

風外乱補償機能を付加した船舶操縦運動の学習型 フィードフォワード制御方式の基礎検討

正員 小川原 陽 一* 正員 岩 本 才 次*
吉 村 学**

Basic Study on the Compensation Control System of the Wind Disturbance Influence to
the Ship Manoeuvring Motion with the Learning Feed-Forward Control

by Yoichi Ogawara, *Member* Seiji Iwamoto, *Member*
Gaku Yoshimura

Summary

Recently optimal regulator theory has been applied to the control of the manoeuvring motion of a ship. But it needs accurate mathematical model of the controlled object and it has not sufficient controllability to the nonlinearity of the controlled object. By these reason it was tried by one of authors to apply the *Learning Feed-Forward Control* (LFFC) system to the follow-up control to the desired value for the ship manoeuvring motion. The LFFC system is a kind of the neural network model. It is not a multi-layered perceptron type but a kind of an adaptive filter, and it has a dynamic quality. The system is tuned with the feedback-error-learning method proposed by Kawato and others. It was recognized that the LFFC system had a good controllability and the problem in the optimal regulator system mentioned above was solved.

The servo mechanism needs both an ability of the follow-up control to the desired value and that of the compensation of the influence from the disturbance. So in this paper it is tried to apply the LFFC system to the compensation of the influence from the disturbance to the ship manoeuvring motion. And for the basic study the following case is investigated with the computer simulation. That is, the heading angle of the ship is controlled with the bow thruster in the wind disturbance.

It becomes clear that the system has a good controllability to the compensation of the influence from the disturbance due to the self-tuning ability and a feed-forward loop.

1. 結 言

ケーブル敷設船, 狭水路航行船舶あるいは接岸しようとする船舶などは, 高精度のきめ細かい操縦運動の制御が要求される。従来, 船舶の操縦運動の制御方式としてPIDフィードバック制御方式や最適レギュレータによる制御方式が考えられている。しかし, PID制御方式は多変数制御系の系統的設計が困難であり, 最適レギュレータによる制御方式は, 設計時に正確な数学モデルが必要なことや操縦運

動の非線形性に対する対応が不十分である等種々の問題点がある。

最近, このような問題点に対する一方策として, 人間の持つ高度の脳機能を模擬することにより, 上記の問題点を克服しようとする試みがなされている。筆者の一人は, 人間の小脳の運動学習機能を工学的に模擬した学習型フィードフォワード制御方式を用いて, 船舶の操縦運動の目標値追従制御について検討し, 学習型フィードフォワード制御方式が, 従来の制御方式の抱える問題点を解消する優れた方式であることを明らかにした^{1),2)}。

制御システムに要求されるもう一つの機能は, 外乱に対する補償機能である。船舶の操縦運動の制御においては, 風, 潮流, 波などを外乱として受け, これらに対する補償機能がその制御システムに要求されることになる。そこで, 本研究はこれまで目標値追従制御に対して優れた制御性を

* 九州大学工学部

** 川崎重工業(株)

原稿受理 平成7年7月6日

秋季講演会において講演 平成7年11月16, 17日

有することが確かめられている学習型フィードフォワード制御方式の考え方を外乱補償制御に応用することと、その補償制御性について検討したものである。

ここでは、そのための基礎検討として、まず外乱として風が吹いているときにバウスラスタによって回頭角の制御を行う場合を取り上げている。

2. 学習型フィードフォワード制御方式による外乱補償

2.1 目標値追従制御に対する学習型フィードフォワード制御方式

学習型フィードフォワード制御方式は、川人³⁾等によって提案された人間の小脳の運動学習機能を工学的に模擬した逆システムの内部モデルに含まれる結合係数（シナプス荷重）を、フィードバック誤差学習法によって調整する階層制御方法であり、目標の制御量を実現する操作量を直接操作部に加えるフィードフォワード制御方式である。本論で用いられる学習方程式は、従来の学習方程式に改良を加え結合係数の高速学習が実現されている²⁾。

本制御システムにおいては制御対象の正確な数学モデルを必要としないため、逆システムは船舶の操縦運動の単純化された線形運動方程式よりいわゆる逆伝達関数を求めて使用している。バウスラスタによって回頭角を制御する場合の逆システム、すなわち目標回頭角 $\Psi_d(s)$ から所要バウスラスタ推力 $T'_{BFF}(s)$ に対する逆伝達関数は結合係数を用いて次式のように与えられる。

$$T'_{BFF}(s) = \frac{1}{Ls+M} [w_1 \cdot s^3 + w_2 \cdot Js^2 + w_3 \cdot Ks] \Psi_d(s) \quad (1)$$

(1)式は3つの項の和で表され、それぞれ逆システム内の、サブシステム1, 2, 3となる。ただし、 L, M, J, K は線形の操縦運動方程式の各係数から構成される定数である。結合係数は学習の高速化のために、いわゆる比例項を導入した次の学習方程式によって求められる。

$$w_i = w \int y_i \cdot T_{BFB} dt + w_p \cdot y_i \cdot T_{BFB} \quad (2)$$

ただし、 w と w_p は適当に決定される係数であり、 y_i はサブシステムの出力である。このようにして求められた目標値追従を行う学習型フィードフォワード制御システムを、ここでは LFFCD (Learning Feed-Forward Control System for Follow-UP Control to Desired Value) と呼ぶことにする。バウスラスタによって回頭角を制御する場合の LFFCD を Fig. 1 に示す。

