332 弾性平板を利用した水中推進機構における非定常環境下での進行波生成

Generation of traveling wave for aquatic propulsion using flexible plate under unstable circumstances

○学 久田 悠介 (山梨大院)
正 松村 雄一 (山梨大院)

北山 弘樹 (山梨大院)

Yusuke HISADA, University of Yamanashi, 4-3-11 Takeda, Kofu, Yamanashi, 400-8511 Japan

Hiroki KITAYAMA, University of Yamanashi

Yuichi MATSUMURA, University of Yamanashi

This study deals with the issue on active control of reflection waves to improve the efficiency of aquatic propulsion with an elastic plate. Especially, this study aims to generate the traveling wave under unstable circumstances. At first, active generation of traveling waves using velocity feedback control which detects the velocity on one end of a flexible plate was verified by numerical experiments based on a finite element model of a beam. The result shows the effectiveness of the method to various disturbances.

Key Words: Wave, Vibration of Continuous System, Active Wave Control, Traveling Wave, Wave Reflection

A1. 緒 言

水中の弾性平板に進行波を発生させて推進する機構において、境界での反射を抑制し、定在波の発生を抑える手法を適用する際の課題を解決することを目指している。本研究では振動板の終端での速度を検知し、固有インピーダンスとの積をフィードバックする手法により進行波を生成する。さらに、将来的に船舶などの推進機構として応用することを主眼に置き、水温の変化や潮流などによる非定常環境下での進行波生成をシミュレーションにより検証する。

A2. 進行波生成理論

はりの固有インピーダンス Z_F が既知の場合に、振動板の終端ではりの横方向の速度を検知し、インピーダンス整合が成立するような加振力を与えることにより進行波を生成する手法を示す。振動板の終端 $x=L$ におけるせん断力のインピーダンス整合を成立させるべき終端 $x=L$ での制御力 $f(L,t)$ は、インピーダンスの定義に従えば、次式で表せる。

$$f(L,t) = Z_F \cdot v(L,t) \quad \text{.....(A1)}$$

制御力の算出は、前端での正弦波状駆動力の周波数を既知とした上で、時刻 t における終端 $x=L$ でのはりの速度を検知することで可能となる。固有インピーダンスと速度の積をフィードバックすることで、進行波生成が可能となる。ここに、はりの固有インピーダンスは次式で表される。

$$Z_F = \frac{EI k^3}{\omega} \quad \text{.....(A2)}$$

A3. シミュレーション

ばね用りん青銅 C5210 の弾性振動板 (300×45×0.3mm) の有限要素モデルに、周波数 2.5Hz、振幅 1N の正弦波状駆動力を与えてシミュレーションを行った。定常環境下での速度フィードバック制御による進行波生成の可否を確認した結果を Fig.A1 に示す。曲げモーメントのインピーダンス整合を無視し、せん断方向の制御力を式(A1)に従って与えるだけでも進行波が支配的な状態を生成できた。次に、駆動力に周波数 20Hz、振幅 0.5N の外乱を付加した際のシミュレーション結果を Fig.A2 に示す。外乱を与えても、比較的良好な制御が実現されている。Fig.A3 は、与えられた駆動力と制御力、および両端での変位と速度である。Fig.A3(f)には、ローパスフィルタを用いた実用微分によって計算された速度も示す。フィルタの影響により実際の速度より約 10° 位相が遅れているが、ほぼ実際と同じ速度を推定できている。この結果、2.5Hz 成分に対しては必要な制御力が付加され、駆動周波数より高周波側の外乱に対し

ては、固有インピーダンスの周波数依存性に従って、外乱抑制に必要な制御力の三割程度の制御力が付加されることで、進行波が支配的な状態を維持できた。

Fig. A1 Generated wave by velocity feedback control (without disturbances)

Fig. A2 Generated wave by velocity feedback control (with disturbances)

Fig. A3 Applied forces and observed responses

1. 緒 言

本研究では、水中の弾性平板上に進行波を発生させて推進する機構の効率改善のため、境界での反射を抑制し、定在波の発生を抑える手法を適用する際の課題を解決することを目指している。

