自励駆動法に基づく進行波の生成を利用した 流路内泳動推進体の駆動方法の検討

山 野 彰 夫* 新 谷 篤 彦* 伊 藤 智 博* 中 川 智 皓*

Study of Driving Method on the Moving Body in Flow Passage Utilizing Traveling Wave based on Self-excited Driving Method

Akio Yamano*, Atsuhiko Shintani*, Tomohiro Ito* and Chihiro Nakagawa*

Authors develop a flexible fish-like robot for use in a flow in narrow passage actuated by shape memory alloy (SMA) actuators, which realizes the downsizing and lightening of the moving body. Overheating of an SMA actuator, however, causes saturation of phase transition, and a consequent decrease in the fin vibration amplitude that leads to decrease of thrust force. This paper proposes a new driving method that utilizes a self-excited oscillator in order to solve this problem with simple implementation, which was named as the self-excited drive method. Moreover, we introduce coupling among actuators to obtain synchronization with a desired phase difference which generates traveling wave on the moving body. Experimental results showed that moving body with our proposed driving method realizes higher thrust performance in flow passage than that without control.

Key Words: Smart Material, Moving Body, Self-excited Oscillator, Synchronization, Narrow Passage, Traveling Wave

1. 緒 言

配管内部のように人の立ち入りが困難な環境下でも詳細な情報を取得したいという需要が存在する。これに対し、無人機は安全で詳細な観測を実現できる上に作業を行わせることも期待できるという点で有効な手段であり、流体で満たされた狭い流路内でも同様に有効であると考えられる。一方、複雑な流路形状での運用を考えた場合、しばしば高い運動性が要求されるため、スクリュによる推進では質量などの点で限界が存在すると思われる。さらに、下水道のように流量が変動する環境下での運用を考えたとき、流路内流体の流量が少ない場合には流路壁面の摩擦を推力に変換できる手法が好ましいと考える。

これらを実現する推進方法として、ウナギやヘビのようなしなり運動が挙げられる。魚の中には一体長分で180°旋回可能なものが存在していると報告されている[1]。このように魚のようなしなり運動は流体中での高い機動性を実現させようと期待できる。また、ウナギは泳動モードを変化させることでしなり運動により水中・陸上での推進を実現させている[2]。このような駆動方法は、流路内での高い運用性の向上につながるものと考えられる。そこで従来のスクリュなどのような推進機構より

も高い機動性を実現させる試みとして、魚などの泳動運動を模倣させる試みが数多く存在している。

先行事例では、一般的には推進体本体は剛体リンク機構で構成されており[3][4]、アクチュエータとして電磁モータ（サーボモータ）を用いることが多い。しかし、電磁モータの出力でしなり駆動を実現するには回転角を制御する必要があり、ギヤ等で減速する必要があるなど小型・軽量化に対する制約が大きい。

この問題を解決する方策として、アクチュエータにスマート素材を用いた例が多く見られるようになってきている。先行研究で主に見られるのは、イオン導電性高分子（IPMC）アクチュエータと形状記憶合金（SMA）アクチュエータであり、Chuらが良くまとめている[5]。SMAアクチュエータは価格面、出力および保守性の面からIPMCアクチュエータより優れており、質量が10–100[g]の領域では電磁モータと比べて質量比出力が高いという報告もある[6]。しかし、SMAアクチュエータの動作メカニズムの都合上、動特性がアクチュエータ領域の蓄熱などの影響を受けやすいという欠点がある。SMAアクチュエータは固相変態により温度に応じてひずみ量が変化するため、相変態が完了している温度領域ではひずみ量はあまり変化せず、温度に対して飽和特性を持つことになる。よって蓄熱による温度上昇は、SMAアクチュエータのひずみ量変化の飽和につながり、しなり運動の振幅が減少するため、推進力を維持するためには温度管理が重要になる。この問題に対して、補償器付のPID制御（Proportional-Integral-Derivative Controller）を

原稿受付 2014年12月12日

*大阪府立大学大学院工学研究科

*Graduate School of Engineering, Osaka Prefecture University

■ 本論文は新規性（要素分野）で評価されました。

適用することにより安定した動作を期待できるが、周期的な動作を実現するには周期的な目標軌道を設定する必要がある、ヒステリシス特性の補償器の設計のためにアクチュエータの特性も同定しておく必要がある [7] [8]. また、能動的なしなり駆動を実現するためには、屈曲を生成する多数のアクチュエータ領域を直列に配置して、一定の位相差を保ちつつ駆動させる必要がある. 筆者らは、柔軟な細管内推進体のしなり駆動による推力の生成においては、各アクチュエータの高精度な位置制御はさほど要求されず、むしろ簡易な調整で多数の SMA アクチュエータの出力を維持できる駆動方法が好ましいと考えている.