2.2 学習型フィードフォワード方式の外乱補償への応用

前述したようにここでは、バウスラスタによって回頭角を制御する場合に、風外乱に対する補償を例として取り上げ、そのシステムを次のように構成する。まず、船上で船体に対する相対風速と相対風向を測定し、適当な方法によって風が船体におよぼす力とモーメントを推定する。そして、その力とモーメントによって船体に生ずるであろうと予想される回頭角を補償すべきバウスラスタの推力を求め、フィードフォワード信号としてバウスラスタに加える。このとき、推定された風外乱により必要なバウスラスタ推

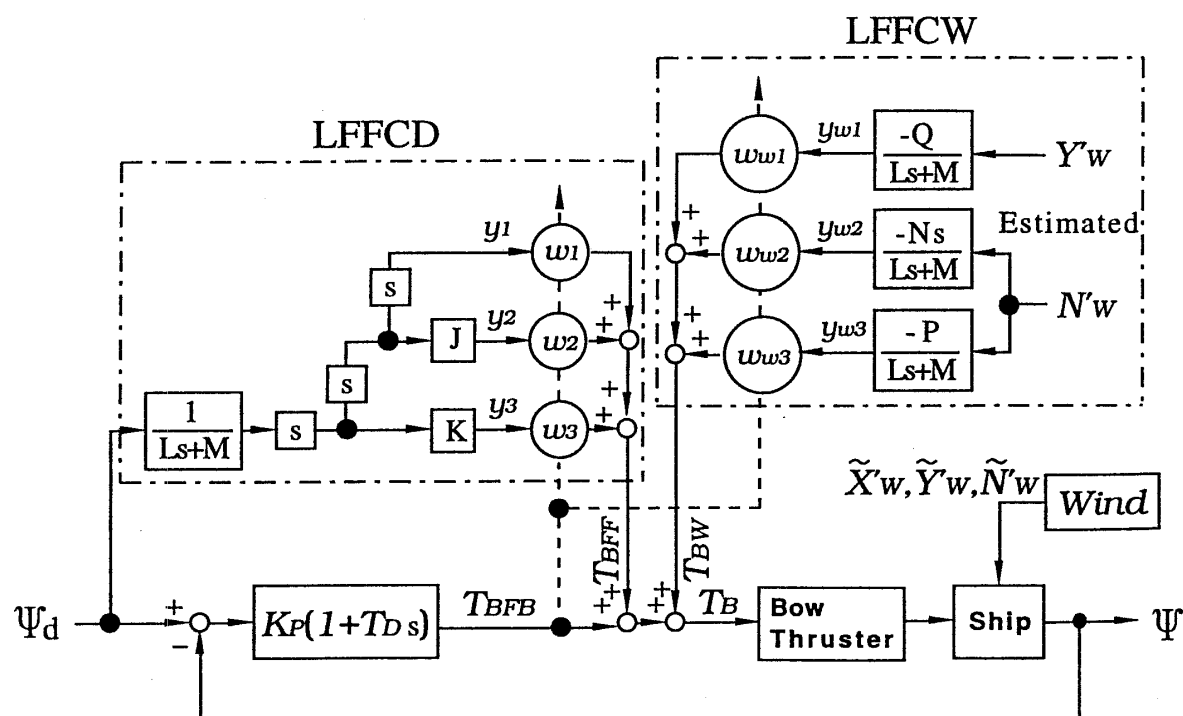


Fig. 1 Block diagram of LFFCD and LFFCW

力を求める補償モデルは、LFFCD のときと同様に簡単な線形運動方程式より求め、いくつかのサブシステムに分けて、各サブシステムの出力に結合係数（シナプス荷重）を乗じて、それをフィードバックコントローラの出力が 0 になるようにフィードバック誤差学習法によって調整することにする。この場合の制御システムを Fig. 1 に示すように LFFCW (Learning Feed-Forward Control System for Compensation of Wind Disturbance) と呼ぶことにする。結合係数の学習方程式は LFFCD のときと同様に比例項を付加して学習の高速化をはかることとする。

3. 船舶の操縦運動に対する風による外乱の影響

3.1 船舶の操縦運動方程式

船舶の操縦運動は、ここでは風外乱がある場合を取り上げる。Fig. 2 に示す座標系における無次元化された船舶の操縦運動方程式は次式で与えられる⁴⁾。

$$(m' + m'_x) \left(\frac{L}{U} \right) \left(\frac{\dot{U}}{U} \cos \beta - \dot{\beta} \sin \beta \right) + (m' + m'_y) r' \sin \beta = X' \quad (3)$$

$$-(m' + m'_y) \left(\frac{L}{U} \right) \left(\frac{\dot{U}}{U} \sin \beta + \dot{\beta} \cos \beta \right) + (m' + m'_x) r' \cos \beta = Y' \quad (4)$$

$$(I'_{zz} + i'_{zz}) \left(\frac{L}{U} \right)^2 \left(\frac{\dot{U}}{L} r' + \frac{U}{L} \dot{r}' \right) = N' \quad (5)$$