これまでに、振動板に進行波を発生させて推進する機構により、従来のスクリーブローパに代わる新たな水中推進機構の開発を主題とした研究が数多く行われている。このような研究は、Hertel⁽¹⁾の進行波推進船 TUB-TUB 号に始まるとされる。これ以降、進行波推進に関する研究は、国内に散見される。特に、渡辺ら⁽²⁾⁽³⁾は、振動板に進行波を生成して推進する機構において水中での実験を通して、推進効率の低下は境界での反射による定在波の発生に起因していることを明らかにした。

著者らは、境界での反射による定在波の発生を抑制することで、進行波推進の効率を向上させることに取り組んできた。これまでに、弦における進行波生成理論に基づき、水中に置かれた弾性平板の両端に張力をかけた実験装置においてフィードフォワード型進行波生成制御に成功した⁽⁴⁾。しかし、本構造を実際に船舶などに応用する場合、張力を必要とする構造は船体に負荷を与えるため適さない。また、フィードフォワード型制御は予測される波動に対応した制御である。海や川などの自然水域での波浪や潮流は、外乱として作用し、振動板の駆動、制御点間の波動を不規則に変化させるため、適用できない可能性がある。

本論では、張力を必要としないシンプルな構造が船舶には有効と考え、はりにおける進行波生成⁽⁵⁾の実現を目指す。また、非定常環境に適応する手法としてフィードバック型進行波生成手法を採用する。本手法は、振動板の終端での速度を検知し、固有インピーダンスとの積をフィードバックすることで進行波生成に必要な制御力を与える。しかしながら、固有インピーダンスは周波数依存の特性を有し、正弦波状駆動力の周波数をパラメータに持つことから、任意の外乱に対して有効とは限らない。そこで、非定常環境下における進行波生成の基礎研究として、固有インピーダンスをフィードバックゲインとする速度フィードバック制御の可否を波動シミュレーションにより検証する。

2. 従来の研究成果

著者らがこれまでに行った研究の成果を説明する。Fig.1 に使用した実験装置を示す。水中には、水面と平行に弾性平板を置き、2本のレールで空中の船体を吊る。平板の両端にアクチュエータ（ボイスコイルモータ：VCM）を取り付け、張力が振動板の弾性よりも優位に働くようにして弾性平板とアクチュエータの軸を取り付けた。実験では、ばね用りん青銅 C5210 の 300×180×0.1mm の板を使用し、弦のインピーダンス整合を利用したフィードフォワード型の進行波生成制御により、静水中という条件下で弾性平板上に進行波生成が可能であることを示した。Fig.2 は進行波生成に成功した際の連続写真である。波動が時間と共に図中の右方向に移動する様子がわかる。また、進行波生成に必要な、両端に与える駆動力と制御力間の位相差は、Fig.3 に示す通りであった。本図より、波数の推定式は $k=0.59\omega$ と同定された。さらに、波動の距離減衰を考慮した複素波数を同定するため、Fig.4 に示すように、進行波生成に成功した際の駆動力と制御力の振幅比を明らかにした。本図から、駆動力が大きく、振動板の振幅が大きくなるほどに、波動の減衰量も増加し、終端に到達する波動の振幅が小さくなることから、駆動力に比べた制御力の振幅は小さくてよいという振幅依存性を有することを示した。

Fig. 1 Experimental apparatus

Fig.2 Traveling wave in stationary water

Fig.3 Phase shift between control and driving force

Fig.4 Amplitude ratio between control and driving force

3. 制御理論

3・1 速度フィードバック制御 はりの固有インピーダンス Z_F が既知の場合に、振動板の終端でのはりの横方向の速度を検知して、インピーダンス整合が成立するような加振力を与えることにより進行波を生成する手法を示す。

振動板の終端 $x=L$ におけるせん断力のインピーダンス整合を成立させるべき終端 $x=L$ での制御力 $f(L,t)$ は、インピーダンスの定義に従えば、次式で表せる。

$$f(L,t) = Z_F \cdot v(L,t) \quad \dots\dots\dots (1)$$

制御力の算出は、前端での正弦波状駆動力の周波数を既知として時刻 t における終端 $x=L$ でのはりの速度を検知することで可能となる。固有インピーダンスと速度の積をフィードバックすることで、進行波生成が可能となる。

