

振動翼推進システムの開発とその応用

Development of Oscillating Fin Propulsion System and Its Application

技 術 本 部 寺 田 郁 二^{*1} 山 本 郁 夫^{*2}

永 松 哲 郎^{*3}

長菱エンジニアリング株式会社 今 泉 好 照^{*4}

本報では、弾性振動翼推進システムのピークルアクチュエータとしての適用検討を述べる。弾性振動翼推進システムを開発し、模型船搭載による水槽試験を通して基本性能の把握と実用化のめどを付けることができた。また、ニューラルネットワークにより振動翼付き船舶のモデル航走を行い、ピークルアクチュエータとしての適用はん用性を広げることができた。さらに、弾性振動翼推進システムの応用製品として、水族館等のアミューズメント用にリアリティーの高い人工魚（機械魚）を製作し、無索三次元遊泳が可能であることを確認した。

The purpose of this paper is to describe the feasibility research of the application on of oscillating fin propulsion control system to vehicles. The system was designed and constructed to be combined with a ship model. Tank tests using the ship model have confirmed the system's feasibility. As a result, several advantages of the oscillating fin system have been found out. A neural network was successfully applied for an identification of the ship model dynamics with the oscillating fin, and its effectiveness was confirmed. An artificial fish, intended as an amusement attraction for aquariums, using the oscillating fin propulsion system has been developed. Its capability of untethered 3 dimensional movement was confirmed.

1. は じ め に

魚類等の水中生物が、少ないパワーで高速に泳ぐ（いるか 60 km/h, かじき 80 km/h）⁽¹⁾ことや、あゆ等は、静止状態維持特性が優れていることは良く知られている。これらの生物としての特性は、サイエンスとして古くから興味を持たれ、多くの研究がなされてきているが⁽²⁾、これらの特性を工学的問題として捕えて研究されている例は少ない⁽³⁾。

この中で弾性体の特性を積極的に活用して、水中ピークルの推進に用いる弾性体振動翼制御がある。これは、水中生物の行う運動とのアナロジーから、ピークルに装備した翼を振動させて推進力を得る手法である。

振動翼を剛体として扱う剛体振動翼については、線形理論解析が行われているが、過去の実験研究によれば⁽³⁾、弾性翼の方が優れているという報告がなされている。弾性振動翼についての理論的考察も一部なされているが、制御系を加えた検討はまだなされていない。

本研究では、弾性振動翼推進装置の制御システム及び振動翼駆動装置を設計、製作した上で、数値シミュレーション並びに模型船搭載による航走試験を実施し、基本性能の把握と実用化のめどを付けた。また、応用製品として水族館等のアミューズメント用人工魚を開発した。

2. システムの概要

振動翼を制御する際、振動翼運動パラメータを直接検出できない場合が多く、制御に使用するパラメータの選択や同定の問題が生じ、これに対処できる制御系の構築を行わなければならない。

本研究においては上記問題に対処すべく、模型船を利用してニューラルネットワーク学習制御⁽⁴⁾の適用を検討し、制御アルゴリズム構築及び制御コンピュータ内ソフト実装を行い、水槽での航走試験を実施した。