ただし、添え字 “'” は無次元化を表し、 U は船速、 β は横流れ角、 r は回頭角速度である。また、 m は船体の質量、 m_x 、 m_y はそれぞれ x 、 y 軸方向の付加質量、 I_{zz} 、 i_{zz} はそれぞれ z 軸回りの船体の慣性モーメントおよび付加慣性モーメントである。

船体に働く外力およびモーメントはいわゆる MMG モ

デルに従い次式のように仮定する。

$$X' = X'_H + X'_P + X'_R + X'_W \quad (6)$$

$$Y' = Y'_H + Y'_R + T'_B + Y'_W \quad (7)$$

$$N' = N'_H + N'_R + x'_B T'_B + N'_W \quad (8)$$

ここで、 X 、 Y はそれぞれ船体の x 軸方向および y 軸方向に働く外力、 N は船体重心回りに働く回頭モーメントである。添え字の H 、 P 、 R 、 B 、 W はそれぞれ船体、プロペラ、舵、バウスラスタ、風を表す。 x_B はバウスラスタの設置位置を表す。

3.2 風外乱の取り扱い

風によって船体に働く風圧力および風圧モーメントの推定は Isherwood⁵⁾の簡易推定式を用いて行う。Fig. 2 に示すような座標系を採用しているため、船体に働く風圧力および風圧モーメントは次式によって求められる。

i) x 軸方向の風圧力 (x 軸の正方向が正)

$$X'_w = \frac{\frac{1}{2} \rho' V_R^2 A_T C_x}{\frac{1}{2} \rho L d U^2} = \frac{\rho'}{\rho} \frac{A_T}{L d} \frac{V_R^2}{U^2} C_x \quad (9)$$

ii) y 軸方向の風圧力 (y 軸の正方向が正)

$$Y'_w = \frac{\frac{1}{2} \rho' V_R^2 A_L C_y}{\frac{1}{2} \rho L d U^2} = \frac{\rho'}{\rho} \frac{A_L}{L d} \frac{V_R^2}{U^2} C_y \quad (10)$$

iii) $L_{OA}/2$ 回りのモーメント (近似的に重心回りのモーメントとし、回頭角 ϕ と同じ向きを正)

$$N'_w = \frac{\frac{1}{2} \rho' V_R^2 A_L L_{OA} C_n}{\frac{1}{2} \rho L^2 d U^2} = \frac{\rho'}{\rho} \frac{A_L}{L d} \frac{L_{OA}}{L} \frac{V_R^2}{U^2} C_n \quad (11)$$

ただし、 ρ' : 空気の密度、 ρ : 海水の密度、 A_T : 吃水線上の船の正面投影面積、 V_R : 相対風速、 A_L : 吃水線上の船の側投影面積、 L_{OA} : 船の全長 ($\approx L = L_{PP}$)

3.3 風外乱補償システム

風外乱補償システムが発生するバウスラスタの推力は、前述のように伝達関数を用いて風外乱による船の回頭角とバウスラスタ駆動による船の回頭角が、互に打ち消し合うという条件に基づいて求め、それにさらに結合係数を導入して次式で与えられる。

$$T'_{BW}(s) = -\frac{1}{Ls + M} [w_{w1} \cdot Q \cdot \Delta Y'_w(s) + (w_{w2} \cdot Ns + w_{w3} \cdot P) \cdot \Delta N'_w(s)] \quad (12)$$

ここで、 L 、 M 、 Q 、 N 、 P は (3)、(4)、(5) 式を線形化して得られる線形の操縦運動方程式の各係数から構成される定数である。また、(12) 式は 3 つの項の和で表され、それぞれサブシステム 1、2、3 となる。この場合のシステム構成を Fig. 1 に示す。

結合係数に関する学習方程式は (2) 式と同様に、学習の高速化を計るため比例形の項を付加した次式を用いる。

$$w_{wi} = w_w \int y_{wi} \cdot T_{BFB} dt + w_{wp} \cdot y_{wi} \cdot T_{BFB} \quad (13)$$

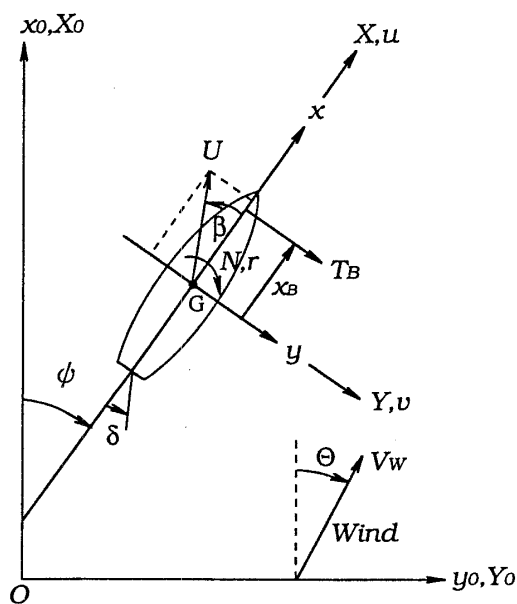


Fig. 2 Coordinate systems

ただし, w_w と w_{wp} は適当に決定される係数であり, y_{wt} はサブシステムの出力である。(2)式と(13)式で表される学習方程式を用いて学習を行うと, バウスラスタへの入力信号 T_B と逆システムからの出力信号 ($T_{BFF} + T_{BW}$) との差, つまり, 誤差信号 T_{BFB} の2乗平均値

$$E\{[T_B - (T_{BFF} + T_{BW})]^2\} = E[T_{BFB}^2] \quad (14)$$

が最小となるように結合係数を修正していき, 結合係数がほぼ収束したところで学習を終了する。すなわち, 学習の進行とともに制御の主体はフィードバック制御系からフィードフォワード制御系に移行していき, フィードフォワード制御系に制御対象の逆システムおよび補償システムが形成され, そこから目標値を実現するための出力が得られるようになる。