筆者らはこれまで時間平均温度のみを調整する簡易な設定で温度制御を実現する制御手法 (自励駆動法) を提案し、数値解析・実験の両面から推力維持に関する有効性を示してきた [9]. しかしながら、提案した自励駆動法は SMA アクチュエータおよび駆動回路に対してフィードバック系を構成し自励振動子を構成するため、複数のアクチュエータの出力に関する位相を同期させるには、それぞれのアクチュエータに対して結合入力进行設計する必要がある. そこで、筆者らは先行研究で、これを実現させる結合入力の設計を行い、数値解析において位相同期を実現させた [10].

本研究では、複数の SMA アクチュエータを備えた柔軟はりから成る実験モデルに対して、同様の結合入力を導入してしなり駆動の実現を試みる. その後、提案する結合入力を実装した自励駆動法が、流路内推進において安定した推進特性の実現に有効であるかを評価する.

2. 実験モデルの構成

2.1 駆動回路

推進体実験モデルの駆動回路の概要を Fig. 1 に示す. 駆動回路は主に安定化電源、計測領域、制御領域から構成される. 安定化電源は降圧式 DC/DC コンバータによって 12~16 [V] の範囲で設定した電圧を供給し、推進体の駆動電圧を変更することができる. 計測領域の回路構成を Fig. 2 に示す. 計測領域では、SMA アクチュエータの内部抵抗値は電圧降下量として計測できる. よって、SMA アクチュエータ駆動回路での電位 (Fig. 2 の V1) と可変抵抗によって設定された電位 (Fig. 2 の V2) との差を計装アンプ (LT1167: Linear Technology 製) によって 19.3 倍に増幅して計測する. 制御回路は 2 個のマイクロコントローラ (LPC1768) で構成され、制御則 (後述) に従って SMA アクチュエータの抵抗値の計測や駆動の制御を行う.

2.2 推進体実験モデル

推進体の実験モデルでは、 $\phi 3.0$ のシリコンゴム製の中実棒を軸として $\phi 20.0$ のアクリル円板 6 組 (計 12 枚) を対に配置し、各組のアクリル円板の間に SMA アクチュエータ (BMX100: Toki Corp. 製) を左右両側に計 16 本配置している. 各関節間のすき間は黒色のシリコンゴムで覆われている (Fig. 3). この構成により、左右の SMA アクチュエータを交互に通電することによって左右の SMA アクチュエータで応力の差が生成され、屈曲を生み出すことが可能である. また、左右のアクチュエータが同時に収縮した場合はシリコンゴム製柔軟はりが弾性変形し、SMA アクチュエータへの負荷を低減する. 流体で部

Fig. 1 Photo of control and driving circuit

Fig. 2 Diagram of self-sensing circuit

Fig. 3 Photo of moving body

分的に満たされた流路内での推進を実現させるため、フロートにより浮力を生成し、バランサウェイトによって安定性を確保する. 本研究では、SMA アクチュエータの出力を維持させるために温度制御を導入する. しかしながら、SMA アクチュエータの放熱が十分でない場合には、そもそも制御は有効とならない. そこで圧電素子を用いたマイクロプロア (MZB1001T02:

Table 1 Structural dimensions of experiment model and parameter of driving circuit

Item	Value
Length	19.5 [cm]
Width	20×10^{-3} [m]
Height	52×10^{-3} [m]
Mass	43×10^{-3} [kg]
Sampling period of self-sensing	50 [ms]
Flow rate of micro blower	1 [L/min]

村田製作所製)を推進体内部に導入し、強制空冷を行う。推進体の諸元を **Table 1** に示す。

3. SMA アクチュエータの平均温度の制御手法

本研究では、SMA アクチュエータは推進体を振動させ推力を生成させるために用いられる。そのため正確な変位の軌道制御は必要としない。そこで、簡易な構成で校正が容易であり、適切な温度管理を実現しつつ目標軌道を設定する必要のない駆動方法を導入することにする。

3.1 出力低下のメカニズムと対策

Fig. 3 の推進体実験モデルにおいて、過加熱による出力低下現象の定量的な評価を行うため、SMA アクチュエータへの異なる印加電圧の元で **Fig. 4** で示された実験装置の構成により変位量の時刻歴の計測を行った。計測条件として、SMA アクチュエータへの印加電圧は矩形波交流電圧と設定し、最小電圧が $V_{min} = 0$ [V]、最大電圧が $V_{max} = 11.8, 13.9, 15.1$ [V]、周波数は $f = 0.5$ [Hz] とした。推進体の第一関節 (Fig. 4 の手前側) のみを駆動させて、固定端から 26.6 [mm] の位置でレーザ変位計 (LK-080: KEYENCE 製) を用いて変位量の計測を行った。

駆動電圧と変位振幅の 10–60 [s] 間の平均値との関係を **Fig. 5** に示す。ここでエラーバーは標準偏差を表している。この結果では、駆動電圧が 11.8 [V] から 15.1 [V] に増加した場合、振幅が 68.1% に減少していることが確認できる。

