

船舶操縦運動の学習型フィードフォワード制御方式の 実用化に関する研究(I)

—複数外乱下における多変数制御システムの構築—

正員 小川 原 陽 一* 正員 岩 本 才 次*
山 本 善 弘**

Studies on the Practical Use of Learning Feed-Forward Control System to Ship Manoeuvring Motion(I)
—Construction of Multi-Variable Control System under Some Disturbances—

by Yoichi Ogawara, *Member* Seiji Iwamoto, *Member*
Yoshihiro Yamamoto

Summary

Recently PID action feedback control system or optimal control system have been applied to the control of the manoeuvring motion of a ship. But there are some problems for practical use. So it has been tried by authors to apply the feedback-error-learning neural network technique proposed by Kawato et. al. to the automatic manoeuvring system of a ship.

The system is called Learning-Feed-Forward Control System. And it has been recognized that the system has a self-tuning ability and a good controllability.

In order to push forward with practical use of the control system proposed by authors, there are some items which must be studied. In this paper for the first step of those studies the practical method of the multi-variable control system design is investigated. That is, the real control system must treat multi controlled variables and multi disturbances to a ship motion, and so the method for the decision on many coefficients of the learning equations of neural network and the confirmation of non-interaction between controlled variables are investigated.

As a result the practical design method is obtained and it is recognized that the system has a good controllability for the multi-variable control and the multi-disturbance compensation.

1. 結 言

最近、海難事故とそれに伴う人命損失や海洋汚染の防止の面から、高速客船、フェリー、ケーブル敷設船、狭水路を航行するタンカーなど船舶運航の安全性と信頼性向上の要求が急速に強まっている。それと同時に、非熟練操船者の増加傾向に対処するために、運航支援システム整備の一環としてきめ細かい高精度の操縦運動制御システムの開発が求められている。

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などがあるが、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十分でない等種々の問題点がある。

著者等は、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た船舶の操縦運動の目標値追従制御や風外乱補償システムについて基本的な検討を行い、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),3)}。

そこで本研究は、学習型フィードフォワード制御方式の実用化を図るために、まず、実際の船舶の操縦運動制御システムに要求される、複数の制御量を複数外乱下において制御する場合の制御性能と、そのような多変数制御系において学習型フィードフォワード制御方式のキーポイントで

* 九州大学工学部

** 九州大学大学院

原稿受理 平成8年7月8日

秋季講演会において講演 平成8年11月14, 15日

ある学習方程式の係数の実用的な設定方法について検討したものである。本検討においては例として、風と潮流の二つの外乱がある場合に、バウスラスターとスターンラスターによって、船体の横方向の移動量と回頭角の制御を行う場合を取り上げる。

2. 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⁴⁾等によって提案された人間の脳の運動学習機能を工学的に模擬したものであり、フィードフォワードループの逆システムの中の結合係数を、フィードバック誤差学習法によって調整するものである。そして、逆システムは、簡単のために線形化された船舶の操縦運動方程式から得られるいわゆる逆伝達関数を用いることで良好な制御性が得られることが確かめられている^{1),2),3)}。

Fig. 1 に本制御システムの基本的な構成を示す。目標値追従制御システムによって目標値 X_d を実現する操作量 T_{FU} が与えられ、外乱補償逆システムによって外乱 F の影響を補償する操作量 T_{COM} が与えられる。そして、フィードバックコントローラの出力が 0 になるように、各逆システムの中の結合係数 W を学習方程式によって調整し、制御量が目標値に一致し、かつ外乱の影響がなくなるようにしている。

3. 船舶の操縦運動方程式

3.1 潮流と風の影響を考慮した船舶の操縦運動方程式

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⁵⁾。

$$\begin{aligned} (m' + m'_x) \left(\frac{L}{U} \right) \left(\frac{\dot{U}}{U} \cos \beta - \dot{\beta} \sin \beta \right) \\ + (m' + m'_y) r' \sin \beta \\ - (m'_x - m'_y) \left(\frac{V_c}{U} \right) r' \sin(\Theta_c - \psi) = X' \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} - (m' + m'_y) \left(\frac{L}{U} \right) \left(\frac{\dot{U}}{U} \sin \beta + \dot{\beta} \cos \beta \right) \\ + (m' + m'_x) r' \cos \beta \\ - (m'_x - m'_y) \left(\frac{V_c}{U} \right) r' \cos(\Theta_c - \psi) = Y' \end{aligned} \quad (2)$$

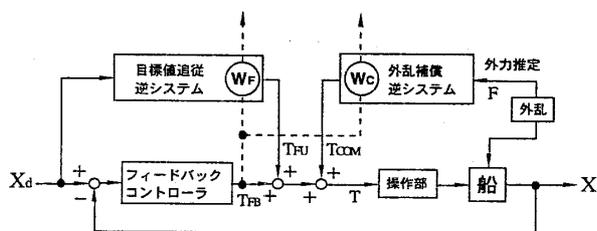


Fig. 1 Control system for follow-up control to desired value and compensation of influence from disturbance

$$\left(I_{zz} + i_{zz} \right) \left(\frac{L}{U} \right)^2 \left(\frac{\dot{U}}{L} r' + \frac{U}{L} \dot{r}' \right) = N' \quad (3)$$