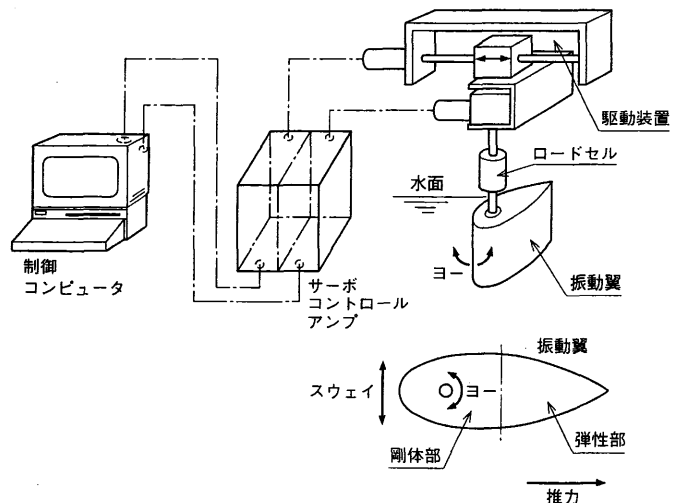


図1 試験装置概略
Test devices
振動翼の試験装置を示す。

今回開発した振動翼推進システム試験装置概略を図1に示す。

制御装置内にはニューラルネットワーク学習アルゴリズムを構築した。入力層、中間層、出力層の3層の階層ネットワークから構成した。Hess & Smith 法⁽⁵⁾を非定常問題に拡張し、さらに後流渦の変形を離散渦法⁽⁶⁾により解く方法を応用したモデルを使用して、シミュレーションにより入出力変数及び中間層ノード数の決定を行った。これから入力信号は船速・推進推力を、教師信号及び出力信号は振動周波数・位相角・スウェイ角・ヨー角振幅を与える形とし、中間層ノード数は誤差エネルギー関数とシステム簡易化の観点から4個とした。

また、2相制御発信器、AC サーボ制御アンプ、振動翼駆動装置及び流体力計測用小型3分力ブロックゲージを本試験のために設計、製作した。振動翼駆動装置はスウェイ方向駆動装置にヨー方向駆動装置を搭載してスウェイ方向運動とヨー方向運動を連動し

*1 エレクトロニクス技術部システム技術開発センター主査 工博

*2 長崎研究所制御システム研究室 工博

*3 長崎研究所船舶・海洋研究推進室主査 工博 三菱重工技報 Vol. 35 No. 2 (1998-3)

*4 技術開発室主査

て動かせるようにした。

3. 制御システムの構成

振動翼は、スウェイ運動とヨー運動の振幅、位相差及び振動周波数を変化させることにより作動させる。振動翼は剛体部と弾性部から構成され、弾性体のフレキシビリティにより推進効率を向上させている。制御コンピュータはニューラルネットワークソフトウェアとコマンドゼネレータとにより構成される。コマンドゼネレータは振動翼のスウェイとヨーの運動パラメータ指令値を与える。振動翼の運動パラメータの最適調整を航走試験等で行う間、ニューラルネットワークは教師データを取込みバックプロパゲーションを行う。バックプロパゲーションによるネット構成後、振動翼はニューラルネット制御のみにより作動し、ビークルを自航させることができる⁽⁷⁾。

4. シミュレーションによる検討

振動翼推進システムは、ビークル用アクチュエータとして使用する。本報ではビークルとして水上船舶に適用する。

サージ、スウェイ、ヨー方向の船体運動モデル⁽⁸⁾を構成し、振動翼運動モデルは図2に示すモデルを構築した⁽⁹⁾。船長3.5m、船幅0.5m、船体重量194kgの模型船に振動翼推進システムを搭載した場合について数値シミュレーションと水槽試験を実施した結果、図3に例を示すとおり、数値シミュレーションと水槽試験は振動特性の良い一致が得られた。これにより、例えば振動翼を複数個取付けたときの検討も含め、シミュレータによる運動性能の事例検討が可能となった。