このような出力低下の現象は、SMA アクチュエータが飽和特性を持つことに由来すると考えられる。**Fig. 6** の提案手法のブロック線図において、上部のブロックは SMA アクチュエータの動特性を示している。ここで駆動電圧が増加した場合、SMA アクチュエータ内部で生成されるジュール熱が増加して SMA の最大温度が上昇する。このため、冷却が不十分となり SMA の固相変態が飽和して大きなひずみ量変化を得られなくなったと考えられる。これを防止するには、SMA アクチュエータの平均温度を一定に保つ必要がある。ここで、SMA アクチュエータの内部抵抗値は温度に応じて変化するため、抵抗値の計測結果から温度を推定し、入力に反映させることで温度制御を実現できる。先行研究では、補償器付の PID 制御 (Proportional–Integral–Derivative Controller) の適用により安定した動作が実現されてきたが [7] [8]、周期的な動作を実現するには周期的な目標軌道を設定する必要がある。そして、抵抗値–ひずみ関係やヒステリシス特性などのアクチュエータの特性も同定しておく必要がある。今回は複数の SMA アクチュエータによる魚のようなしなり運動の実現が目的であり、簡易な調整で温度管理

Fig. 4 Photo of experimental setup for evaluation of overheating phenomenon **Fig. 5** Relation between input voltage V_{max} and vibration amplitude of displacement **Fig. 6** Block diagram of self-excited driving method

を実現できることが好ましい。そこで、アクチュエータと駆動回路を含めた系を自励発振させる手法である自励駆動法 [9] を導入する。

3.2 自励駆動法

SMA アクチュエータを自励発振させるに当たって、温度ドリフトを抑制することが目的であるため、温度をフィードバックする必要がある。ここで SMA アクチュエータの内部抵抗が温度依存性を有することに注目し、駆動時に内部抵抗値を計測し、フィードバックさせることを考える。ここで以下のような入力

について考える．そこで，右側・左側の SMA アクチュエータへの印加電圧をそれぞれ V_R, V_L とすると，

$$\left. \begin{aligned} V_R &= V_{max} \mathcal{H}(F_{S.M.A.}(R_{SMA,R} - R_t, N_{data})), \\ V_L &= V_R(t - T_p/2), \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここで $R_{SMA,R}$ はアクチュエータ領域の片側に配置された SMA の抵抗値の時刻歴であり， N_{data} は移動平均フィルタの計測データ数である． $F_{S.M.A.}(\cdot, \cdot)$ は移動平均フィルタを表しており， $\mathcal{H}$ はヘビサイドのステップ関数である． V_{max} および T_p はそれぞれ最大印加電圧および発振周期である．パラメータ R_t は計測された抵抗値 $R_{SMA,R}(t)$ の時間平均に対応する．移動平均フィルタは次式で定義される．

$$y(t) = F_{S.M.A.}(u, N_{data}) = \frac{1}{N_{data}} \sum_{m=0}^{N_{data}-1} u(t - m\tau), \quad (2)$$

ここで u はフィルタへの入力， y は出力であり， τ はサンプリング周期である．Fig. 6 は式 (1) のフィードバック入力に加えられたアクチュエータシステムを示している．

ここで設定パラメータ R_t を中心にして電気抵抗値 $R_{SMA,R}(t)$ が変化するため，適切な R_t を設定すれば適切な時間平均温度を保ちつつ駆動させることが可能になる．実験においては Fig. 2 における $V1$ の電位の発振振幅が最大となるように，可変抵抗により R_t の値を調節した．また，移動平均フィルタはセルフセンシングで計測された抵抗値の時刻歴データのノイズ除去および位相遅れによる自励振動の発現を目的としている．ここで移動平均フィルタの位相遅れ $\angle G_{S.M.A.}$ は以下のように表せる．

$$\angle G_{S.M.A.}(j\omega) = -(N_{data} - 1) \frac{\omega\tau}{2}, \quad \omega \in [0, \frac{\pi}{\tau}]. \quad (3)$$

ここで ω は角周波数である．これより，移動平均フィルタの計測データ数 N_{data} を変更することで移動平均フィルタの位相遅れを調節し，発振周波数を変更することが可能になる．ここで Fig. 6 において SMA アクチュエータの熱伝導特性は一次遅れ系 $G_{heat}(s) = k/(Ts + 1)$ で近似できるため，自励駆動法のフィードバック系の発振条件は記述関数法により以下のように推定される．

$$\angle \{G_{S.M.A.}(j\omega)G_{heat}(j\omega)\} = -\tan^{-1}(T\omega) - (N_{data} - 1) \frac{\omega\tau}{2} = -\pi. \quad (4)$$