ただし、ここでは空間固定座標系に関する諸量に「対地」、船体と流体との相対的な関係に起因する諸量に「対水」という語を付けて呼ぶことにする。上式の添字“'”は無次元化を表し、 U は対地船速、 β は対地横流れ角、 r は対地回頭角速度である。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。右辺の流体力は流体との相対的な関係によって計算される量であり、潮流によって船体に生じる流体力はこの中に含まれる。

対水船速 \tilde{U} と対水横流れ角 $\tilde{\beta}$ は次式で表される。

$$\tilde{U} = \sqrt{\tilde{u}^2 + \tilde{v}^2} \quad (4)$$

$$\tilde{\beta} = \tan^{-1} \left(-\frac{\tilde{v}}{\tilde{u}} \right) \quad (5)$$

ただし、

$$\tilde{u} = U \cos \beta - V_c \cos(\Theta_c - \psi),$$

$$\tilde{v} = -U \sin \beta - V_c \sin(\Theta_c - \psi)$$

船体に働く流体力およびモーメントはいわゆる MMG モデル⁶⁾ に従い次式のように仮定するが、上述のように潮流による影響は船体とプロペラと舵に働く流体力に含まれており潮流による外力の項としては陽には表れない。

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

$$Y' = \tilde{Y}'_H + \tilde{Y}'_R + T'_B + T'_S + Y'_W \quad (7)$$

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

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。添字の H 、 P 、 R 、 B 、 S 、 W はそれぞれ船体、プロペラ、舵、バウスラスター、スターンラスター、風を表す。

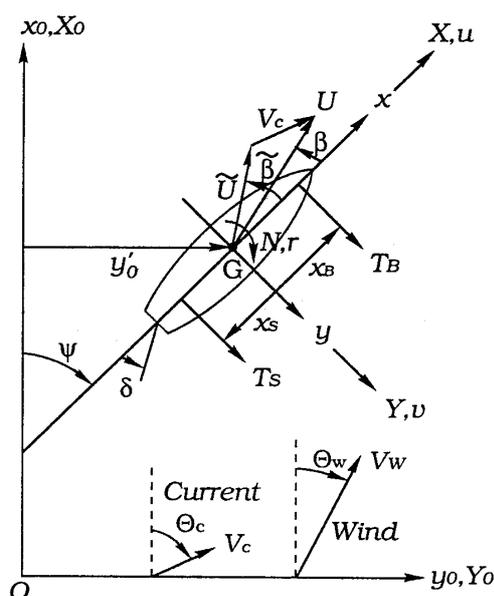


Fig. 2 Coordinate system

風の外力の推定には Isherwood⁷⁾ の簡易式を用いているが、その詳細については文献 3) に述べられている。 x_B および x_S はバウスラスタとスターンスラスタの設置位置を表す。

3.2 操縦運動方程式の線形化

本報で構築される制御系内部の逆システムは、上記(2), (3), (4), (5)式の他に、回頭角と回頭角速度の関係式および y_0 軸方向の船体重心の移動量の式を線形化した次式から得られる。

$$\frac{d}{dt}\beta + a_{11}\dot{\beta} + a_{12}r' = b_{11}\delta + b_{12}T'_B + b_{13}T'_S + b_{14}Y'_W \quad (9)$$

$$\left(\frac{d}{dt} + a_{21}\right)r' + a_{22}\dot{\beta} = b_{21}\delta + b_{22}T'_B + b_{23}T'_S + b_{24}N'_W \quad (10)$$

$$\dot{\beta} - \beta + a_{31}\psi = -\frac{V_c}{U}\sin\Theta_c \quad (11)$$

$$\frac{d}{dt}\psi - a_{41}r' = 0 \quad (12)$$

$$\frac{d}{dt}y'_0 - a_{51}\psi - a_{52}\beta = 0 \quad (13)$$

ただし、潮流速 (V_c) は船速 (U) に比較して十分に小さいと仮定している。 y'_0 は $y'_0 = y_0/L$ で表される船の横移動の無次元量である。

4. 複数外乱下における多変数制御システム

4.1 学習型フィードフォワード制御システムの構成

前述のようにここでは一例として、潮流と風の二つの外乱があるときに、バウスラスタとスターンスラスタによって、船の横方向の移動量と回頭角の制御を行う場合について検討する。このときの学習型フィードフォワード制御系の全体構成を Fig. 3 に示す。

フィードバック制御系は、横方向の移動量はバウスラスタによって制御し、回頭角はスターンスラスタによって制御するように構成されている。これらの系は、フィードバック誤差学習法による結合係数の学習ができればよい。そのため安定であればよいが、ここでは目標値変化に対してオーバーシュートが生じない程度に調整されている。