5. 弾性振動翼推進装置の試作と試験

弾性振動翼推進装置を試作し、模型船搭載前に弾性振動翼推進装置のみによる単独試験を行い、振動翼形状及び弾性体の推進に

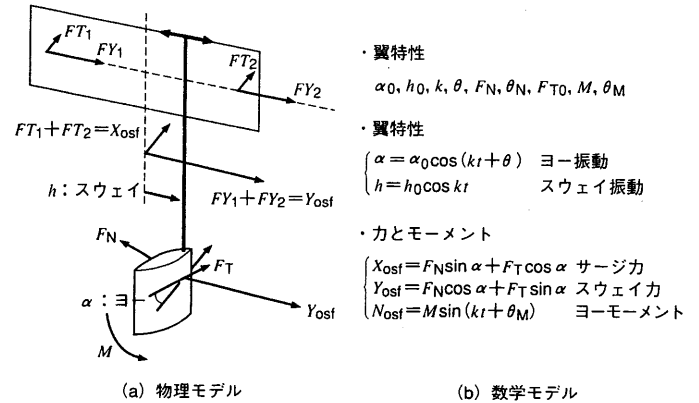


図2 振動翼モデル 数値シミュレーションに用いた振動翼モデルを示す。
Oscillating fin model

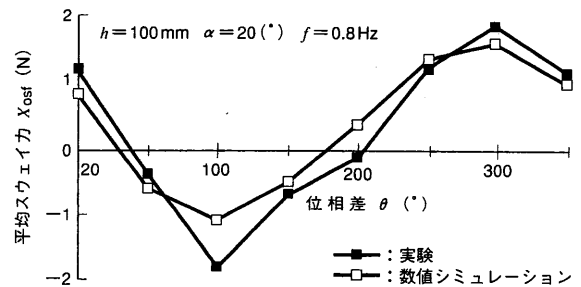


図3 数値シミュレーションと試験の比較 振動翼の数値シミュレーションと水槽での試験との比較を示す。
Comparison between simulation and experiment

及ぼす影響を調べた⁽¹⁰⁾。

表1に示すとおり、弾性部の弾性率や形状を変化させて数種類の振動翼のタイプを試験した。

表2は表1の振動翼タイプについてのパワー及び効率を示す。

表1 翼試験例
Test fin examples

タイプ	形状 (mm)	弾性部弾性率 (mm/N)	タイプ	形状 (mm)	弾性部弾性率 (mm/N)
A		—	D		40
B		7.3	E		3.3
C		10.3	F		9.7
			G		6.3

表2 翼タイプのパワー及び効率
Power and efficiency of fin type

タイプ	A	B	C	D	E	F	G
パワー P_0	0.318	0.323	0.302	0.353	0.330	0.278	0.333
効率 E_p	0.246	0.237	0.313	0.207	0.215	0.175	0.272

$$\text{パワー } P_0 = \omega/2 (h_a \cdot \psi \cdot F_1 \sin \theta - h_a \cdot F_n \sin \theta + \psi \cdot M_1 \sin \theta)$$

$$\text{効率 } E_p = T \cdot U / P_0$$

ここで, $\omega = 2\pi f$

f : 周波数 (Hz)

F_n : 翼直圧 (Pa)

h_a : スウェイ振幅 (m)

M_1 : 翼トルク (N·m)

ψ : ヨー角 (°)

T : 全体推力 (N)

F_1 : 翼推力 (N)

U : 速度 (m/s)

翼の弾性体の影響は最大推力を高め、推進効率はタイプ A とタイプ C との比較で分かるように剛体に比べ 27 % 以上向上する。また、魚のひれ形状の翼を用いることにより、同一面積のラダー形状の翼より総じて大きな推進力が得られることが分かった。

6. 模型船による水槽試験

振動翼推進装置を模型船に搭載し、水槽航走試験を実施した。水槽試験は、アクチュエータとしての推進特性の把握とニューラルネットワークのみによる自航能力の把握を目的としている。

図 4 に振動翼推進装置付き模型船を示す。コマンドゼネレータによる航走試験を実施している間にニューラルネットワーク制御用航走試験教師データが蓄積され、バックプロパゲーションによりニューラルネットワーク内の重みが決定される。次に目標値指令に基づきニューラルネットワーク内の順方向演算によって振動翼駆動指令信号が与えられ、模型船は航走する。

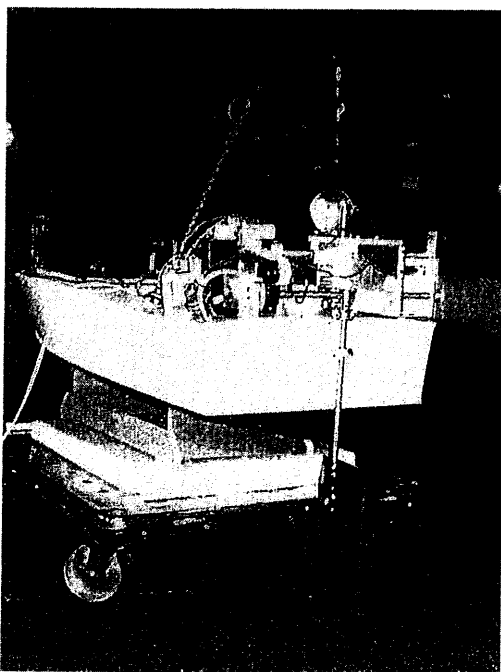
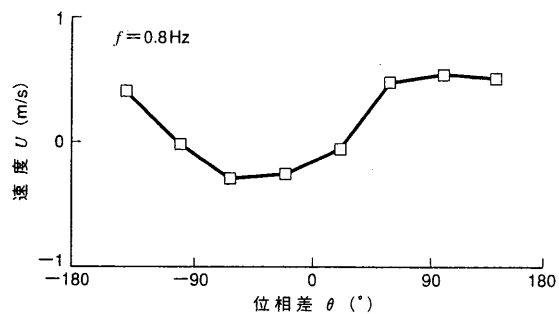