4. 計算機シミュレーションによる制御性の検討

4.1 対象船とシミュレーション条件

計算対象船は, 船長 175 m のコンテナ船である。その主要目を Table 1 に示す。初期船速は $V_s = 1$ kt, 舵角は常に $\delta = 0$ deg で舵による回頭角制御は行わない。バウスラスタの最大推力は 20 ton, 最大推力増加率は 20/23 (ton/sec) であり, 作動時の動作遅れは無視できるものとする。

制御量は船の回頭角, 操作量はバウスラスタ推力である。外乱は風とする。風は時刻 $t = 0$ sec において風速 $V_w = 15$ kt でステップ状に突然吹くものとする。

4.2 風外乱の推定

Isherwood の表現法にしたがって, 風外乱によって対象船に働く風圧力および風圧モーメントの各係数を求めたものを Fig. 3 に示す。実線は計算対象船の模型船による実験値⁶⁾で, 破線は Isherwood の簡易式で推定された値である。Isherwood が与えた簡易式を持つ推定誤差範囲の上限と下限を点線で示している。実験値が簡易式による推定値の誤差範囲を越えるところが一部にあるものの, 定性的によく一致しており, 本論で用いる制御方式の特徴を考えるとこの程度の定量的な一致度があれば問題ないと思われる。今後, 実際の風によって誘起される外力には実験値を用い, また外乱補償システムで用いられる風による外力の推定には Isherwood 簡易推定係数を用いることにするが, 風圧力

Table 1 Principal particulars of the object ship

Items		
Length	L_{pp}	175.00 m
Breadth	B	25.40 m
Depth	D	15.40 m
Draught	d	9.50 m
Block coefficient	C_b	0.572
Propeller diameter	D_p	6.50 m
Rudder area	A_R	26.69 m ²

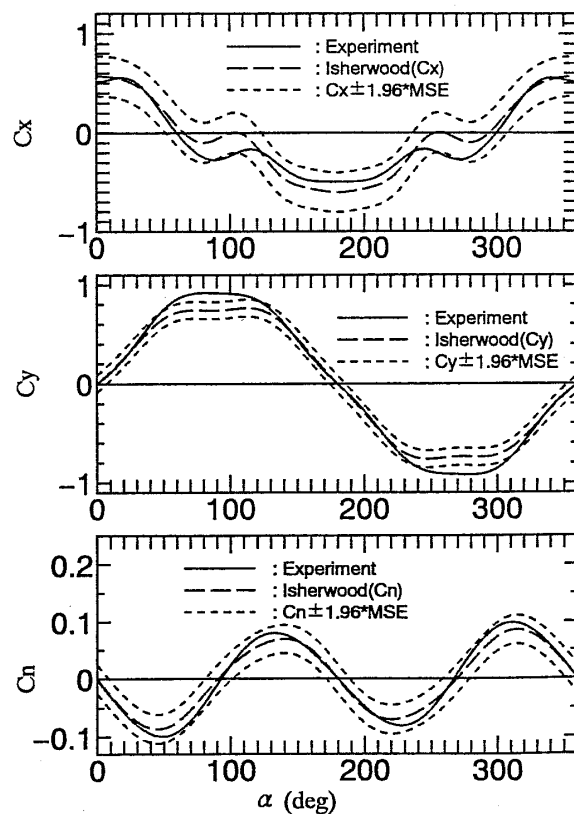


Fig. 3 Coefficients of wind forces and moment exerted on the object ship

係数 C_x , C_y , および風圧モーメント係数 C_n は文献 6) にならって, 任意の相対風向について連続的に求められるように Fourier 級数で表示することにする。

4.3 学習方程式の係数の決定

まずフィードバック制御系を設置する必要があるが, 前述のように学習の進行とともに制御の主体はフィードフォワード制御系に移行するため, フィードバック制御系は一応安定性が確保できるように設定されていけばよいことになる。このためここでは, フィードバック制御系は, ステップ応答において行きすぎのない安定した制御系が得られるように, $K_P = 5$, $T_D = 180$ sec としている。

目標値追従制御システムである LFFCD に関する学習方程式の係数決定法については, 後述する LFFCW の係数決定手順と同様であるので省略するが, 学習は, 1 次遅れ要素に近似した場合の相当時定数約 200 sec の 2 次遅れ要素に 10 deg のステップ入力を加えた時の出力を目標回頭角とし, 1 回の学習期間を 2000 sec としている。決定された係数は, $w = 10^{-6}$, $w_P = 10^{-1}$ である。

Fig. 4 に, 無風時の目標値変化に対する追従制御のシミュレーション結果を示している。LFFCD の場合の必要学習回数は, 後述する LFFCW の場合 (Fig. 9) と同様に 2 回程度で十分であることが確かめられているが, ここでは, 余裕をもたせて 5 回学習させている (以下同様)。このようにして得られた結合係数を学習方程式の初期値として用