Fig. 3 において G_{ij} は逆システムを表し、 G_{11} , G_{12} および G_{21} , G_{22} が目標値追従系 LFFCD (Learning-Feed-Forward Control System for Follow-UP Control to Desired Value), G_{13} , G_{23} は潮流外乱補償系 LFFCC (Learning-Feed-Forward Control System for Compensation of Current Disturbance), G_{14} , G_{24} は風外乱補償系 LFFCW (Learning-Feed-Forward Control System for Compensation of Wind Disturbance) のそれぞれの逆システムで

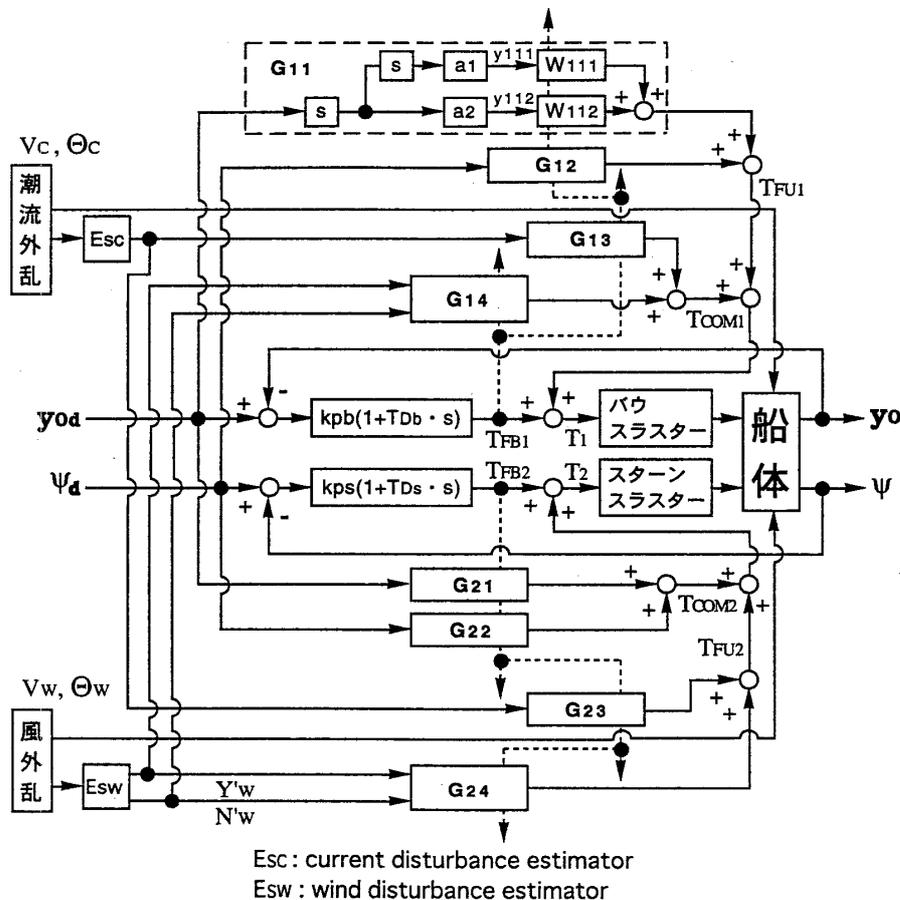


Fig. 3 Block diagram of LFFCD, LFFCC and LFFCW

ある。これらは、線形化された操縦運動方程式から得られる逆伝達関数を用いて表される。例えば、横方向の移動量の目標値に対して、バウスラスタへのフィードフォワード信号を出力する逆システム G_{11} は、次式で表される。

$$G_{11} = [W_{111} \cdot a_1 \cdot s^2 + W_{112} \cdot a_2 \cdot s] \quad (14)$$

このように逆システムはラプラス演算子 s の次数別にくつつかの (G_{11} は2個の) サブシステムに分けられる。ただし、 a_1 , a_2 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り、 W_{111} と W_{112} は結合係数である。

フィードフォワード信号は、これらの逆システムを用いてそれぞれ次のように表される。

(1) 目標値追従系 (目標値 $X_d(s)$)

$$T_{Fu}(s)_i = \sum_{j=1}^2 [G(s)_{ij} \cdot X_d(s)_j] \quad (i=1, 2) \quad (15)$$

ただし、添字の d は目標値、 i は操作部の種類(バウスラスタ: $i=1$, スターンスラスタ: $i=2$)、 j は制御量の種類 (y_0 軸方向の移動量 y'_0 : $j=1$, 回頭角 ψ : $j=2$) である。

(2) 外乱補償系 (外乱 $F(s)$)

$$T_{Com}(s)_i = \sum_{j=3}^4 [G(s)_{ij} \cdot F(s)_j] \quad (i=1, 2) \quad (16)$$