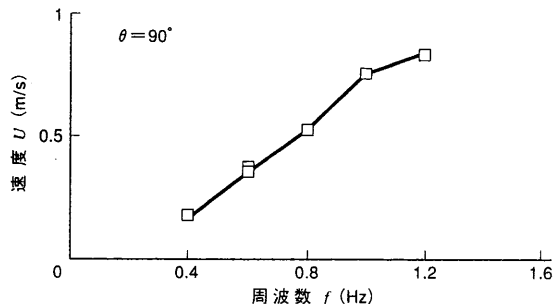
図4 振動翼推進装置付き模型船 応用製品として開発した振動翼推進装置付き模型船を示す。
Ship model with oscillating fin propulsion device

試験結果は次のとおりまとめることができる。

- (1) 振動翼単独試験結果により、振動翼から発生する平均推力はスウェイ運動とヨー運動の位相差約 90° で正方向最大推力を発生し、約 -90° で負方向最大推力を発生する。推力は位相角に関してほぼサインカーブ的に変化する。本例では、スウェイ振幅 100



(a) 振動翼付き船舶の位相差と速度との関係



(b) 振動翼付き船舶の振動周波数と速度との関係

図5 航走試験結果 振動翼推進装置付き模型船の航走試験結果を示す。
Cruising test result

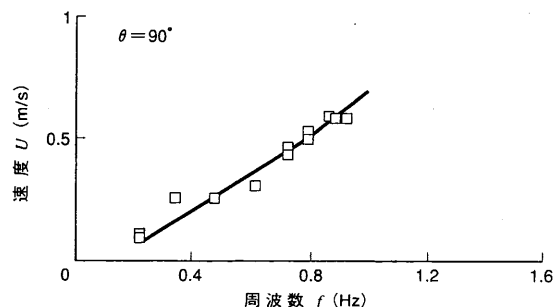


図6 航走試験結果 ニューラルネットワークを用いた振動翼推進装置付き模型船の自航試験結果を示す。
Cruising test result

mm, ヨー振幅 20°, 表 1 のタイプ A の振動翼を使用している平均推力は振動周波数、スウェイ振幅に比例して増加する。

- (2) 図 5 に示すとおり、位相角 90° 付近で 0.5 m/s の正方向船速、-90° 付近で 0.3 m/s の負方向船速が得られ、船速は、振動周波数に比例して増加する。例えば、振動周波数 1.2 Hz で船速は 0.8 m/s に達する。

- (3) ニューラルネットワークによる自航試験の結果、教師信号修得後任意の目標設定信号に対してインターポレーション機能による制御指令信号の演算が可能であることが分かった。

ニューラルネットワークによる自航試験の結果を図 6 に示す。ニューラルネットワークは振動翼付きビークルのモデル同定に対し有効である。他の船型⁽¹⁰⁾に対しても適用を実施し、有効性を確認している。ニューラルネットワークによりビークル適用へのはん用性が広がる。

- (4) 振動翼推進法により、スウェイ運動とヨー運動との位相角を変えるだけで、正方向から負方向への推力切換が可能となる。よって、ビークルの前後進の切換えがスムーズになることが分かった。

- (5) 表2の試験データが示すとおり、振動翼に弾性体を一部用いることにより、推進推力、効率が向上する。翼形状を改良することにより更に特性は改善できる。
- (6) 一つの振動翼推進システムにより、翼の中心角を変えることで旋回が可能である。よって、一つのアクチュエータで推進しながら旋回する機能を有する。
- (7) 振動翼を有するビークル数学モデルを構築し、試験結果とマッチングすることが分かった。