い、LFFCD で学習しながら制御した時は目標値とほぼ一致している。また、結合係数を1に固定し、学習を停止して制御をしてもほぼ同じ結果が得られている。しかし、フィードバック制御系のみで制御した結果はかなり目標値と離れている。これらの結果から、目標値追従制御システム内部の逆システムが船体の応答をよく近似していることがわかる。以降、LFFCD 制御系は予め5回の学習を終了し、更に学習しながら制御を実行するものとする。

風外乱の補償システムである LFFCW に関する学習方程式の係数決定について述べる。LFFCW の学習方程式の決定はまず $w_{wp}=0$ とおき、 w_w を決定した後に w_{wp} を決定する手順を用いる。目標回頭角は $\phi_d=0$ deg, 風は風速 $V_w=15$ kt, 風向 $\theta=45$ deg でステップ状に加わるものと

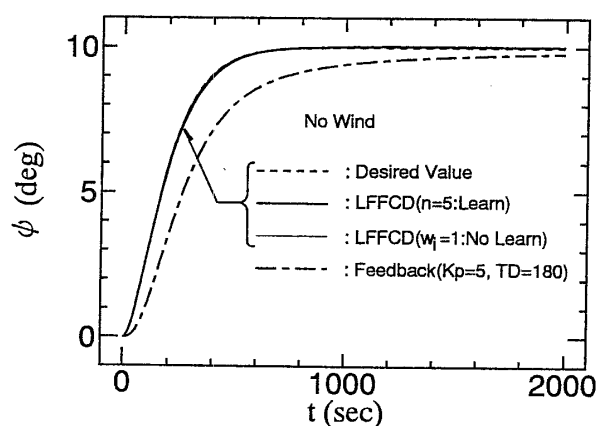


Fig. 4 Controllability of LFFCD and FB control system to desired value without wind

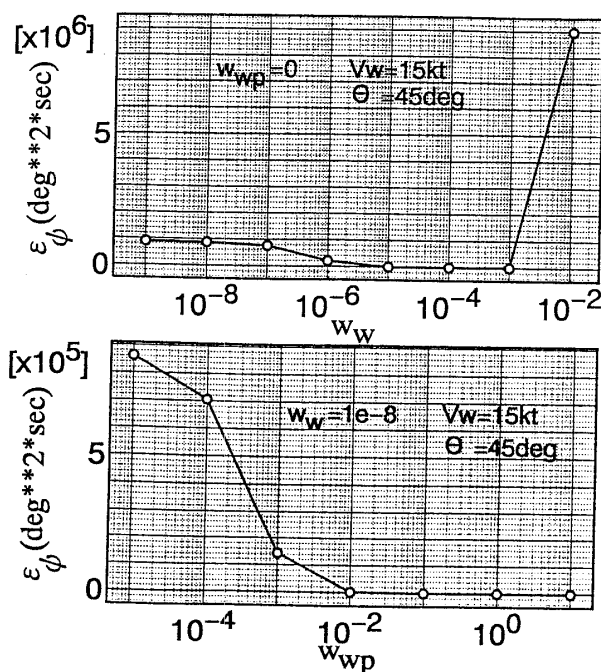


Fig. 5 Accumulative square value of $(\phi_d - \phi)$ by LFFCW learning ($n=1$)

する。

Fig. 5 の上図に、 $w_{wp}=0$ の場合、つまり (13) 式の学習方程式が積分項だけの場合に、 w_w を変化させた時の学習1回目 ($n=1$) の回頭角偏差の2乗時間積分値を示している。 w_w が 10^{-3} より大きくなると制御量は発散する傾向になる。また、 w_w をあまり小さくとると学習速度が遅くなり、偏差が0に収束しにくくなる。ここでは、制御系の安定性を考慮して $w_w=10^{-8}$ を採用する。次に、 $w_w=10^{-8}$ に固定し、 w_{wp} を変化させた時の、学習1回目 ($n=1$) の2乗誤差時間積分値を Fig. 5 の下図に示している。 $w_{wp}=10^0$ 付近から制御量が振動する傾向になるので安全側を取って $w_{wp}=10^{-2}$ を採用した。

Fig. 6 に、LFFCW の学習方程式の係数を $w_w=10^{-8}$, $w_{wp}=10^{-2}$ として、i) 予め5回学習 ($n=5$) した時の結合係数を学習方程式の初期値として用いる場合と、ii) 初期値が1の場合 ($w_{wi}=1$) について、それぞれ学習しながら制御する場合 (Learn) と学習を停止して制御する場合 (No learn) について示している。また、フィードバック制御系のみで制御した時の結果も同時に示している。予め LFFCW が学習することによって学習方程式の適正な初期値を得ることが有用であり、その初期値を用いて学習しながら制御すれば風外乱 ($V_w=15$ kt, $\theta=45$ deg) に対して更に効果的であることがわかる。

Fig. 7 に風向が変化 ($\theta=45, 90, 135$ deg) した時の LFFCW を用いた制御の学習1回目 ($n=1$) の回頭角偏差の2乗時間積分値を示している。 $w_w=10^{-8}$ の場合、風向が変化しても $w_{wp}=10^{-2}$ 程度を採用しておけば LFFCW の補償性能はほとんど変わらないことがわかる。

