

ファジィ理論を利用した魚ロボットの運動制御

平田宏一（正，船舶技術研究所）
春海一佳（非，船舶技術研究所）

1. まえかき

昨今、魚の泳法を模擬した水中推進装置の研究・開発が盛んに行われている¹⁾。著者らも高効率な推進装置を開発することを目的として、1999年度より魚の泳法を模擬した無策無人海中ロボット（魚ロボット）に関する研究を開始した²⁾。本研究は、推進特性及び旋回特性といった魚ロボットの基本特性を評価し、さらに魚ロボットの最適運動制御手法について検討することを目的としている。

魚ロボットの運動形式は複雑かつ多様であり、従来の工学的制御手法で最適な運動形式を模索するのは極めて難しい。本報では、研究の第一段階として、魚ロボットの直進運動に着目し、ファジィ理論を利用した魚ロボットの運動制御法を提案する。さらに、簡易的なシミュレーション計算によってその適用性について考察する。

2. 実験用小型魚ロボット

図1は開発を進めている全長190mmの実験用小型魚ロボットである²⁾。この魚ロボットは、2つの関節から構成された尾部を最高4Hz程度の周波数で左右に往復運動をさせて推進する。

魚ロボットを直進運動させる場合、胴部に対する尾柄の角度 A_1 (deg)及び尾びれの角度 A_2 (deg)は次式で表される。

$$A_1 = A_{1max} \sin(2\pi ft) \quad (1)$$

$$A_2 = A_{2max} \sin(2\pi ft - b) \quad (2)$$

ここで、 A_{1max} 、 A_{2max} はそれぞれ尾柄（第1関節）及び尾びれ（第2関節）の最大振り角(deg)、 f は周波数(Hz)、 t は時間(s)、 b は尾柄と尾びれとの位相差(deg)である。

これらの変数は、運動制御に用いているパーソナルコンピュータのプログラム上で設定でき、任意の運動が可能である。尾柄及び尾びれの最大振り角 A_{1max} と A_{2max} とはそれぞれ独立して設定できるが、以下では運動を簡単にするため、同一な値($=A_{max}$)としている。

図2及び図3に実験結果の一例を示す³⁾。図2は、

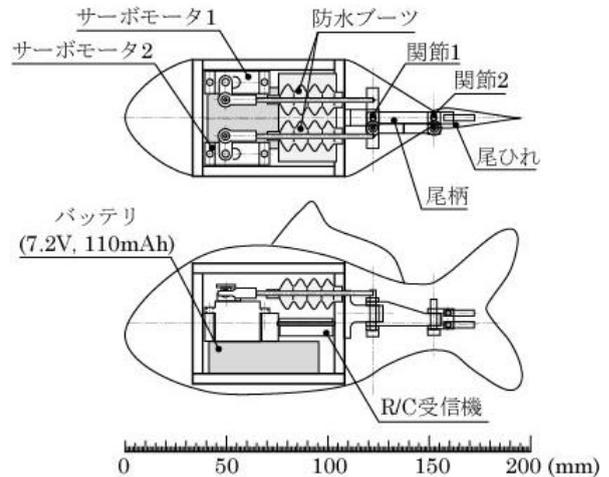


図1 実験用小型魚ロボット

$A_{max}=30 \text{ deg}$ 、 $b=90 \text{ deg}$ とした場合、周波数 f に対する速度 V 及び消費電力 W_{el} の実験結果を示している。これより、速度 V 及び消費電力 W_{el} は、周波数 f の上昇に伴い、ほぼ直線的に増加していることがわかる。また、図3は、 $A_{max}=30 \text{ deg}$ 、 $f=3 \text{ Hz}$ とした場合、位相差 b に対する速度 V 及び消費電力 W_{el} の実験結果を示している。これより、速度 V は $b=20 \text{ deg}$ 程度で最高となり、消費電力 W_{el} は位相差が小さくなるほど増大することがわかる。これらの実験