ただし、 j は外乱の種類 (潮流: $j=3$, 風: $j=4$) である。

4.2 逆システム内の結合係数の学習方程式

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²⁾。

$$W_{ijk} = W_{ij} \int y_{ijk} \cdot T_{Fbi} dt + W_{pij} \cdot y_{ijk} \cdot T_{Fbi} \quad (17)$$

ただし、 y_{ijk} は逆システムの中の各サブシステムの出力、 T_{Fbi} はフィードバックコントローラの出力である。

添字 k はサブシステムの順番を表す。

W_{ij} と W_{pij} が結合係数 W_{ijk} を調整する学習方程式の係数であり、学習を安定にかつ効率的に行うためには、適当な値に設定する必要がある。これらの学習方程式の係数の設定は、各学習期間における制御偏差の自乗時間積分値 ϵ_j を評価規範として行い、この値が十分に小さくなれば学習が終了したとみなすことができる。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、高速かつ高精度の制御が行えるようになる。

$$\epsilon_j = \int \{x_d(t)_j - x(t)_j\}^2 dt \quad (j=1, 2) \quad (18)$$

しかし、制御量の数と外乱の数が増えるとともに、学習方程式の係数の数は飛躍的に増加するため、それらの設定方法が、学習型フィードフォワード制御システムを設計する際の重要な問題である。

5. 計算機シミュレーションによる制御系設計法の検討

5.1 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。初期船

速は $U_0=1$ knot, 舵角は常に $\delta=0$ deg で舵による制御は行わない。バウスラスタとスターンスラスタの最大推力は 20 ton, 推力の最大増加率は 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。バウスラスタとスターンスラスタの設置位置は、船の重心位置からそれぞれ $x_B=0.375L$, $x_S=-0.35L$ の距離にあるものとする。

4.1 に述べたように、制御量は船の y_0 軸方向の横移動量と回頭角、操作量はバウスラスタとスターンスラスタの推力、外乱は潮流と風とする。潮流と風は時刻 $t=0$ sec においてそれぞれ、潮流速 $V_C=0.5$ knot, 風速 $V_W=15$ knot でステップ状に与えられるものとする。

5.2 学習方程式の係数の設定法

フィードフォワード制御系の学習を行う前に、まずフィードバック制御系のコントローラのパラメータを設定しなければならないが、4.1 で述べたように、目標値変化に対してオーバーシュートを生じない程度に設定した。

コントローラは共に PD コントローラとし、それらの比例ゲイン k_p と微分時間 T_D は、以下の通りである。

$$\begin{aligned} k_{pb} &= 9 \text{ kg/m}, & T_{Db} &= 7 \text{ sec}, \\ k_{ps} &= -222 \text{ kg/deg}, & T_{Ds} &= 200 \text{ sec} \end{aligned}$$

フィードフォワード制御系の学習においては、今回の例は、Fig. 3 に示すように8個の逆システムを有するため、8個の学習方程式の係数を設定しなければならない。これを同時に行うことは一般に困難であるため、ここでは学習方程式の係数を設定するための探索を行う場合には、同時に探索の対象とする逆システムの数を必要最小限に限定し、そのとき制御システムは、2個のフィードバック制御系と当該逆システムのフィードフォワード制御系のみが機能しており、それ以外のフィードフォワード制御系は働いていない状態として、当該逆システムの学習方程式の係数の探索を行い、同様にして順次他の逆システムについて行うことが可能かどうか検討した。学習は、Fig. 9 に示すように、目標の横移動量および回頭角は時定数約 120 sec の1次遅れ要素に相当する2次遅れ要素に $y'_0=1$ および $\psi=10$ deg の入力を加えたときの出力を目標値とし、1回の学習期間は 2500 sec としている。

その結果、後に示すように、Fig. 3 の制御系において同一の操作部に信号を出力する目標値追従系(① G_{11} と G_{12} , ② G_{21} と G_{22})と外乱補償系(③ G_{13} , ④ G_{23} , ⑤ G_{14} , ⑥ G_{24})の6ケースについて順次各逆システムの学習方程式の係数を決めることによってシステム全体としての学習機能と制御性能を共に実用上十分なものにすることが確認された。

さらに、このようにして各逆システムの学習方程式の係数の選定を行う場合に、(18)式の評価規範に対してどのように対応するかの問題がある。

先に著者等は、外乱が1個で制御量が1個の場合に、学

習方程式の係数と評価規範の関係から適当な学習方程式の係数の選定方法を提案しているが³⁾、後に示すように、外乱の数と制御量の数が非常に多い場合には、各フィードフォワード制御系間の相互干渉を考慮して各フィードフォワード制御系の学習機能をあまり限界まで高めない方が安定した学習ができ、実用上は十分な学習機能が得られることが明らかになった。すなわち、(17)式の学習方程式の積分項の係数 w_{ij} は ε_j が発散傾向を示す値より 6 桁程度小さい値とし、著者等が学習の高速化を図るために導入した比例項の係数 w_{pij} は ε_j が最小となる値より 1 桁程度小さく選定すればよいことが判明した。