これより，目標とする発振周波数を f_{target} とした場合，移動平均フィルタのサンプリングデータ数 N_{data} は以下のように設定する．

$$\left. \begin{aligned} N_{data} &= \lfloor \frac{k_{param}}{2\pi f_{target}} \rfloor + 1, \\ k_{param} &= \begin{cases} 1 & (|2\pi f_{target}T| \gg 1) \\ 2 & (|2\pi f_{target}T| \ll 1) \end{cases}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで $\lfloor \cdot \rfloor$ は床関数であり，次のように定義される．

Fig. 7 Discrete Short-time Fourier transform of the time series of displacement (sampling period: 20 [ms], window function: hamming window). We can confirm that frequency is changed every 60 [s] and this frequency is close to target value $f_{target}(t)$. Dotted line shows $f_{target}(t)$ defined as Eq. (7)

$$[x] \triangleq \max_{n \leq x, n \in \mathbb{Z}} \{n\}, \quad (6)$$

ここで $\mathbb{Z}$ は整数全体の集合である．また，本研究では $k_{param} = 1$ [-] を用いた．

3.3 自励駆動法における周波数変更の検証

Fig. 4 の実験装置を用いて，式 (5) の関係式より，自励駆動法で設定した周波数の下で発振するかどうかの確認を行った．ここで設定周波数は以下のように変更した．

$$f_{target}(t) = \begin{cases} 0.25 \text{ [Hz]} & (t \in [0, 60] \text{ [s]}) \\ 0.50 \text{ [Hz]} & (t \in [60, 120] \text{ [s]}) \\ 0.75 \text{ [Hz]} & (t \in [120, 180] \text{ [s]}) \\ 1.00 \text{ [Hz]} & (t \in [180, 240] \text{ [s]}) \end{cases}. \quad (7)$$

このとき，駆動電圧 $V_{max} = 11.80$ [V] の下で得られた振幅変位の時刻歴応答 y_{lb} [m] に対して離散短時間フーリエ変換

$$\begin{aligned} Y_{DSTFT}(n, f_k) &\triangleq \sum_{m=0}^{N_{window}-1} y_{lb}((n+m)\tau) \\ &\quad \times w_{hamming}(m\tau) e^{-j2\pi f_k m\tau}, \end{aligned} \quad (8)$$

を行った結果は Fig. 7 のようになった．ここで， f_k は時刻歴に含まれる周波数成分， N_{window} は窓関数を掛けるデータ数であり， n はサンプリング周期 τ の元での時刻歴データの番号を表す．サンプリング周期 τ は 20 [ms]，窓関数 $w_{hamming}(\cdot)$ はハミング窓を用いている．Fig. 7 のカラーバーは式 (8) に示す離散短時間フーリエ変換後の値の絶対値を表している．

Fig. 7 より変位振動の周波数は 60 [s] ごとに変化していることが確認でき，その値は設定周波数が $f_{target} \leq 0.5$ [Hz] では式 (7) で設定した値（図中の点線）に近い値を取っていることが確認できる．推進実験では 0.5 [Hz] 未満で試行を行うため，式 (5) による発振周波数の設定は有効であるといえる．

3.4 自励駆動法における出力維持特性の検証

前述の自励駆動法が SMA アクチュエータの出力維持に有効であるかの検証を行うため，駆動電圧を $V_{max} = 11.8, 13.9, 15.1$ [V] として $f = 0.5$ [Hz] の矩形波交流電圧で駆動させた場合，および自励駆動法で $f_{target} = 0.5$ [Hz] と設定して駆動させた場合とで変位応答の時刻歴の比較を行った．

結果を Fig. 8 に示す．実線が $f = 0.5$ [Hz] の矩形波交流電

Fig. 8 Comparison of time series of displacement between self-excited driving and constant frequency driving ($f = 0.5$ [Hz] for constant frequency and $f_{target} = 0.5$ [Hz] in self-excited driving)

Fig. 9 Relationship between input voltage V_{max} and displacement amplitude

圧で駆動させた場合、破線が自励駆動法で $f_{target} = 0.5$ [Hz] と設定して駆動させた場合であり、自励駆動法では駆動電圧の増加とともに波形が三角波から矩形波へ変化していることが確認できる。振幅と駆動電圧の関係について比較したものを **Fig. 9** に示す。ここでエラーバーは標準偏差を表している。矩形波交流電圧で駆動させた場合よりも提案手法では変位振幅が大きく、駆動電圧に依存しにくいことが確認できる。これは SMA アクチュエータの平均温度が変化した場合、自励駆動法では SMA アクチュエータへの印加電圧において、通電時間が変化して平均温度を一定に保つように制御することにより過加熱を防止するためだと考えられる [9]。

3.5 制御入力 of 考察

ここで自励駆動法での入力の時刻歴について注目することにする。駆動周波数 $f = f_{target} = 0.25$ [Hz] の条件で、一定周期入力による駆動および自励駆動法での SMA アクチュエータに

Fig. 10 Time history of input into a SMA actuator on right side of moving body

Fig. 11 Electricity consumption v.s. input voltage V_{max} under each driving method