3・2 固有インピーダンス 曲げ剛性 EI 、線密度 ρA の一様なはりの曲げ波の運動方程式は次式のように表せる。

$$\rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} = 0 \quad \dots\dots\dots (2)$$

この波動方程式の一般解は次式の進行波である。

$$w(x,t) = (C_1 e^{-jkx} + C_2 e^{jkx} + C_3 e^{-kx} + C_4 e^{kx}) e^{j\omega t}$$

駆動点での機械インピーダンスは、終端に作用する外力を $f(0,t) = F_0 e^{j\omega t}$ として与えると次式で表せる。

$$Z = \frac{f(0,t)}{w(0,t)} = \frac{F_0}{j\omega(C_1 + C_2 + C_3 + C_4)} \quad \dots\dots\dots (3)$$

また、終端に作用する力は終端でのはりのせん断力とつりあうので次式となる。

$$EI k^3 (jC_1 - jC_2 - C_3 + C_4) = F_0 \quad \dots\dots\dots (4)$$

固有インピーダンスの無反射条件 ($C_2 = C_3 = C_4 = 0$) を与えると、式(3)、(4)により固有インピーダンスは次式で表せる。

$$Z_F = \frac{EI k^3}{\omega} \quad \dots\dots\dots (5)$$

ここに k は波数である。水中において体積密度 ρ には水の付加質量効果を考慮する必要がある。

4. 数値実験による検証手法

ばね用りん青銅 C5210 の弾性振動板 (300×45×0.3mm) の有限要素モデルを対象に、進行波生成制御時の波動運動シミュレーションを行った。本論では、水の付加質量効果はこれまでの実験により推定した $9.55 \times 10^4 \text{ kg/m}^3$ とする。Fig.5 には式(5)を用いて、上記の弾性平板に対して計算された固有インピーダンスの周波数特性を示した。はりのせん断力方向の固有インピーダンスは、波動の周波数の平方根に依存して変化する。固有インピーダンスの値を、速度フィードバックゲインとしてみた場合、駆動周波数より低周波側には大きめの制御力を与え、高周波側には制御力が不足することがわかる。

Fig.5 Frequency response of characteristic impedance

弾性平板の境界条件は両端自由とした。両端にはせん断方向の力を与えた。左端を駆動力、右端を制御力とする。なお、今回の数値実験においては、実機において実現が難しいとされる曲げモーメントの付加を避け、せん断力方向の駆動力と制御力だけを利用した進行波生成制御について検討する。以下、質量、剛性、減衰をはり要素の行列で構成し、得られた多自由度系の運動方程式の状態空間表現に対して数値積分を行うことで、シミュレーションする手法を示す。

4・1 運動方程式の状態空間表現 物理座標における多自由度系の運動方程式は次式で表される。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + Kx = f \quad \dots\dots\dots (6)$$

ここに、 M 、 C 、 K はそれぞれ質量行列、減衰行列、剛性行列である。変位ベクトル u 、速度ベクトル v を以下のように定義する。

$$\begin{cases} u = x \\ v = \dot{x} \end{cases}$$

このとき、式(6)は、次の連立1階微分方程式として表せる。

$$\begin{cases} \dot{v} \\ \dot{u} \end{cases} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}C \end{bmatrix} \begin{cases} u \\ v \end{cases} + \begin{bmatrix} 0 \\ M^{-1} \end{bmatrix} f \quad \dots\dots\dots (7)$$

4・2 質量マトリクス、剛性マトリクス はりの曲げ振動における要素質量マトリクス、要素剛性マトリクスをはりの体積密度 ρ 、断面積 A 、曲げ剛性 EI 、要素の長さ L を用いて次のように表す。なお、今回の数値実験では、構造減衰、水中における距離減衰効果は考慮しない。

$$M = \frac{\rho AL}{420} \begin{bmatrix} 210 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & L^2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 210 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & L^2 \end{bmatrix}, K = \frac{EI}{L^3} \begin{bmatrix} 12 & -6L & -12 & -6L \\ 0 & 4L^2 & 6L & 2L^2 \\ -12 & 6L & 12 & 6L \\ 0 & 0 & 0 & 4L^2 \end{bmatrix}, C = [0]$$