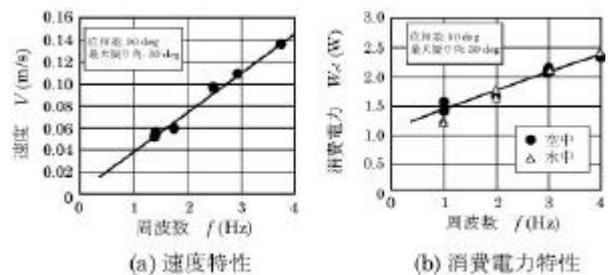


図2 周波数に対する速度及び消費電力

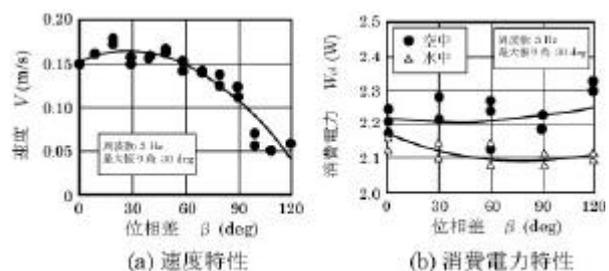


図3 位相差に対する速度及び消費電力

等で経験的に得られた性能特性を踏まえて、魚ロボットの制御手法について検討する。

3. 魚ロボットのファジィ制御

3.1 魚ロボットの制御手法

従来の工学的制御手法は、対象とする物理現象を高精度かつ正確に解析することにより得られる制御手法であり、高い精度で解析できる現象を制御するに極めて有効な手法である。しかし、魚ロボットの運動形式はかなり複雑であり、その推進性能を解析的に解くことは極めて困難であるので、本手法が魚ロボットの制御手法に適しているとは言い難い。

これに対して、より人間に近い知的な制御を目指し、ファジィ理論、ニューロ及び遺伝的アルゴリズム等を利用した新しい制御手法が注目を浴びている⁴⁾。これらの手法は、高い精度性や確実性を要求せず、取り扱いやすさ、低コストを達成するために不正確性や不確実性をどこまで許容できるかを探り、低精度な計算により、問題解決が試みられる。したがって、魚ロボットのように高精度な解析が難しく、複雑な物理現象を扱う場合に有効な手法であると考えられる。

3.2 ファジィ制御の適用方法

魚ロボットの速度 V と消費電力 W_{el} に着目したファジィ理論の適用方法を検討する。運動形式の関数形を正弦状とした場合、式 (1) 及び (2) からわかるように、魚ロボットの制御パラメータは周波数 f 、最大振れ角 A_{max} 及び位相差である。以下、制御モデルを簡単にするため、周波数 f は一定とし、最大振れ角 A_{max} 及び位相差が制御変数であると考えられる。

ファジィ理論は、厳密な数値ではなく、主観的な考えに基づく制御規則（ルール）を定め、制御手順を決める手法である。したがって、以下の検討においては、数値による記述ではなく、「速い」、「遅い」、「大きい」、「小さい」といった曖昧かつ定性的な特性に着目する。

図 2 及び図 3 に示した実験結果並びに設計計算に用いた簡易計算モデルによる計算結果²⁾に基づき、魚ロボットの運動を考えた場合、最大振れ角を大きくすると速度及び消費電力は大きくなり、最大振れ角を小さくすると速度及び消費電力が小さくなる。同様に、位相差が $20 \sim 90 \text{ deg}$ の範囲において、位相差を小さくすると速度及び消費電力は大きくなり、位相差を大きくすると速度及び消費電力が小さくなる。

これらを踏まえた主観的な考えに基づき、次の 8 つの制御規則を適用する。

速度が速くて、消費電力が小さいならば、最大振れ角を変えない。

速度が速くて、消費電力が大きいならば、最大振れ角を小さくする。

速度が遅くて、消費電力が小さいならば、最大振れ角を大きくする。

速度が遅くて、消費電力が大きいならば、最大振れ角を大きくする。

速度が少し速くて、消費電力が少し小さいならば、位相差を変えない。

速度が少し速くて、消費電力が少し大きいならば、位相差を大きくする。

速度が少し遅くて、消費電力が少し小さいならば、位相差を変えない。

速度が少し遅くて、消費電力が少し大きいならば、位相差を小さくする。

3.3 計算方法

図 4(a) は速度 V^* に対する速さを表す度合 (0~1)、図 4(b) は消費電力 W_{el}^* に対する消費電力の大きさを表す度合 (0~1) を示している。ここで、速度 V^* 及び消費電力 W_{el}^* は、後述する制御シミュレーションを簡単にするため、0~100 の範囲で考えることとする。また、図 4(c) 及び (d) は、最大振れ角 A_{max} 及び位相差の変化率に対する変化量の度合 (0~1) を