対する印加電圧の時刻歴は **Fig. 10** のようになった。図では印加電圧が High (V_{max} [V]) のときを 1, Low (0 [V]) のときを 0 としている。一定周期入力による駆動では印加電圧のパルス幅は一定となる。しかし、自励駆動法では駆動電圧の増加と共にパルス幅が減少していることが確認でき、これは、SMA アクチュエータの時間平均温度を保つために入力熱量を調整しているためだと考えられる。このとき、推進体右側の一つの SMA アクチュエータで消費された電力を **Fig. 11** に示す。このアクチュエータは、**Fig. 6** において抵抗値が計測される側のアクチュエータに相当する。このように自励駆動法では駆動電圧にかかわらず消費電力が一定に保たれていることが確認できる。

4. しなり駆動の実現

ヒレ関節が一つのみの推進体の場合、推進効率を向上させるためにはアクチュエータ区間の末端部に柔軟なヒレ領域を設け、受動的な進行波を生成することで推力を生成させる必要がある。しかしながら、この形態では変更可能なパラメータが駆動周波数のみであり、位相速度の変更・後退などの挙動は実現できない。また、進行波形の生成において二次の泳動モードで推進効率が向上するという報告があるが、柔軟なヒレにより受動的な進行波を生成させる形態では単一のアクチュエータ区間で振幅を維持することが困難であり、複数のアクチュエータを用いることが好ましい[11][12]。

ここで、Fig. 3 に示す推進体の実験モデルは6個の関節からなり、それぞれの関節にSMAアクチュエータが左右両側に配置されている。これに対して、それぞれの関節で自励駆動法を適用した場合、それぞれが独立して駆動されるため秩序だった運動を生成できない。このような問題に対して、各自励振動子間に結合入出力を導入することで、各振動子間の出力の位相差を特定の値に収束させることが期待できる。Zhang らはうねり駆動の実験装置に対して、生物の運動リズム生成源である神経振動子の数理モデルを導入し、複数の振動子に対して時間遅れを伴う結合を導入することで特定の位相差を保ちつつ発振させることを実現した[13]。筆者らは、自励駆動法においても位相遅れに比例した時間遅れを伴う結合入力を導入することで、各振動子が特定の位相差を保ちつつ発振することを数値解析により示した[10]。そこで、Fig. 6 のシステムの信号 y に対して次のような結合入力 p_j を加算する。

$$\begin{aligned} p_1 &= \varepsilon \left\{ y_N \left(t - T_p \frac{(1-N)\Delta\psi}{2\pi} \right) + y_2 \left(t - T_p \left(1 - \frac{\Delta\psi}{2\pi} \right) \right) \right\}, \\ p_i &= \varepsilon \left\{ y_{i-1} \left(t - T_p \frac{\Delta\psi}{2\pi} \right) + y_{i+1} \left(t - T_p \left(1 - \frac{\Delta\psi}{2\pi} \right) \right) \right\}, \\ p_N &= \varepsilon \left\{ y_{N-1} \left(t - T_p \frac{\Delta\psi}{2\pi} \right) + y_1 \left(t - T_p \left(1 - \frac{(1-N)\Delta\psi}{2\pi} \right) \right) \right\}, \end{aligned} \quad (9)$$

ここで $i \in \{2, \dots, N-1\}$ である。 N はアクチュエータの配置された関節数で、今回の条件では $N = 6$ である。 p_j は $j \in \{1, \dots, N\}$ において、 j 番めのアクチュエータへの結合入力を示しており、 y_j は移動平均フィルタからの出力である。 ε は結合入力のゲインであり、小さすぎると位相差の変動（位相ドリフト）が発生する。一方で、大きすぎると結合された振動子の特性は振動子単体の動特性と異なったものとなる[14]。今回は試行錯誤的に $\varepsilon = 0.2$ と設定した。各振動子の位相 $\phi_i, i \in \{1, \dots, N\}$ に対して、振動子間の位相差は $\Delta\psi \triangleq \phi_i - \phi_{i+1}, i \in \{1, \dots, N-1\}$ の値により設定される。また、周期 T_p は計測された抵抗値変化の時刻歴より推定される。

ここで、 $f_{\text{target}} = 0.5$ [Hz]、 $V_{\text{max}} = 11.80$ [V] の条件のもと、6関節のSMAアクチュエータを駆動させ、式(9)の結合入力で位相差 $\Delta\psi$ を $\Delta\psi = 0, \pi/2, \pi$ [rad] とした時に、電圧として測定されたSMAアクチュエータの抵抗値変化の時刻歴 (Fig. 6 の $R_{\text{SMA},R}$) を Fig. 12 に示す。

Fig. 12 Experimental results of phase control. These results show that time series of outputs from self-sensing circuit shown in Fig. 2 converge into desired phase difference $\Delta\psi$

