており、今後は、自励発振を用いた適応運動の制御パラメータの探索を試みる予定である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

泳動の最適化およびモデルベース制御において、計算コストの小さい数値解析モデルは有用である。提案手法は、計測された挙動より推進体に作用する流体力を同定するものであり、様々な粘性流体中を泳動する複雑な断面を有する推進体においても、数値解析モデルを構築することが容易になる。また、うねり運動により接線方向の抗力が増大する現象が実験的に確認できた。最適化計算では、流体の粘度の増加と共に位相差が増加する傾向が確認された。高粘性流体ではうねり泳動の波長の小さい方が推進効率が高いことを示しており、生物のセンチュウにおいても同様の運動が観察されている。適応運動の意義の解明の助けになると考えられる。

研究成果の概要(英文)：Numerical models were developed to reproduce the experimental results by conducting swimming experiments in water (1.31 mm s), lubricating oil I (2270 mm s), and oil II (3270 mm s) and by identifying the fluid forces acting on the swimming body. Next, we calculated the trade-off relationship between power consumption and swimming velocity as an evaluation function under the condition that a phase-shifted sinusoidal torque is input to each joint in each viscous fluid used in the experiments. The wavelength of the swimming motion tended to decrease as the viscosity of the fluid increased. The adaptive motion that realizes an appropriate swimming pattern according to the viscosity of the fluid has been successfully generated in an experimental model, and we plan to explore the control parameters of the adaptive motion using self-excited oscillation.

研究分野：機械力学

キーワード：バイオメティクス

### 1. 研究開始当初の背景

柔軟な推進体は複雑な形状の狭小空間の探査用途で運用できる。これまでの柔軟な推進体を用いる研究では、生物の運動パターンを模倣させることで運動の柔軟性を実現させようと試みられてきたが、これらは環境変動に対して積極的に運動の形態を調節しないものである。運動パターンが一定である場合、水道管のように流量が変動して泥水が存在する場合もある半水半陸環境の配管内推進では、推進効率が極端に低下する可能性がある。

一方でヒルおよびセンチウは、泥を模した粘度の高い流体中ではうねり運動の振動数とうねりの波長が水中の場合から減少することが報告されている (T. Iwasaki *et al.*, 2014), (J. Boyle *et al.*, 2012)。申請者は、生物の運動の模倣に加えて環境に応じて運動を適応させるメカニズムの導入により、水道管のように流体が存在し泥が堆積している半水半陸環境での推進性能を向上できると考える。

### 2. 研究の目的

佐藤らおよび Nachstedt らは、自励振動子からの出力で駆動されるヘビ型推進体において、各関節の局所フィードバックの導入により壁面形状に対して適応的な運動を実現させている (T. Sato *et al.*, 2006)(T. Nachstedt *et al.*, 2013)。このアプローチはヒルの適応運動の場合と同様に、うねり運動の振動数は神経振動子の発振振動数に対してあまり変化しないものである。また、局所フィードバックのみで発振させることにより環境適応性を向上させる試みがいくつか存在するが、水中から泥中までの幅広い環境で適応性を実現させた例はない。Nakazima らは魚ロボットにおいて、流体力をフィードバックさせることにより数値解析で流速の外乱に対しても安定した駆動を実現した(M. Nakazima *et al.*, 2003)。中島らはヘビ型ロボットにおいて、各体節セグメントにおける後部の関節角を前部の目標関節角へフィードバックするという制御則でうねり駆動を実現させた(中島他, 2016)。しかし、これらの研究は水中や陸上での駆動に限定されている。また、これらの制御手法は対象としている実際の生物の神経構造に直接基づいたものではない。

本研究は高い環境適応性を示すセンチウの神経モデル (Boyle *et al.*, 2012) に由来する分散制御則を構築し、実際の下水道管内を想定した水中から高粘性流体中での環境適応性を実現させることを目標とする。本研究の目的は、最適な適応運動を実現する推進体の関節の剛性・局所フィードバックの時間遅れの2つのパラメータの設計手法の確立である。

### 3. 研究の方法

消費電力と推進速度を評価項目とした場合、それぞれはトレードオフ関係にある。流体の各粘度におけるトレードオフ関係および最適なうねり運動を実験により同定するには、膨大な試行回数が必要となる。そこで、数値解析モデルによるシミュレーションにより粘度ごとに最適な運動を実現する入力トルクの波形の近似解を求める。