以上の検討を行った一例として潮流外乱補償系 LFFCC の場合を以下に示す。結合係数の初期値は、すべて 1 としている。この場合、目標値 y_{0d} 、 ϕ_d は共に 0 であり、潮流は流速 $V_c = 0.5$ knot で時刻 $t = 0$ sec において船体の斜め後方 ($\Theta_c = 45$ deg) からステップ状に与えられるものとする。

まず、バウスラスタへの信号を出力する逆システム G_{13} の学習方程式の係数を探索する。積分項の係数 w_{13} を変化させ、学習 1 回目の無次元値 y'_0 に関する制御偏差の自乗時間積分値 ε_{y_0} の変化をモニターする。Fig. 4 の上図に示すように、 ε_{y_0} は係数が小さいうちはほとんど変化しないが、 $w_{13} = 10^{-5}$ 付近から急激に減少し、さらに $w_{13} = 10^{-3}$ 付近から発散する傾向を示す。種々検討した結果、この場合には 10^{-3} より 6 桁小さい $w_{13} = 10^{-9}$ 程度が好ましいことが判明した。次に、積分項の係数を $w_{13} = 10^{-9}$ に固定し比例項の係数 w_{p13} を変化させる。

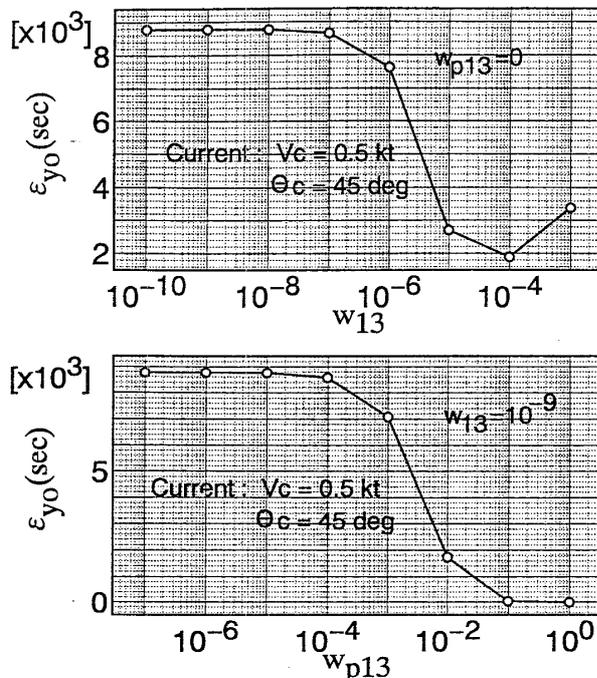


Fig. 4 Accumulative square value of $(y'_{0d} - y'_0)$ by LFFCC learning ($n=1$)

学習 1 回目の制御偏差の自乗時間積分値 ε_{y_0} の変化をモニターする。Fig. 4 の下図に示すように、 ε_{y_0} は $w_{p13} = 10^{-1}$ 付近から非常に小さな値を示し、 $w_{p13} = 10^0$ を超えるあたりから制御量が振動傾向を示す。検討の結果、この場合には 10^{-1} より 1 桁小さい $w_{p13} = 10^{-2}$ 程度が好ましいことが判明した。

スターンラスタへの信号を出力する逆システム G_{23} の学習方程式の係数探索についても同様の考え方で適当な係数を選定できることが判明した。係数変化に対する ε_ϕ の変化の様子を Fig. 5 に示す。この場合学習方程式の係数は、 $w_{23} = 10^{-6}$ 、 $w_{p23} = 10^0$ 程度が好ましいことが判明した。

以上のようにして決定された学習方程式の係数を用いて、LFFCC の学習を行う。Fig. 6 に逆システム G_{13} と G_{23} の学習回数に対する ε の減少の様子を示す。それぞれ 3 回の学習で ε がほぼ一定値に収束しており、学習を終了していることがわかる。

Fig. 7 に、LFFCC の制御性能を実線で示す。 y'_0 、 ϕ 共に、現実にはあり得ないステップ状の外乱を与えたにもかかわらず、目標値によく一致しており良好な制御性を示している。一点鎖線は、フィードバック制御系のシミュレーション結果であり、このような潮流外乱に対してほとんど補償できないことがわかる。

本報告では記述を省略しているが、LFFCC と同様の方法で順次 LFFCW、LFFCD について学習方程式の係数を求めると、各制御系に対する高速学習と高制御性が得られることが確かめられている。