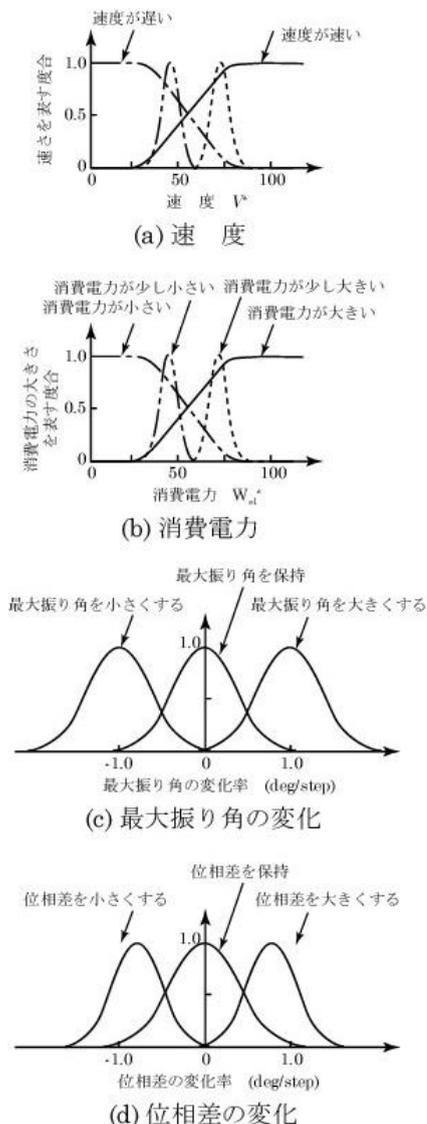


図 4 魚ロボットの運動制御に用いるメンバーシップ関数

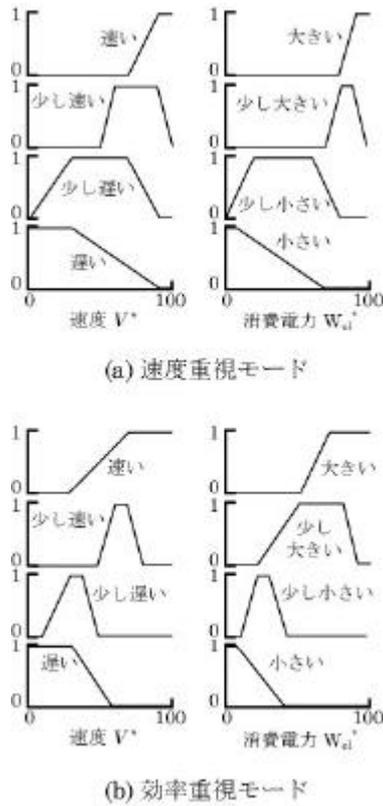


図5 運転モードとメンバーシップ関数

示している。これらは模式的にメンバーシップ関数を表したものであり、制御シミュレーションにおいては計算を簡単にするため直線状のメンバーシップ関数を用いる(図5)。

また、速度 V^* と消費電力 W_{el}^* に着目した運動制御において、最大振り角 A_{max} 及び位相差 ϕ には、速度と消費電力との兼ね合いから、設定する運転モードに対する最適値が存在すると考えられる。そこで図5に示すように、

- (i) 速度重視モード：消費電力があまり大きくなく速度が速い運転モード
- (ii) 効率重視モード速度があまり遅くなく消費電力が小さい運転モード

の2通りのメンバーシップ関数を用いてシミュレーション計算を試みる。

図6は、制御規則 ① ~ ④ におけるファジィ理論の計算方法を示している⁵⁾。同図に示すように、それぞれの制御規則の結果を重ね合わせ、重なった部分の重心を求めることで最大振り角 A_{max} の制御量が求められる。同様に、制御規則 ① ~ ④ より、位相差の制御量を求めることができる。