次に目標値変化と風外乱 ($V_w=15$ kt, $\theta=45$ deg) が同時に存在する時の制御系の制御性を Fig. 8 に示す。Fig. 6 と同様に LFFCW 制御系については、i) 予め5回学習 ($n=5$) させた時の結合係数を学習方程式の初期値として用いる場合と、ii) 初期値が1の場合 ($w_{wi}=1$) について、それぞれ学習しながら制御する場合 (Learn) と学習を停止

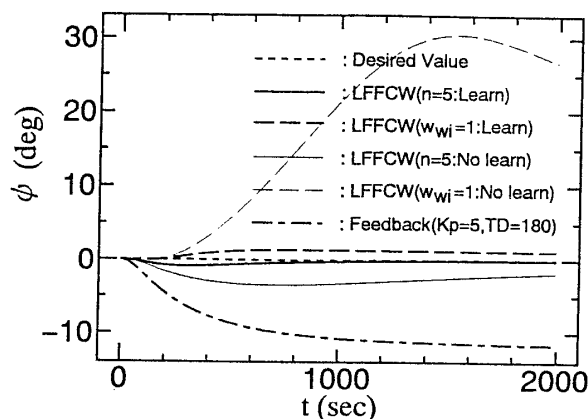


Fig. 6 Controllability of various control methods to wind-disturbance ($V_w=15$ kt, $\theta=45$ deg)

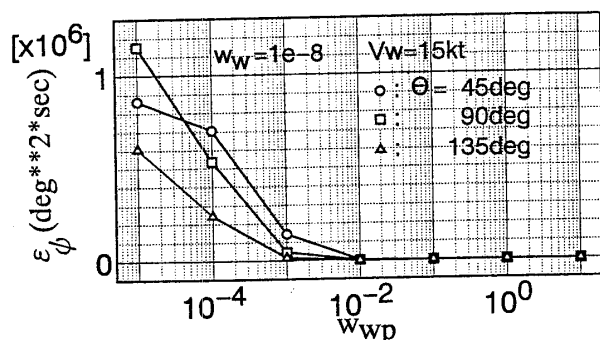


Fig. 7 Accumulative square value of $(\psi_d - \psi)$ by LFFCW learning in different wind directions ($\psi_d = 0$ deg, $n = 1$)

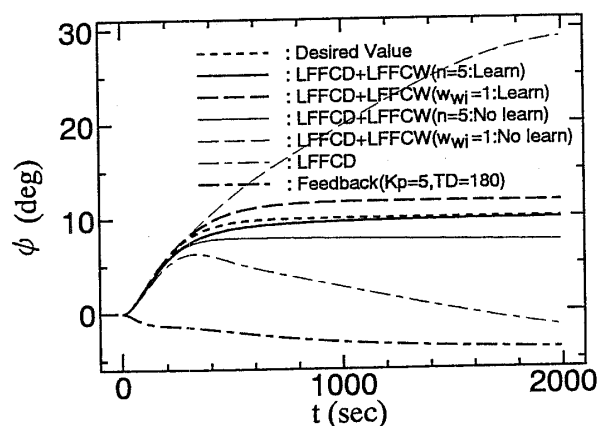


Fig. 8 Controllability of various control methods to desired value and wind-disturbance ($V_w = 15$ kt, $\theta = 45$ deg)

して制御する場合 (No learn) について示している。学習された LFFCD と LFFCW を制御系に同時に組み込み、更に学習しながら制御する場合は、若干偏差が残るものの制御性は良好であるが、学習方程式の初期値が 1 の場合 ($w_{wi} = 1$) や LFFCW の学習を停止して制御する場合 (No learn), LFFCD だけの場合、フィードバック制御系だけの場合と順次目標値から大きく離れ、外乱に対して制御系が有効に働いていないことがわかる。特に、LFFCW の結合係数を 1 に固定した場合 ($w_{wi} = 1$: No learn), すなわち、予め学習を行わず更に制御時においても学習を停止させたままの場合は LFFCD と組み合わせても制御効果はほとんど期待できない。これらの結果から、学習効果が非常に大きいことがわかる。

以上の結果から、LFFCD の学習方程式の係数には $w = 10^{-6}$, $w_p = 10^{-1}$, LFFCW の学習方程式の係数には $w_w = 10^{-8}$, $w_{wp} = 10^{-2}$ を採用すれば、学習型フィードフォワード制御方式が目標値変化と風外乱に対して十分な制御性を有すると考えられるのでこれらを採用することとする。

Fig. 9 に学習方程式に比例形の項を付加することによって、LFFCW 制御系の学習の高速化が実現される一例を示

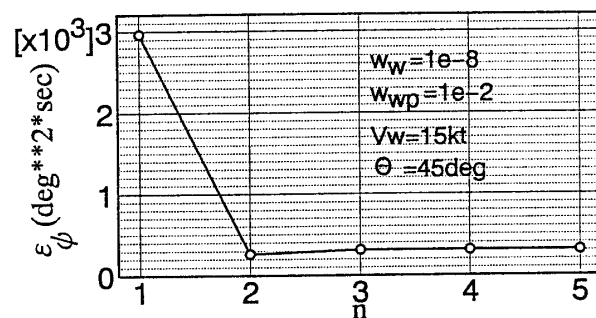


Fig. 9 Reduction of ε_ψ for LFFCW with fast learning method, as functions of number of learnings ($\psi_d = 0$ deg)