ここで、位相差 $\Delta\psi$ の値を大きく設定した場合には、それに応じて出力の位相差が大きくなっていることが確認できる。しかしながら、設定位相差と実際の位相差で誤差が発生している。これは、計測された抵抗値変化の時刻歴から発振周期 T_p を推定する際に生じた推定誤差が原因だと考えられる。

5. 提案手法の壁面摩擦を用いた推進への有効性の検証

式(1)および式(9)による提案手法によって、推進体の推進特性においてSMAアクチュエータの過加熱による出力低下の問題が回避できるかどうかの評価を行った。ここで推進の評価において流路内での推進速度に注目し、実験により提案手法の有効性を確認した。以下では、壁面と推進体が接触可能な流路幅 30 [mm] の元での推進を想定する。

5.1 提案手法による出力維持の評価実験における機器の構成

実験における機器構成を Fig. 13 に示す。原色（濃い色）の機器が実験に用いた主要機器である。

実験においては、部分的に水で満たされた、幅 30 [mm] の流路内で推進体の実験モデル (Fig. 3) を 300 [mm] の区間で推進させ、ビデオカメラにより挙動を記録する。Fig. 13 の実験機器構成により得られた動画データから、50 [mm] 区間ごとに推進体が通過する時間より各位置での平均推進速度を算出した。例えば流路において、0 [mm] から 50 [mm] への通過時間が t_1 [s]、50 [mm] から 100 [mm] での通過時間が t_2 [s] であったとき、それぞれの区間での平均速度は $50/t_1$ [mm/s]、 $50/t_2$ [mm/s] となる。詳細な実験条件を Table 2 に示す。ここで駆動電圧は $V_{\text{max}} = 11.8, 13.9, 15.1$ [V] として提案手法および一定周期での駆動において、それぞれ5回計測を行い推進速度の平均値と標準偏差を算出した。

5.2 計測結果

得られた推進速度を Fig. 14 に示す。青い実線は周波数

Fig. 13 Photo of experimental setup

Table 2 Experimental conditions for evaluation of proposed driving method

Item	Value
Moving distance	300×10^{-3} [m]
Width of passage	30×10^{-3} [m]
Water level of passage	25×10^{-3} [m]
Driving voltage for SMA actuators	11.8, 13.9, 15.1 [V]
Driving frequency	0.25 [Hz]
Phase difference among each actuator	$\pi/4$ [rad]
Measuring trials	5 [-]

Fig. 14 Averaged velocity of moving body under both self-excited driving method shown in Eq. (1) and driving method by constant frequency

$f = 0.25$ [Hz] で駆動させたとき、赤い実線は設定周波数を $f_{target} = 0.25$ [Hz] として自励駆動法で駆動させたときの各流路位置での平均推進速度を示している。位相差は $\Delta\psi = \pi/4$ [rad] としている。また影の領域は計測データにおける標準偏差を示している。

ここで Fig. 14 において、自励駆動法では SMA アクチュエータへの入力電圧 V_{max} の増加とともに推進速度が向上している

Fig. 15 Snapshots of motion while driving in passage by self-excited drive. Triangular marks show contact points against walls of moving body. Δ, ∇ indicates the contact points with wall

ことが確認できる。一方で一定周期入力 $f = 0.25$ [Hz] で駆動させた場合には $V_{max} = 13.9$ [V] から $V_{max} = 15.1$ [V] に増加させた場合では推進速度の向上は見られない。ここで、推進体の挙動について計測した結果の一例を Fig. 15 に示す。図中の破線は推進体の推進位置を示している。スナップショットでは 5 [s] 間で 10 [mm] の移動を確認できる。ここで駆動電圧は $V_{max} = 15.1$ [V] としている。また、 Δ, ∇ 印は壁面との接触点を示している。このように、流路幅 30 [mm] ではギャップが小さかったため、推進体は主に流路壁面との摩擦を利用して推進しており、位相速度の進行方向に推進している。今回の実験結果では、一定周期入力 $f = 0.25$ [Hz] で駆動させた場合において $V_{max} = 13.9$ [V] から $V_{max} = 15.1$ [V] に増加させたときに推進速度の向上が見られなかったのは、次のように考えることができる。Fig. 5 のように、一定周期入力の条件では駆動電圧の増加とともに振幅が減少する。よって駆動電圧が $V_{max} = 15.1$ [V] となったときには振幅の減少による壁面摩擦の減少により、推進体と壁面の間にすべりが発生して推進速度の低下が生じたと考えられる。自励駆動法では Fig. 9 のように振幅が保たれるが、変位の時刻歴応答の波形は三角波から矩形波のように変化する (Fig. 8)。矩形波のような波形の変位応答では、最大振幅をとりうる時間が三角波よりも長くなるため壁面との摩擦力を維持しやすくなりすべり減少の防止につながり、駆動電圧の増加とともに推進速度が向上したのではないかと考えられる。