4. 制御シミュレーション及び考察

4.1 魚ロボットのモデル化

本魚ロボットは実時間での速度及び消費電力の計測ができる構造ではないため、実機による運動制御は困難である。そのため、図2及び図3に示した実

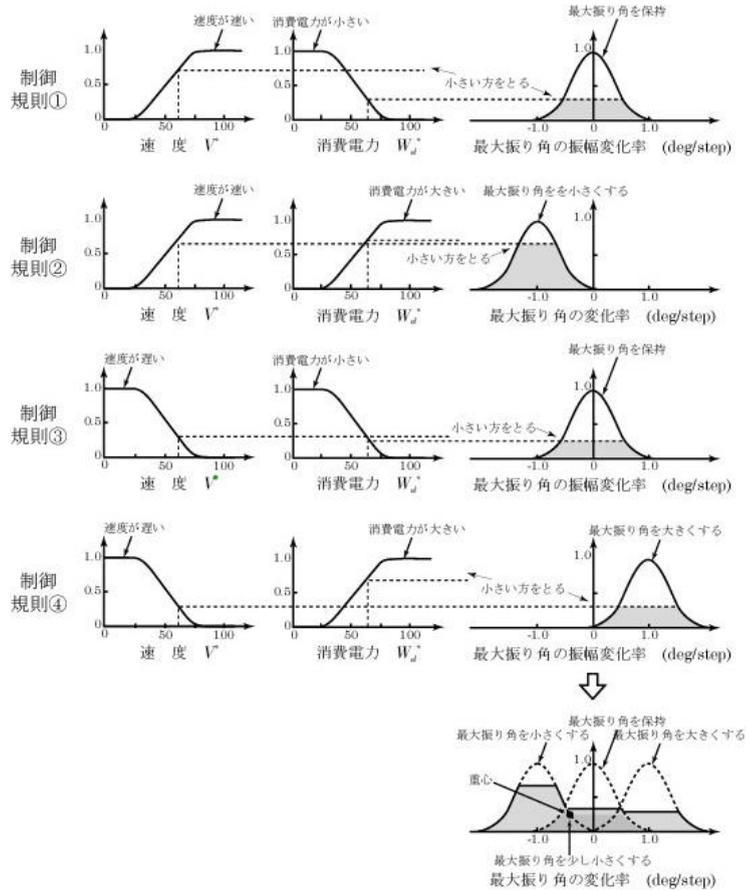


図6 ファジィ理論による計算方法の概略

験結果並びに設計計算に用いた簡易計算モデルによる計算結果に基づき、速度 V^* 及び消費電力 W_{el}^* を次式で求め、シミュレーション計算を行う。

$$V^* = K_v \cdot f \cdot A_{max}^{0.8} \cdot b^{-1.5} \quad (3)$$

$$W_{el}^* = K_w \cdot f^{1.2} \cdot A_{max}^{1.2} \cdot b^{-1} + W_{base} \quad (4)$$

ここで、係数 K_v 、 K_w は、 $f=5(\text{Hz})$ 、 $A_{max}=40 \text{ deg}$ 、 $\phi=20 \text{ deg}$ で、 $V^*=100$ 、 $W_{el}^*=100$ になるように設定する。また、 W_{base} は固定損(本魚口ポットにおいては、無線装置の受信電力に相当)であり $W_{base}=20$ としている。さらに、実機の運動を考慮して、位相差は $20 \sim 90 \text{ deg}$ 、最大振り角は $0 \sim 40 \text{ deg}$ の範囲で運動させる。なお、式(3)及び式(4)は魚口ポットの性能を十分な精度で模擬できるものではないが、ファジィ理論を利用した魚口ポットの運動制御の適用性について検討するには十分であると考えている。

4.2 計算結果及び考察

図7は、速度重視モードのメンバーシップ関数を用いた場合のシミュレーション計算の結果である。初期条件として、 $\phi=90 \text{ deg}$ 、 $A_{max}=30 \text{ deg}$ 、 $f=5 \text{ Hz}$ (一定)としている。これより、計算開始直後、最大振り角は上限の 40 deg に達し、さらに約60回の計算まで位相差は低下していることがわかる。約120回の計算後は、位相差 27 deg 、最大振り角 40 deg 、速度 $V^*=65$ 、消費電力 $W_{el}^*=80$ にほぼ収束している。