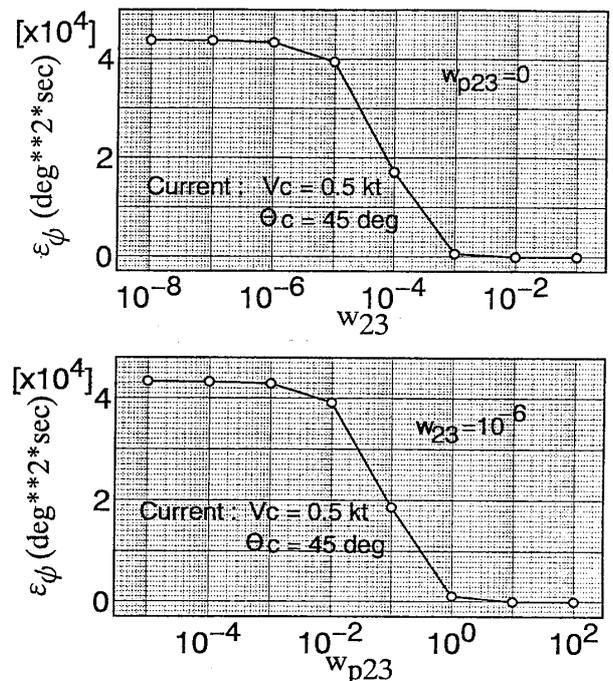


Fig. 5 Accumulative square value of $(\phi_d - \phi)$ by LFFCC learning ($n=1$)

以上の検討から、複数の外乱の下で多変数の制御を行う学習型フィードフォワード制御システムの結合係数の学習方程式の係数の設定は、次のような手順で行うことによって簡単に実用上十分な学習機能を有するシステムが構築できることが分かった。

1. 学習回数1回目の制御偏差の2乗時間積分値(ϵ_j)を判定の基準とする。
2. 積分項の係数(w_{ij})を変化させる。(ただし、 $w_{pij}=0$, 結合係数の初期値は1)
3. ϵ_j が発散傾向を示す係数値より6桁程度小さい値を採用する。
4. 3.で採用された w_{ij} を固定し、比例項の係数(w_{pij})を変化させる。(ただし、結合係数の初期値は1)
5. 1回の学習で ϵ_j が最も0に近くなる係数値の中で一番小さい値より更に1桁程度小さい値を採用する。

5.3 複数外乱下における多変数制御系の制御性能

5.2で述べた方法によってその係数が設定された学習方程式を用いた場合の制御性について検討した結果を以下に示す。

参考のためにまず、外乱がない場合のLFFCDのシミュレーション結果をFig.8に実線で示す。この場合のLFFCDは、Fig.9に示される目標値変化を用いて学習させたものを用いている。 y'_0 は船が y_0 軸方向に2000秒ごとに1船長ずつの横移動を繰り返す横移動制御、 ϕ は横移動のたびに0deg-60deg-0degの大回頭を繰り返す回頭角制御のシミュレーション結果である。このように、学習時と異なる目標値変化を与えているが、LFFCDはニュー

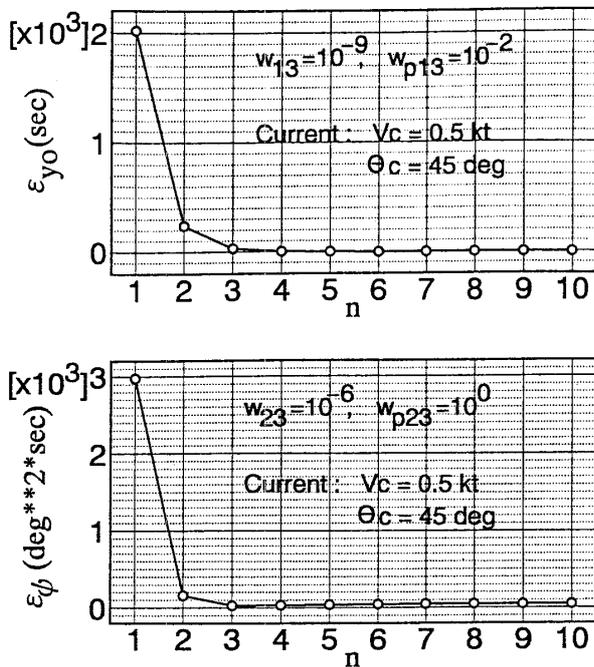


Fig. 6 Decrease of ϵ_{y_0} and ϵ_{ϕ} to learning times in LFFCC with high speed learning method ($y'_0=0$, $\phi'_d=0$ deg)