6. 提案手法の流体力を用いた推進への有効性の検証

壁面摩擦による推進が適用できない幅の広い流路の場合には、流体力を推進に利用する手段が考えられる。この場合においても提案手法が有効であるかの検証を試みた。

Fig. 16 Photo of moving body with flexible fin. Floats are designed to achieve the stable floating on water surface

Table 3 Structural dimensions of experiment model and parameter of driving circuit

Item	Value
Length	19.5 [cm]
Width	54×10^{-3} [m]
Height	82×10^{-3} [m]
Mass	44×10^{-3} [kg]

6.1 提案手法の評価実験における機器の構成

流路幅 120 [mm] の流路において, **Fig. 16** に示された推進体を用いて, 第 5.1 節と同様の手順で推進特性の評価を行った. 推進体の諸元を **Table 3** に示す. 流体力による推進を実現するのに十分な推力を生成させるため, 全長 190 [mm]・幅 50 [mm] の柔軟な樹脂製のフィンを推進体下部に追加した. ここで, 同符号の位相差の元では壁面摩擦による推進と流体力による推進とは異なる推進方向が実現される. 壁面摩擦の元での実験と同方向の進行を実現させるために位相差を $\Delta\psi = -\pi/4$ [rad] と設定した.

6.2 計測結果

上記の条件で得られた推進速度を **Fig. 17** に示す. ‘*’ のマークの実線は, 周波数として $f = 0.3$ [Hz] で駆動させたとき, ‘o’ のマークの実線は設定周波数を $f_{target} = 0.3$ [Hz] とし自励駆動法で駆動させたときの各流路位置での平均推進速度を示している. また, 駆動電圧 $V_{max} = 15.1$ [V] の元で自励駆動法により駆動させたときの泳動挙動は **Fig. 18** のようになった. 図中の破線は推進体の推進位置を示している. 推進で壁面摩擦を用いた Fig. 15 の結果と同様にうねり駆動が推進につながっていることが確認できる. $f = 0.3$ [Hz] の一定周期駆動では $V_{max} = 13.9, 15.1$ [V] の条件下で推進が停止した一方で, 自励駆動法では推進が継続されている. Fig. 9 で示されているように, 自励駆動法の元では SMA アクチュエータの駆動において幅広い駆動電圧においても変位振幅が維持される. このことが流体力を介した推力の維持につながり, 一定周期入力電圧による駆動では推進が実現できなかった電圧領域での駆動を実現させたと考えられる.

Fig. 17 Averaged velocity of moving body under both self-excited driving method and driving method by constant frequency

Fig. 18 Snapshots of swimming motion while driving in passage by self-excited drive

Fig. 14 の壁面摩擦による推進の実験結果では推進速度のオーダーは $O(10^{-3})$ [m/s] である一方で, 流体力による推進では $O(10^{-2})$ [m/s] の推進速度が実現されている. 一定周期入力 $f = 0.3$ [Hz] で駆動させた場合において, $V_{max} = 13.9$ [V] および $V_{max} = 15.1$ [V] において制御・電力供給線からの張力に抗しきれず推進が停止することが確認された. 壁面摩擦による推進では, 制御・電力供給線からの張力, 流体力による抗力および壁面による拘束が推進体の受ける抗力になるが, 流体力による推進では受ける抗力は流体力および制御・電力供給線からの張力に由来するもののみとなり, 推進速度の大幅な向上につながったと考えられる. 一方で, 壁面摩擦による推進では制御線を引きずりながら推進を実現したのに対して, 流体力による推進では制御線と流路の間の摩擦で推進が停止することがしばしば確認されている. このことから, 流体力で生成される推力は壁面摩擦による推進に対して小さくなったことにより, 制御・電力供給線からの張力の影響によって計測結果のばらつき (Fig. 17

の影の領域)が大きくなったと思われる。

7. 結 言

本研究では、小型化・軽量化を実現する方策として推進体のアクチュエータとして SMA アクチュエータを用いた実験モデルを製作した。SMA アクチュエータは飽和特性を持っているため過加熱による温度上昇で出力が低下する。そこで時間平均温度を一定にする目的として自励駆動法を導入し、実験より振幅・推進速度の両面から制御なしの場合よりも良好な推進特性が得られることを確認した。さらに消費電力が駆動電圧に依存せず一定に保たれることを示した。これが SMA アクチュエータの過加熱防止に繋がっていると考えられる。また、各アクチュエータ間の出力の位相を特定の位相差で同期させる位相制御を導入してうねり駆動を実現させ、壁面摩擦を利用した場合および流体力を利用した場合において提案手法が推進特性の維持に有効であることを確認した。推力・推進速度の向上には駆動周波数の向上が重要であるが、現時点では推進の実現には 0.3 [Hz] 以下での駆動が限界である。応答性の向上のため、今回導入したマイクロプロアによる空冷以外の手法を検討する必要がある。