4・3 速度フィードバック Fig.6 に速度フィードバック制御のブロック線図を示す。振動板の終端の変位を検知し、微分することで速度を得る。この速度に固有インピーダンスを乗じたものを制御対象 P にフィードバックする。 f_0 は駆動力である。微分時の高周波ノイズを除去するため2段のローパスフィルタを付加した。Fig.7 にはローパスフィルタの周波数特性を示す。シミュレーションでは駆動周波数を 10Hz までと考えた。この帯域ではゲインがほぼ 0dB と

Fig.6 Velocity feedback control

Fig.7 Frequency characteristics of low pass filter

なり、位相遅れも生じさせないようなフィルタを設計した。Fig.7 からわかるように、10Hz でのゲインはほぼ 0dB、位相は約 10° の遅れである。

5. 非定常環境下での進行波生成

5・1 定常環境下での進行波生成 定常環境下での速度フィードバック制御による進行波生成の可否を確認した。Fig.8 にシミュレーション結果を示す。駆動力としては、はりの左端に正弦波状の加振力を与え、その周波数は 2.5Hz、振幅は 1N とした。また、サンプリング周波数 50kHz で解析した。Fig.8 より、せん断方向の制御力を式(1)に従って与えるだけでも進行波が支配的な状態を生成できることがわかる。しかし、完全な純粋進行波は生成されていない。これは、はりと見なせる構造物である振動板において純粋進行波を生成するには、曲げモーメント側のインピーダンス整合制御も行う必要があることに起因すると考えている。

5・2 観測ノイズの影響 速度フィードバック制御を実機で行う場合には速度をセンシングする技術が必要である。しかしながら、流通している速度センサは、レーザードップラー振動計などの高価なものしかない。そこで、4・3 節に示したとおり、本論では、変位を検知し、時間で微分することで速度を推定する手法を採用した。微分は高周波ノ

イズを増幅するので二段のローパスフィルタを導入したが、その影響は未知である。そこで本節では、変位計測時に観測ノイズが含まれた際の進行波生成シミュレーションを行った。

Fig.9 にシミュレーション結果を示す。観測ノイズとして、変位応答に分散 1×10^{-6} の正規分布白色雑音を加えた。Fig.9 より、観測雑音を加えても、進行波が支配的な状態を良好に実現できていることがわかる。Fig.10 には観測ノイズを付加した場合と付加しない場合それぞれに観測された変位、速度を示す。実線はノイズなし、破線はノイズ付加とした場合を示す。Fig.10 の上段より、観測ノイズの大きさは、実変位の 0.01 倍程度存在することがわかる。Fig.10 の下段より、変位を速度に変換する際に観測ノイズが増大していることがわかる。しかしながら、今回のローパスフィルタによって微分時の高周波ノイズの増幅をある程度抑制しているので、実際の変位と比べても大きな誤差なく速度を推定できていることがわかる。この結果として、速度と固有インピーダンスを乗じることで得られる制御力は、観測ノイズがない場合とほぼ同じように計算され、Fig.9 に示すとおりの進行波生成が実現された。

5・3 外乱の影響 自然水域では波浪や潮流により与えられる外乱により、振動板上の波動には駆動周波数以外の種々の周波数成分が混在すると予測される。しかしながら、固有インピーダンスは周波数依存の特性を有し、正弦波状駆動力の周波数をパラメータに持つことから、任意の外乱に対して有効とは限らない。以下、外乱への有効性を検証する。

正弦波状駆動力に、異なる周波数の正弦波状外乱を加えた際の進行波生成シミュレーションを行った。本シミュレーションでは、船舶が高速で推進する際に波浪等の影響が、断続的に入力され、ある周波数の正弦波状外乱として加わった場合を想定した。ここでは、周波数 20Hz、振幅 0.5N の正弦波加振力を加えた。結果を Fig11 に示す。また、こ

Fig.8 Generated wave by velocity feedback control (without any observation noise and disturbances)

Fig.9 Generated wave by velocity feedback control (with observation noise)

Fig10 Displacement and velocity responses at $x=L$

Fig.11 Generated wave by velocity feedback control (with disturbances)