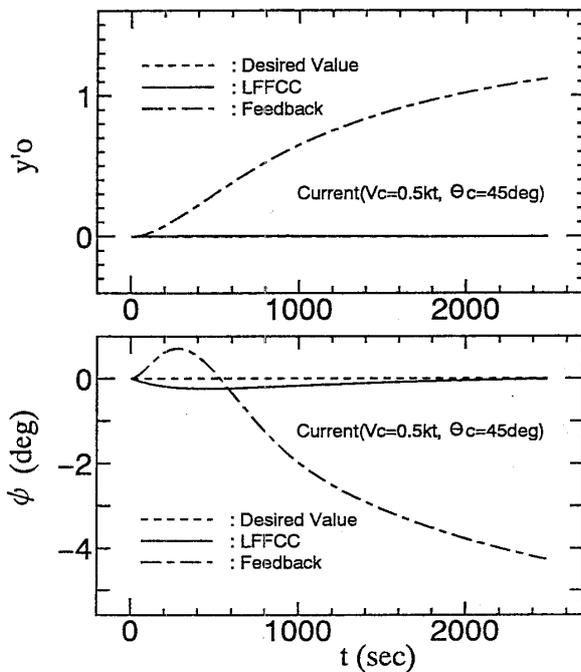


Fig. 7 Controllability of LFFCC and FB control system to current disturbance

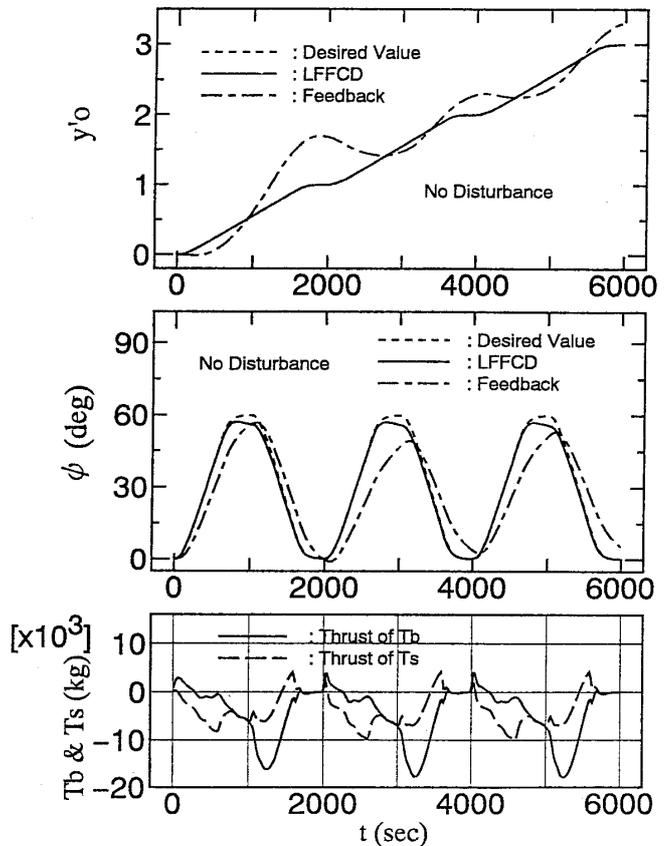


Fig. 8 Controllability of LFFCD and FB control system to desired values without disturbance

ラルネットワークの汎化能力により、予め学習されていない状態に対しても十分に対応でき、非常に良好な制御性を示すことがわかる。一点鎖線はフィードバック制御系のシミュレーション結果である。Fig. 8の下図はLFFCDの場合のバウスラスタースターンスラスタースターの操作量である。

目標値変化と潮流外乱 ($V_c=0.5$ knot, $\Theta_c=45$ deg) および風外乱 ($V_w=15$ knot, $\Theta_w=45$ deg) が同時に存在するときの制御性を Fig. 9, Fig. 10 に示す。図には、全システムの場合の他に全体のシステムを構成する基本的なシステムを種々に組み合わせた場合とフィードバック制御系だけの場合が示されている。Fig. 9 は学習時と同一の目標値変化および外乱を想定した場合であり、Fig. 10 はそれと異なる状態の場合の制御性を示す。Fig. 8 の場合と同様に学習時と異なる状態に対しても良好な制御性を有することが認められる。全システム (LFFCD+LFFCC+LFFCW) を用いた場合は Fig. 10 に示されるように高制御性が得られているが、LFFCD の場合は 2000 sec 以後目標値から大きく離れている。これは LFFCD が偏差に対する強い修正機能を有するために大きな操作量を発生するが、外乱に対する補償機能がいないために適正な操作量とならないためであり、そのためにゲイン等を低くおさえてゆるやかな修正機能としているフィードバック制御系だけの場合よりかえっ

て悪い結果となっていると思われる。Fig. 10 の下図は全システムを用いた場合のバウスラスタースターンスラスタースターの操作量である。

以上より、次のようなことが判明した。

- (1) 5.2 で求めた学習方程式の係数の設定方法により、実用上問題のない良好な学習機能が得られる。
- (2) 所要機能に対応する学習型フィードフォワード制御系を構成することにより複数の外乱の影響の補償と多変数の制御が相互干渉をすることなく極めて良好に制御できる。
- (3) 線形化された操縦運動方程式より求めた逆伝達関数による逆システムにより、かなり非線形性が存在すると思われる運動に対しても学習機能により対応できる。

6. 結 言

著者等がこれまでに提案した学習型フィードフォワード制御システムの実用化のための第一段階の研究として、複数の外乱がある場合に多変数の制御を行うシステムについて、学習方程式の係数の実用的な設定法とそれによる制御性を計算機シミュレーションによって検討した結果、以下