参 考 文 献

- [1] R. Mason: "Fluid locomotion and trajectory planning for shape-changing robots," Doctoral paper of California Institute of Technology, pp.1-251, 2003.
- [2] G. Gillis: "Environmental effects on undulatory locomotion in the american eel *anguilla rostrata*: kinematics in water and on land," The Journal of Experimental Biology, vol.201, pp.949-961, 1998.
- [3] A. Crespi, D. Lachat, A. Pasquier and A. Ijspeert: "Controlling swimming and crawling in a fish robot using a central pattern generator," Autonomous Robots, vol.25, pp.3-13, 2008.
- [4] C. Wang, G. Xie, L. Wang and M. Cao: "CPG-Based locomotion control of a robotic fish: using linear oscillators and reducing control parameters via PSO," International Journal of Innovative Computing, Information and Control, vol.7, no.7, pp.4237-4249, 2011.
- [5] W. Chu, K. Lee, S. Song, M. Han, J. Lee, H. Kim, M. Kim, Y. Park, K. Cho and S. Ahn: "Review of biomimetic underwater robots using smart actuators," International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, vol.13, no.7, pp.1281-1292, 2012.
- [6] S. Hirose, K. Ikuta and Y. Umetani: "Development of a shape memory alloy actuators. Performance assessment and introduction of a new composing approach," Advanced Robotics, vol.3, no.1, pp.3-16, 1989.
- [7] T. Wang, Z. Shi, D. Liu, C. Ma and Z. Zhang: "An accurately controlled antagonistic shape memory alloy actuator with self-sensing," Sensors, vol.12, pp.7682-7700, 2012.
- [8] S. Liu, T. Huang and J. Yen: "Tracking control of shape-memory-alloy actuators based on self-sensing feedback and inverse hysteresis compensation," Sensors, vol.10, no.1, pp.112-127, 2010.
- [9] A. Yamano, A. Shintani, T. Ito and C. Nakagawa: "Evaluation of driving method of the flexible body moving in narrow flow passage," Journal of Robotics and Mechatronics, vol.26 no.3, pp.349-357, 2014.
- [10] A. Yamano, A. Shintani, T. Ito and C. Nakagawa: "Phase control for moving body in narrow passage," Proceedings of the 12th International Conference on Motion and Vibration (MOVIC-2014), No.3C21 (USB proceedings), 12 pages, 2014.
- [11] 高田, 荒木, 落合, 田尻, 脇坂: "小型魚ロボットにおける尾ひれの柔軟性が推進性能に及ぼす影響", 日本機械学会論文集 C 編, vol.77, no.778, pp.183-194, 2011.
- [12] 渡辺, 村松, 小林: "柔軟な尾ひれの波動運動を利用した魚型水中移動ロボットの推進性能", 日本機械学会論文集 C 編, vol.68, no.665, pp.188-196, 2002.
- [13] D. Zhang, D. Hu, L. Shen and H. Xie: "Design of an artificial bionic neural network to control fish-robot's locomotion," Neurocomputing, vol.71, pp.648-654, 2008.
- [14] 中尾: "非線形振動子の位相縮約理論とその応用", システム/制御/情報: システム制御情報学会誌, vol.53, no.8, pp.316-322, 2009.

山野彰夫 (Akio Yamano)

2012 年大阪府立大学大学院工学研究科博士前期課程機械系専攻入学, 2014 年同大学修了, 同年大阪府立大学大学院工学研究科博士後期課程機械系専攻入学。日本機械学会 (JSME) 学生会員。
(日本ロボット学会学生会員)

新谷篤彦 (Atsuhiko Shintani)

1992 年京都工芸繊維大学工学部機械工学科卒業, 1994 年同大学大学院工学科学研究科博士前期課程修了, 1997 年同博士後期課程修了, 大阪府立大学工学部助手を経て 2007 年同大学大学院工学研究科准教授。IEEE, 日本機械学会, 計測自動制御学会等の会員。

伊藤智博 (Tomohiro Ito)

1975 年大阪大学工学部産業機械工学科卒業, 1977 年大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻修了, 1977 年三菱重工業 (株) 入社, 2002 年大阪府立大学大学院工学研究科助教授, 2005 年大阪府立大学大学院工学研究科教授, 2011 年工学域長。アメリカ機械学会, 日本機械学会, 欧州機械学会, 日本地震工

学会等の会員。

中川智皓 (Chihiro Nakagawa)

2004 年大阪府立大学工学部機械システム工学科飛び級により中途退学, 2005 年大阪府立大学大学院工学研究科機械系専攻博士前期課程中途退学, 2007 年東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻博士前期課程修了, 2010 年東京大学大学院工学系研究科産業機械工学専攻博士後期課程修了, 同年大阪府立大学大学院工学研究科助教。2007 年日本学術振興会特別研究員 DC1。日本機械学会, アメリカ機械学会, 公益社団法人自動車技術会, IEEE 等の会員。