図8は、効率重視モードのメンバーシップ関数を

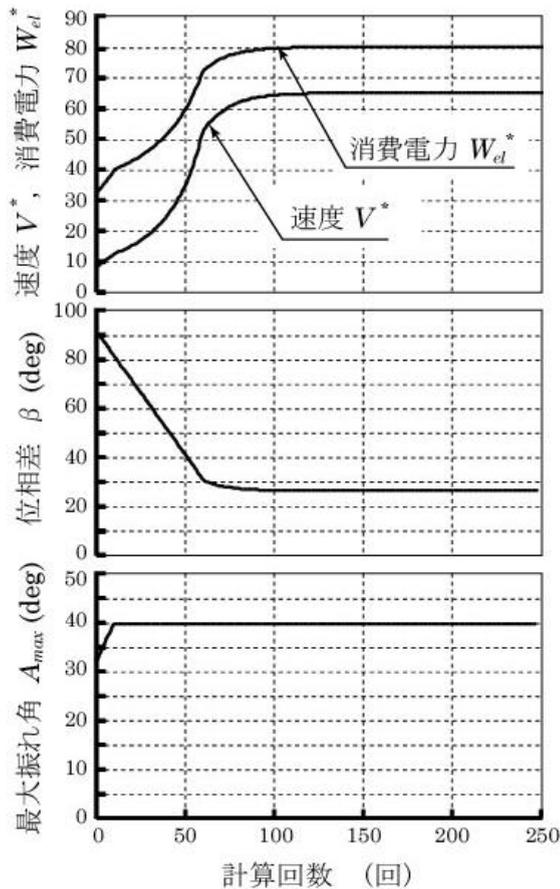


図7 計算結果(速度重視モード)

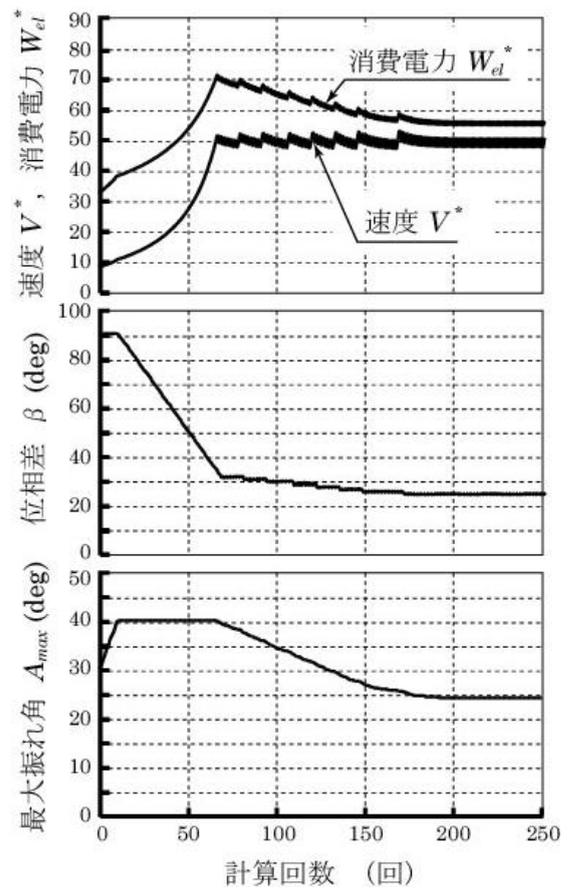


図8 計算結果(効率重視モード)

用いた場合のシミュレーション計算の結果である。初期条件は図7の場合と同様である。これより、計算開始直後、最大振り角は上限の40 degに達し、さらに約70回の計算まで位相差は低下し、速度及び消費電力が急速に増大していることがわかる。その後、約180回の計算まで位相差及び最大振り角が徐々に低下し、速度を維持しつつ、消費電力を低減させる制御を行っている。約200回の計算後は、位相差25 deg、最大振り角24 deg、速度 $V^*=50$ 、消費電力 $W_{el}^*=57$ にほぼ収束している。図7及び図8は、概ね実状に適した運動制御であると考えられる。また、設定するメンバーシップ関数によって収束する値は大きく異なることがわかる。

5. あとがき

以上、魚ロボットの運動制御に用いるファジィ理論の適用方法について検討し、簡易的なシミュレーション計算を行った。その結果、8つの制御規則を用いることで、魚ロボットのファジィ制御が可能であること、メンバーシップ関数によって収束する値は大きく異なること、等が確認された。

さらに多くの経験的なデータベースを構築することで、制御規則及びメンバーシップ関数の設定が容易かつ適切になると考えている。また、ファジィ制御には学習機能が基本的になく、得られる解が最適であるかは保証されない。今後、ニューロあるいは遺伝的アルゴリズム等の利用を検討する必要があると考えている。

参考文献

- 1) 加藤直三, アクアバイオメカニズムに関する研究動向, 日本造船学会誌, 830(1998), 34/41.
- 2) 平田ほか, 魚ロボットに関する研究, 平成11年度(第73回)船舶技術研究所研究発表会講演集(1999), 190/193.
- 3) 平田宏一: 小型魚ロボットの設計・試作, 日本設計工学会平成11年度春期研究発表講演会講演論文集, No.99 - 春季(1999), 29/32.
- 4) 萩原将文: ニューロ・ファジィ・遺伝的アルゴリズム, 産業図書(1998).
- 5) 文献(4)の p.85/91.