**[Step1] 数値解析モデルの構築:** 実験モデルと同様の運動を数値解析モデルで再現するためには、各流体の粘度に応じて実験モデルに作用する未知の流体力を同定する必要がある。流体には、安価で大量に入手可能で、10~1000cP まで粘度を設定できる潤滑油を選定する。泳動時の関節の位置座標およびリンク間相対角の時刻歴を基にして、未知の流体力を同定する (図 1)。

**[Step2] 粘度に応じた最適な駆動方法の探索:** バッテリー駆動の推進体において、消費電力の低減と推進速度の向上は重要である。この2つを評価関数として、同定した推進体の数値解析モデルを用いて、アクチュエータへの入力トルクの波形を正弦波と仮定して多目的最適化を行い、各流体の粘度に応じて消費電力と推進速度のトレードオフ関係を数値的に求める。

**[Step3] 粘度に応じた適応制御のパラメータの設計:** 申請者は、推進体の制御パラメータの関節剛性・時間遅れとうねり運動の波長・振動数の関係を明らかにした(山野他, 2018)。この関係を元にして、

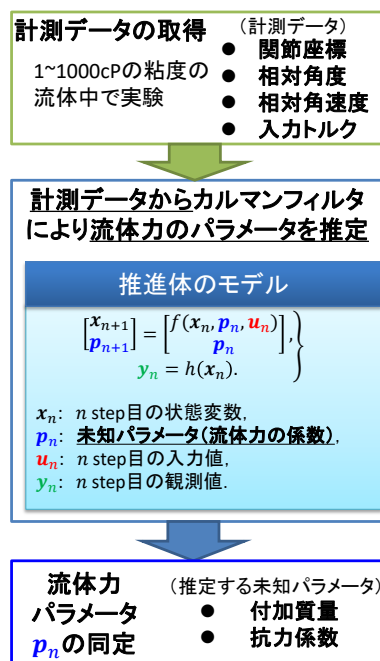


図 1 流体力の同定手順[Step1]。水中および切削油中で実験モデルを推進させ、関節の位置座標等の時刻歴を計測する。計測データから無香料カルマンフィルタにより未知の流体力を同定する。

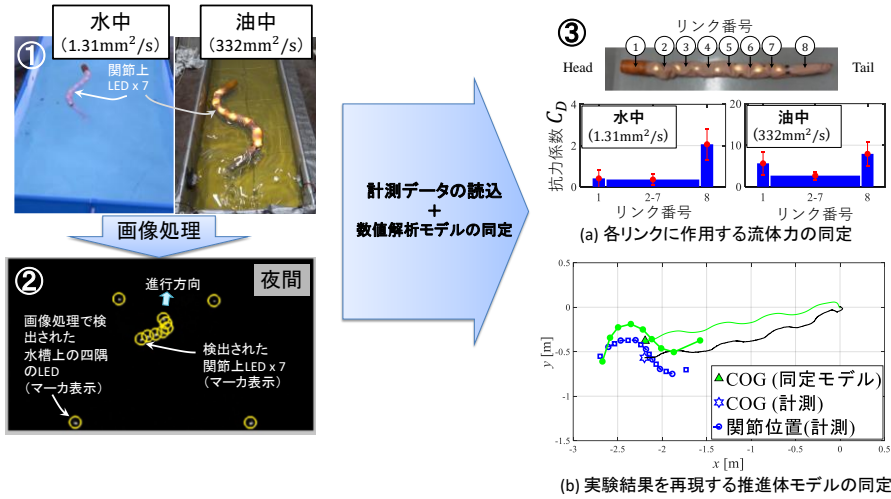


図 2 推進体モデルの同定手順. ①水槽内の流体中で泳動実験を行う. ②夜間に LED を発光させながら泳動実験を行うことで, 水槽四隅の LED の位置を基準にして関節の位置座標を取得. ③ UKF により未知の流体力と数値解析モデルを同定.

[Step2] で得られたトレードオフ関係から各粘度の流体で最適なうねり運動の波長・振動数を実現する推進体の制御パラメータを設計する.