Fig.12 Applied forces and observed responses

のときの(a)駆動力, (b)制御力, (c)駆動点変位, (d)制御点変位, (e)駆動点速度, (f)制御点速度を Fig.12 に示す. Fig.11 から, 完全な節が現れず, 進行波を生成できていることが確認できる. いま, 固有インピーダンスは駆動周波数の 2.5Hz で設計しているので, Fig.5 によれば, 20Hz の外乱のためのフィードバックゲインは, 必要な値の三分の一であることがわかる. これにより, 駆動周波数成分の波動に関しては, せん断方向に限って, 完全な反射波抑制制御が実現される一方で, 外乱に対しては, 反射波抑制に必要な制

Fig.13 Estimation error of characteristic impedance

Fig.15 Control force and displacement

御力の三分の一だけが付与されている. これにより, 外乱に対してもある種のダンパ力が少しだけ与えられることで, その影響が抑えられるだけの状況と考えられる. このとき, 外乱による不安定な状況は発生せず, ほぼ所望の進行波生成が維持される.

5・4 固有インピーダンスの推定誤差の影響 式(5)から計算される固有インピーダンスは, 水の付加質量効果の同定結果に大きな影響を受ける. 水の付加質量効果には, 振幅依存性や周波数依存性などの非線形性の影響が強く, その同定誤差は簡単に 10 倍にまで達する. そこで, 固有インピーダンスに推定誤差を与えた際の進行波生成をシミュレーションにより検証する. 固有インピーダンスを本来の 10 倍, 0.1 倍に設定した場合の結果を Fig.13 に示す. Fig.13 の(a), (b)共に節が現れ, 定在波が発生していることが確認できる. Fig.14(a), (b)には, このときの制御力, 制御点変位を示す. Fig.14(a)より, 10 倍の固有インピーダンスを利用すると, フィードバックゲインが 10 倍になることで, 必要な制御力の 10 倍の力を与えることになる. このとき, あたかも制御力が固定端を形成したようになり, Fig.13(a)に示すような, 右端変位 0 の定在波を得る. 一方, Fig.14(b)より, 0.1 倍の固有インピーダンスを利用すると, 必要な制御力の 0.1 倍の力しか与えられないことになる. このとき, 右端が自由端を形成したようになり, Fig.13(b)に示すような右端変位の大きな定在波を得る. 以上より, 本制御において, 水の付加質量効果の同定は, 極めて重要な予備実験となることがわかる.

5. 結 論

本研究では, 水中で弾性平板上に進行波を生成して推進する機構において, 非定常環境下に対処するために速度フィードバック制御を利用することの可否を検証した. 得られた成果を以下に示す.

- (1) 振動板の終端での速度を検知し, 固有インピーダンスに乗ずるフィードバック制御により進行波を生成できる.
- (2) システムに多少の観測ノイズが含まれても, 実用微分により対応できる.
- (3) 基本的には, 制御力を付加する位置と応答を計測する位置が同じ場合での直接速度フィードバックであるので, 外乱に対しても不安定にならない.

謝 辞

本研究は, 科学研究費補助金 (課題番号 22560219) の助成を受けたものである. ここに記して謝意を表する.

文 献

- (1) Hertel, H., "Structure, Form and Movement", Van Nost. Reinhold, U.S., (1967).
- (2) 渡辺昌宏・林健一・村松功一・小林信之・酒井高章, 柔軟な魚の尾ひれの運動をモデルにした弾性平板の進行波的波動運動による推力特性, 機論, C 編, Vol. 67, No.655, (2001), pp.682-690.
- (3) 渡辺昌宏・村松功一・小林信之, 柔軟な魚の尾ひれの波動運動を利用した魚型水中ロボットの推進性能, 機論, C 編, Vol. 68, No.665, (2002), pp.188-196.
- (4) Yusuke Hisada, Yuichi Matsumura and Hironori Natori, "Active Generation of Traveling Wave for Aquatic Propulsion", Proc. of the Japan-Korea Joint Symposium on Dynamics and Control 2009, pp.187-190.
- (5) 田中信雄・菊島義弘, 柔軟ばりの曲げ波制御に関する研究 (アクティブ・シンク法の提案), 機論, C 編, Vol. 56, No.522, (1990), pp.95-103.