す。図は Fig. 6 における LFFCW ($n = 5$: Learn) の 5 回学習時の計算結果であり、2 回の学習で回頭角偏差の 2 乗時間積分値が一定値に収束しており、学習が終了していることがわかる。

4.4 風外乱補償性能

Fig. 10 に、Fig. 1 で示される制御方式 (LFFCD + LFFCW) による 30 度の大回頭運動に対するシミュレーション結果を示す。それぞれの学習型フィードフォワード制御系は 1 回の学習期間を 2000 秒とする 5 回の学習 ($n = 5$) を終了しており、その後の制御系の実行中も学習は継続されている。風速は $V_w = 15$ kt, 風向は $\theta = 45$ deg で初期船速は $V_s = 1$ kt である。また、ILQ 最適サーボ理論により設計された制御方式との比較も行っている。

Fig. 11 に、目標値を 15 度づつ変化させ最終的に 90 度の回頭をさせ、相対風向が大きく変化した時の影響を調べている。計算条件は Fig. 10 と同じである。(LFFCD + LFFCW) 制御系を用いた制御性は非常に良好で、ILQ 最適サーボ系と同等かそれ以上のよい制御性が得られている。

Fig. 12 および Fig. 13 は風速 $V_w = 15$ kt, 風向 $\theta = 135$ deg の時のシミュレーション結果である。それ以外の計算条件はそれぞれ Fig. 10 および Fig. 11 と同じである。やはり (LFFCD + LFFCW) 制御系を用いた制御性は非常に良好で、目標値とほぼ一致している。

以上のシミュレーションでは、風補償システムの学習時に用いる風外力の推定係数に Isherwood の簡易式で得られる値を用いたが、Isherwood が与えた誤差範囲を外れて大きな推定誤差がある場合の影響について調べる。Fig. 14 に大回頭時のシミュレーション結果を示す。 $\pm 1.96 \times M. S. E.$ が Isherwood が与えた誤差範囲であるが、その 2 倍の推定誤差があったと仮定した時の結果も示している。推定誤差が大きくなっても、制御系の学習機能によって操作量が補正され、実用上ほとんど問題ない制御性が得られている。

また、以上のシミュレーション結果から目標値追従制御系と外乱補償制御系の各々の学習は、不都合な干渉を生ずることなくお互いに協調して行われることがわかる。

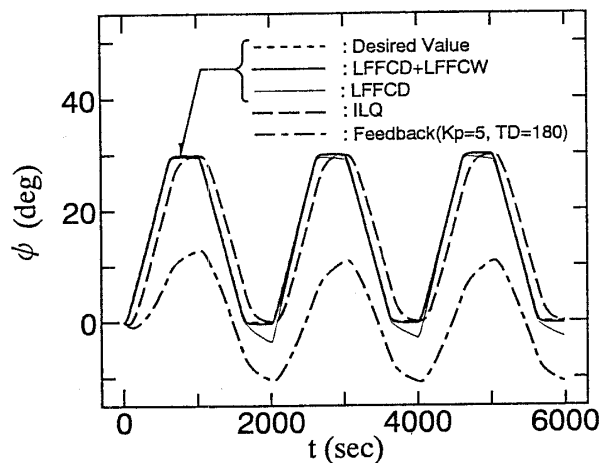


Fig. 10 Transient responses of various control methods to large heading angle changes ($V_w = 15$ kt, $\theta = 45$ deg, $n = 5$)

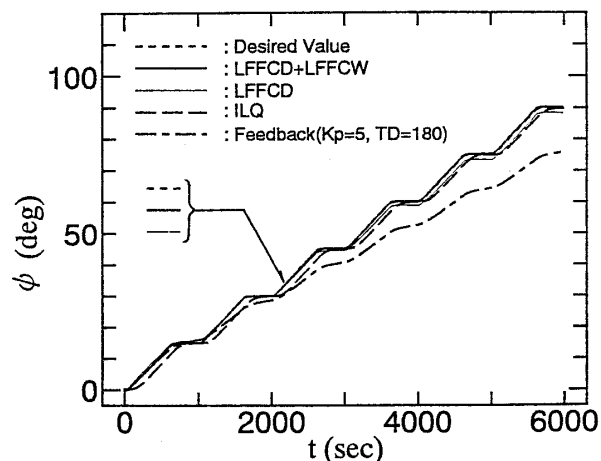


Fig. 13 Transient responses of various control methods in large change of relative wind directions ($V_w = 15$ kt, $\theta = 135$ deg, $n = 5$)

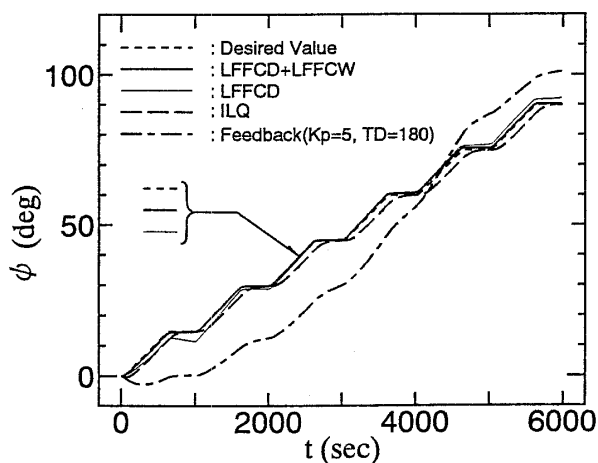


Fig. 11 Transient responses of various control methods in large change of relative wind directions ($V_w = 15$ kt, $\theta = 45$ deg, $n = 5$)