#### 4. 研究成果

##### [Step1] 数値解析モデルの構築

申請者は, 上記の数値解析により得られた知見を実験で検証するために推進体の実験モデルを製作した(Yamano *et al.*, 2021). 実験モデルにおいて, 上記の適応制御則の制御パラメータを探索する必要がある. そこで, 様々な粘性流体の条件(動粘度: 1~2000 mm<sup>2</sup>/s)で実験モデルの挙動を再現する数値解析モデルを構築し, 計算機上で最適な制御パラメータの探索を行うことにした.

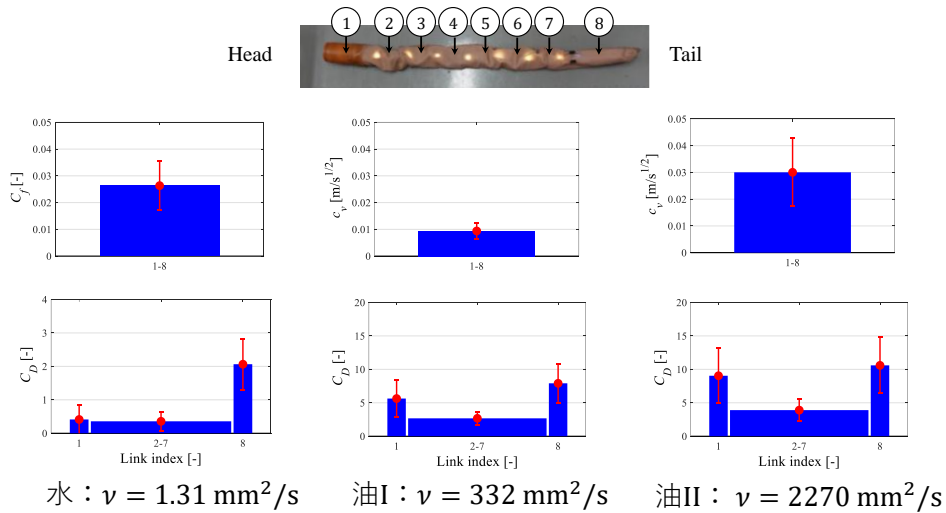
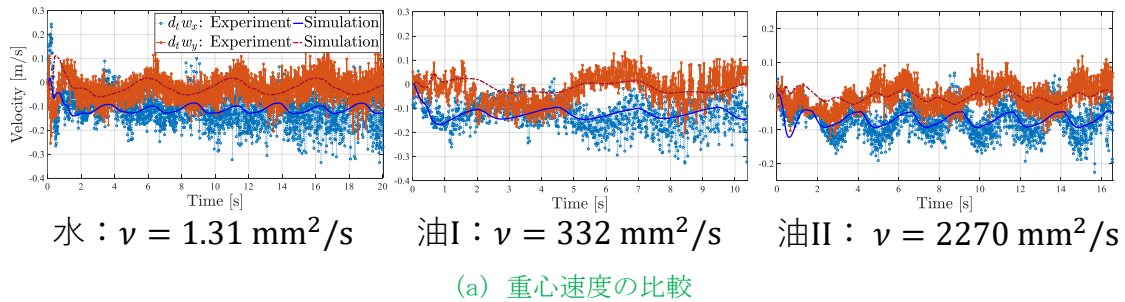


図 3 (a)各粘性流体での実験・同定モデルでの推進方向・うねり方向の重心速度( $\mathbf{d}_t \mathbf{w}_x, \mathbf{d}_t \mathbf{w}_y$ )の比較, および(b)泳動実験から同定された法線方向・接線方向の抗力係数( $C_D, C_F/c_v$ ).



性流体ではうねり泳動の波長の小さい方が推進効率が高いことを示しており、生物のセンチュウにおいても同様の運動が観察されている (Boyle *et al.*, 2012).

### [Step3] 粘度に応じた適応制御のパラメータの設計

申請者は、センチュウの局所フィードバックを模擬した適応運動の制御則を構築し、数値解析において、流体から受ける抗力の増加と共にうねり運動の波長・振動数を変化させることを実現した(山野他, 2018). ここで実験においては、アクチュエータへの負荷を減らすため、駆動トルクが正弦波に近くなるように、適応運動の制御則を修正した (図 5(a)).