7. 人工魚への展開

弾性振動翼推進システムの基礎技術研究をベースに、同システムの応用製品として、図7に示す人工魚を開発した。本人工魚はバッテリーを内蔵し、水中無線情報通信による遠隔操作で三次元遊泳させることが可能である。

本人工魚は図8に一例を示すように、弾性振動翼推進により本物さながらのリアリティーの高い遊泳法を実現でき、水族館イベントホールや各種アミューズメントシステムへの適用が可能である。

8. ま と め

振動翼推進システムの利点は、次のようにまとめることができる。

- (1) スクリューによる回転巻き込みの危険性のない安全なアクチュエータである。
- (2) ニューラルネットワークにより様々な振動翼付きビークルへの同定が可能となる。システム適用のはん用性が改善される。
- (3) 振動翼運動の位相角を変えることにより正負方向への推進力切換えが容易となり、ビークルのホバーリング性が改善される。
- (4) 一つの翼で推力と方向を同時に制御できる、コンパクトなアクチュエータが実現される。
- (5) 翼のフレキシビリティをアクティブに活用することにより、推進性能が改善できる。
- (6) 翼を複関節構造にすることにより推進性能は更に改善できる可能性が高く、アクチュエータ作動面積を広くすることにより大きな翼での静かで穏やかな運動が期待できる。
- (7) 人工魚等に活用すれば、リアリティーに富んだ遊泳が可能となる。



図7 人工魚 無索三次元遊泳が可能な人工魚を示す。
Artificial fish

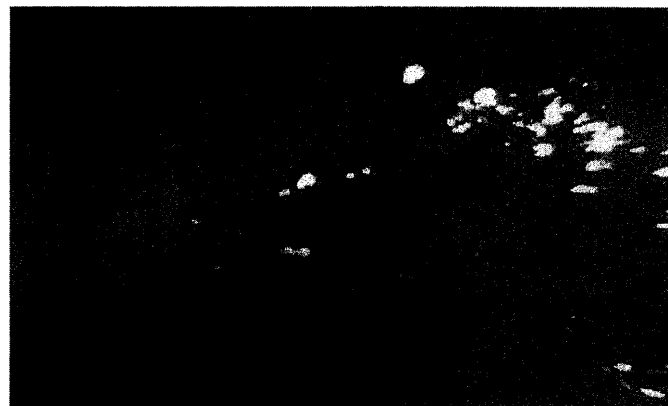


図8 人工魚遊泳状況 人工魚の水槽内遊泳状況を示す。
Artificial fish swimming view

以上を総括して、振動翼推進装置は、泥、ヘドロ水域や静粛性、低速航走性、ホバーリングが要求される水域のアクチュエータや水族館等のアミューズメント用人工魚のアクチュエータとして特に有効である。なお、本研究ではスウェイ運動とヨー運動を使った振動翼推進装置にて試験を行ったが、ヒープ運動とピッチ運動を使う方法でも同様の原理で推進可能である。

本研究の成果は、様々なビークル（船、潜水機器、人工魚、レジャー機器、水中監視ロボット）の推進器として広く適用を考え、製品展開を実施予定である。

参 考 文 献

- (1) 吉田, 船の科学, 講談社 (1976)
- (2) Hertel, H., Bidogy and Technology, Reinbold Publishing (1966)
- (3) 一色ほか, 振動翼推進の研究について, 日本造船学会論文集 第642号 (1983)
- (4) Rumelhart, D. E., Parallel Distributed Processing, The MIT Press Vol.1 (1996)
- (5) Hess, J. et al., Calculation of potential flow about arbitrary bodies, Plogress in Aeronautical Science Vol.8 (1966)
- (6) 久保田ほか, 弾性部を有する振動翼による推進に関する研究, 日本造船学会論文集 第156号 (1985)
- (7) Yamamoto, I. et al., Research on an oscillating fin propulsion control system, Proc. IEEE OCEANS 93 Vol.3 (1993)
- (8) 山本ほか, Design of a maneuvering control system for a ship, 西部造船会々報論文誌 第83号 (1994)
- (9) 山本ほか, 振動翼推進システムの開発研究, SICE 94 学術講演集 (1994)
- (10) Yamamoto, I. et al., Propulsion system with flexible/rigid oscillating fin, IEEE Journal of oceanic engineering Vol.20 No.1 (1995)