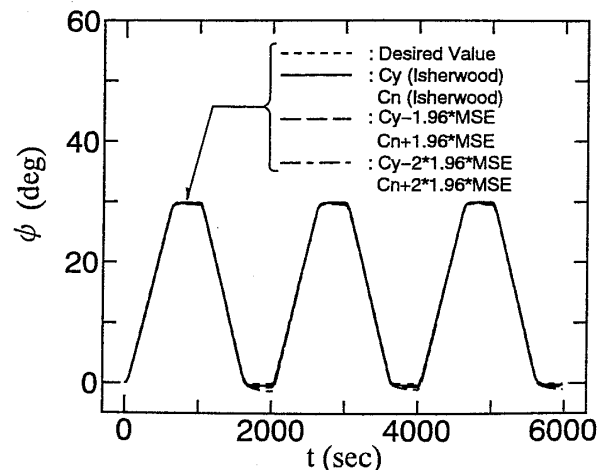


Fig. 14 Influence of the estimation error of wind disturbance to the controllability of LFFCW ($V_w = 15$ kt, $\theta = 45$ deg, $n = 5$)

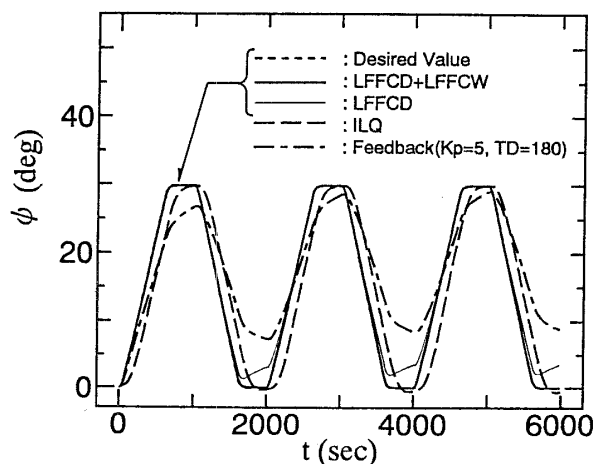


Fig. 12 Transient responses of various control methods to large heading angle changes ($V_w = 15$ kt, $\theta = 135$ deg, $n = 5$)

5. 結 言

学習型フィードフォワード制御方式を用いた風外乱補償システムを構築し、学習型フィードフォワード制御方式を基本とする制御系を用いたシミュレーション計算を実施した結果、以下のような結論が得られた。

- (1) フィードフォワード制御が主体となり、かつ高速学習により、高応答速度の制御性が得られる。
- (2) 外乱推定にかなりの誤差がある場合や、非線形性の強い外乱および変動の大きい目標値が与えられても、学習機能により速やかに補正動作が実施され、高精度の制御性が得られる。
- (3) 目標値追従制御系と外乱補償制御系は不都合な干渉を生ぜずに協調しながら学習を行うことができる。

- (4) 風外乱補償システムに学習型フィードフォワード制御方式を適用し、同制御方式を適用した目標値変化に対する追従制御システムと組み合わせることにより、非常に良好な外乱補償機能と高い目標値追従制御性が実現できる。

本研究により、比較的簡単な方式によって船舶の操縦運動の高制御性実現の見通しが得られたが、実用化に向けて更に検討すべき課題としては、多入力・多出力系における複数外乱下におけるシステム設計の容易さと性能確保の確認、逆システム・外乱補償システムの一般的構築法の確立および実験によるシステムの有効性の検証等があげられる。

最後に、本研究実施にあたり、計算機システムの構築に尽力された九州大学工学部竹本浩也技官ならびに文献の検索、整理等に協力いただいた藤野容子さんに謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小川原陽一, 吉永浩志, 種子島謙一, 新宅英司: 学習型フィードフォワードコントローラによる船舶の操縦運動制御システムの研究, 西部造船会々報, 第83号 (1992) pp. 151-159
- 2) 小川原陽一, 平方 勝, 南 佳成, 新宅英司: 船舶の操縦運動の多変数制御に対する学習型制御方式の適用と学習の高速化に関する研究, 西部造船会々報, 第87号 (1994) pp. 211-219
- 3) M. Kawato: Feedback-Error-Learning Neural Network for Supervised Motor Learning, Advanced Neural Computers, R. Eckmiller (Editor), Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland), (1990) pp. 365-372
- 4) K. Kijima, T. Katsuno, Y. Nakiri and Y. Furukawa: On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition, Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 168 (1990) pp. 141-148
- 5) R. M. Isherwood: Wind Resistance of Merchant Ships, TRANSACTIONS OF THE ROYAL INSTITUTION OF NAVAL ARCHITECTS, Vol. 115 (1973) pp. 327-338
- 6) 小村 淳, 古川芳孝: 風圧下における船の針路保持に関する研究, 昭和62年度九州大学学士論文 (1988)