提案された適応制御則の下で水・潤滑油中(1.31, 3270mm<sup>2</sup>/s @実験時水温)で泳動実験を行い得られた結果を図 5(b)(c)に示す. センチュウの適応運動の観測結果と同様に、流体の粘度の増加と共に振動数が減少し、うねり運動の位相差の増加を実現した. 現状では、振動数の変化の幅は0.05Hz程度であり波長の変化幅も小さいため、[Step2] で得られた最適解の運動を再現させるためには、局所フィードバック則の改良が必要になると思われる. また、適応運動の有無による推進効率の改善の評価も行う予定である.

---

### Ref.

- [1] T. Iwasakia *et al.*, Biological clockwork underlying adaptive rhythmic movements, PNAS, Vol. 111, No. 3–979, 2014.
- [2] J. Boyle *et al.*, Gait modulation in *C. elegans*: an integrated neuromechanical model, *Frontiers in Computational Neuroscience*, Vol.6, 2012.
- [3] T. Sato *et al.*, On the applicability of the decentralized control mechanism extracted from the true slime mold: a robotic case study with a serpentine robot, *Bioinsp. & Biomim.*, Vol. 6, No. 2, 2011.
- [4] T. Nachstedt *et al.*, Adaptive neural oscillators with synaptic plasticity for locomotion control of a snake-like robot with screw-drive mechanism, *Robotics and Automation (ICRA 2013)*, 2013.
- [5] M. Nakazima *et al.*, A study on the propulsive mechanism of a double jointed fish robot utilizing self-excitation control, *JSME International Journal Series C*, Vol. 46, No. 3, 2003.
- [6] 中嶋 大樹他, ヘビが示す多様なロコモーション様式の再現を目指した自律分散型ロボット, 日本ロボット学会誌, Vol. 34, No. 3, 2016.
- [7] 山野 彰夫他, 自励発振を用いた泳動推進体の適応制御に関する基礎検討, 日本機械学会論文集, 84 巻, 864 号 (2018), pp. 1-10.
- [8] A. Yamano *et al.*, Fluid force identification acting on snake-like robots swimming in viscous fluids, *J. Fluids & Structures*, Vol. 106, 2021.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 YAMANO Akio, IJIMA Hiroshi, SHINTANI Atsuhiko, NAKAGAWA Chihiro, ITO Tomohiro	4. 巻 8
2. 論文標題 Influence of the aspect ratio of the sheet for an electric generator utilizing the rotation of a flapping sheet	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mechanical Engineering Journal	6. 最初と最後の頁 1~15
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1299/mej.20-00459	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yamano A., Shintani A., Ito T., Nakagawa C., Ijima H.	4. 巻 478
2. 論文標題 Influence of boundary conditions on a flutter-mill	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Journal of Sound and Vibration	6. 最初と最後の頁 115359~115359
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jsv.2020.115359	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yamano A., Shimizu K., Chiba M., Ijima H.	4. 巻 106
2. 論文標題 Fluid force identification acting on snake-like robots swimming in viscous fluids	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Journal of Fluids and Structures	6. 最初と最後の頁 103351~103351
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.jfluidstructs.2021.103351	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 今井 深太, 山野 彰夫, 千葉 正克
2. 発表標題 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
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 山野 彰夫, 清水 康平, 千葉 正克
2. 発表標題 蛇型ロボットの泳動実験と数値解析モデルの構築の基礎検討
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics and Design Conference 2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 木元 剛士, 山野 彰夫, 千葉 正克
2. 発表標題 自励発振を用いた衛星探査用多リンク泳動推進体の適応制御に関する基礎検討
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会 2021年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 今井 深太, 山野 彰夫, 千葉 正克
2. 発表標題 無限回転軸を有する索状惑星探査ロボットの開発
3. 学会等名 日本機械学会 Dynamics & Design Conference 2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 井上 慶宣, 山野 彰夫, 千葉 正克
2. 発表標題 多目的最適化を利用した索状移動惑星探査ロボットの粘性流体中における駆動パラメータの探索
3. 学会等名 日本機械学会 関西学生会 2021年度学生員卒業研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 今井 溪太, 山野 彰夫, 千葉 正克
2. 発表標題 無限回転軸を有する索状惑星探査ロボットの開発
3. 学会等名 日本機械学会 関西支部第96期定時総会講演会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

[1]朝日新聞デジタル, 進め宇宙へ、ヘビ型ロボを開発 大阪府大の山野さん, 後藤泰良2021年1月7日 10時00分, URL : <https://www.asahi.com/articles/ASP1675QNNDXPTIL032.html>

6. 研究組織		
氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関