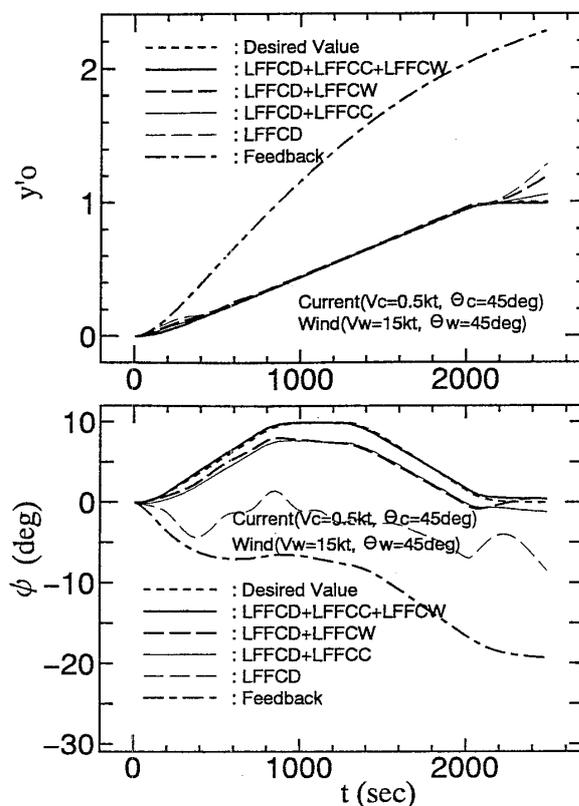


Fig. 9 Controllability of various control methods to desired values and disturbances

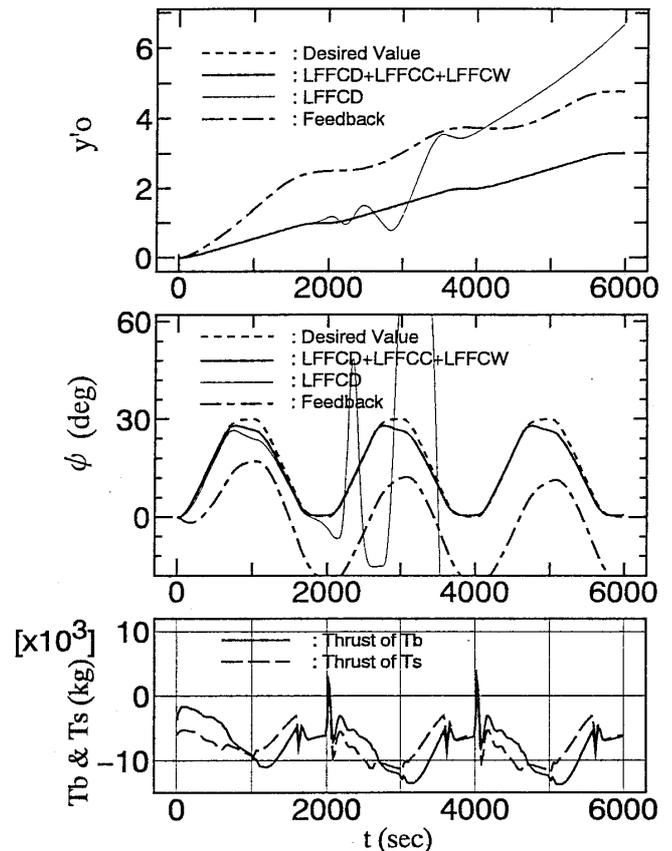


Fig. 10 Controllability of various control methods to desired values with two disturbances ($V_c=0.5$ kt, $\Theta_c=45$ deg, $V_w=15$ kt, $\Theta_w=45$ deg)

のような結論が得られた。

1. 多くの学習方程式の係数を比較的簡単に設定する実用的な方法を得ることができた。
2. 提案した学習型フィードフォワード制御システムは、基本的な各システムが干渉することなくそれぞれの機能を十分に発揮し、かなりの非線形性がある場合にも学習機能によって対応できる。

本研究により、比較的簡単な制御方式と設計方法により、実用的な制御系実現の見通しが得られたが、さらに実用化を推進するために検討すべき課題としては、次のようなものが考えられる。

- (1) 実船試験によるシステムの有効性の検証
- (2) 本システムが目指すより大きな非線形運動にも対応できる逆システムの構成法
- (3) 船舶の操縦運動方程式の係数が予め分からない場合にも対応できる、逆システムの一般的構築法と学習方法
これらについては、今後順次検討していくことにしたいと考えている。

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) 小川原陽一, 岩本才次, 吉村 学: 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, 日本造船学会論文集, 第178号 (1995), pp. 321-328.
- 4) 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.
- 5) 小川陽弘: 外力を受ける船の操縦運動の計算 (その1) — 様な風と流れの中の直進および旋回 —, 日本造船学会論文集, 第126号 (1969), pp. 107-120.
- 6) 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.
- 7) R. M. Isherwood: Wind Resistance of Merchant Ships, TRANSACTIONS OF THE ROYAL INSTITUTION OF NAVAL ARCHITECTS, Vol. 115 (1973), pp. 327-338.