

学習型フィードフォワード制御方式による 自動着棧制御システムの設計

正員 岩本才次*

An Automatic Berthing Control System Design Which Is Based on Learning Feed-Forward Control

by Seiji Iwamoto, *Member*

Summary

In previous papers ^{1, 2, 3, 4, 5)}, the author demonstrated the application of the learning feed-forward control (LFFC) system for multivariable systems and the effectiveness of the LFFC system by on-board experimental results. The LFFC system was thus confirmed to be suitable for use as the control system since it followed the desired values and compensated for continuous variations in wind disturbance.

In this paper, focusing on the approach and berthing control, which is one of the most difficult problems in automatic maneuvering, the author attempts to design an approach and berthing control system which can act as the ship operation support system. The feasibility and the problems of this control system are discussed based on computer simulation. If considered from the viewpoint of control, then it can be thought that approach maneuvering is a tracking control problem, whereas berthing maneuvering is a set-point control problem. Accordingly, it is appropriate for the control method to be changed at each maneuvering stage. The author herein discusses whether or not the LFFC system is suitable for use as the automatic approach and berthing control system, by itself.

The computer simulation results show that the automatic approach and berthing control system based on the LFFC system is adaptive for changes in the dynamic characteristics of the object ship at each maneuvering stage, however, it is necessary for further improvements to be made in the wind compensation system.

1. 緒言

著者は、前報 ^{1, 2, 3, 4, 5)} において、船舶の運航支援

システムの要素技術として、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、操縦運動制御に適用することを提案した。その研究において、複数の目標値と複数の外乱を補償するための多変数制御システムの実用的な設計法を示し、実船実験によって、学習型フィードフォワード制御方式が実用上実現可能であることを確認した。

本論文では、船舶の操船の中でも最も難しいとされる

* 九州大学大学院工学研究院

原稿受理 平成 16 年 12 月 24 日

着岸操船に着目し、学習型フィードフォワード制御方式を用いた自動着岸制御システムの設計を試み、計算機シミュレーションによってその適用可能性と問題点を検討する。

自動着岸操船を制御の観点から見ると、港内のある位置から接岸点近傍まで誘導するアプローチ操船はトラッキング問題、接岸点近傍から接岸点までの接岸操船はレギュレータ問題であるという考えがある⁶⁾。従ってその場合、それぞれの局面において制御方式は変更されるのが一般的である。

ここでは、その各局面において制御方式を変更することなく、学習型フィードフォワード制御方式単独で自動着岸制御系に適用できるか、その可能性と問題点について検討した。

その結果、学習型フィードフォワード制御方式を用いた制御システムが、制御対象の動特性変動に対して適応可能であり、風外乱補償については更に改善の必要があるものの、着岸操船の各局面において学習による適応機能と汎化特性を示すことを計算機シミュレーションによって確認したので、その結果を報告する。

2. 外乱を考慮した操縦運動方程式

2.1 非線形運動方程式

Fig. 1 に示されるような座標系を用い、潮流、風、波の外乱の中を航行する、船の横揺を考慮した操縦運動を考える。

潮流が存在するときは、潮流（流速： V_C 、流向： Θ_C ）と潮流に対する船の対水速度 $\tilde{U}(\tilde{u}, \tilde{v})$ と空間固定座標系に対する船の対地速度 $U(u, v)$ の間の関係及び対水横流れ角 $\tilde{\beta}$ と対地横流れ角 β の関係を考慮すると、船の慣性主軸 $G-xyz$ に関する操縦運動方程式は次式で表される^{7,8)}。ただし、“'” は変数の無次元量を表す。

$$\left. \begin{aligned} & (m' + m'_x) \left(\frac{L}{U}\right) \left(\frac{\dot{U}}{U} \cos \beta - \dot{\beta} \sin \beta\right) \\ & + (m' + m'_y) r' \sin \beta \\ & - (m'_x - m'_y) \left(\frac{V_C}{U}\right) r' \sin(\Theta_C - \psi) = X' \\ & - (m' + m'_y) \left(\frac{L}{U}\right) \left(\frac{\dot{U}}{U} \sin \beta + \dot{\beta} \cos \beta\right) \\ & + (m' + m'_x) r' \cos \beta \\ & - (m'_x - m'_y) \left(\frac{V_C}{U}\right) r' \cos(\Theta_C - \psi) = Y' \\ & (I'_{zz} + i'_{zz}) \left(\frac{L}{U}\right)^2 \left(\frac{\dot{U}}{U} r' + \frac{U}{L} r'\right) = N' \\ & (I'_{xx} + i'_{xx}) \left(\frac{L}{U}\right)^2 \left(\frac{\dot{U}}{U} p' + \frac{U}{L} p'\right) = K' \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

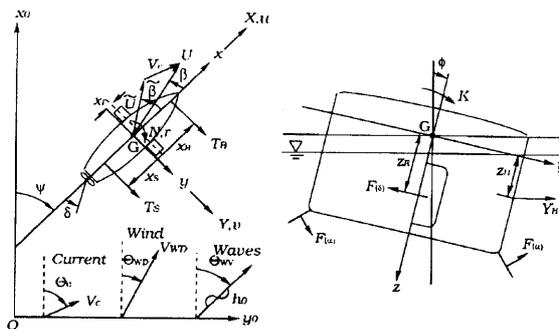


Fig. 1 Coordinate systems

また、回頭角 ψ と横揺角 ϕ と船体重心位置 x_0, y_0 は、次式によって求められる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi} &= \frac{U}{L} r' \\ \dot{\phi} &= \frac{U}{L} p' \\ \dot{x}'_0 &= \frac{U}{L} \cos(\psi - \beta) \\ \dot{y}'_0 &= \frac{U}{L} \sin(\psi - \beta) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ただし、 $x'_0 = x_0/L, y'_0 = y_0/L, L$ は船長である。

(1) 式の外力 X', Y', N' 及び K' は、MMG モデルの考えに従って次式で与えられ、操縦微係数は文献⁷⁾の簡易式によって求められる。潮流が存在するときの外力は、 U と β の代わりに対水速度 \tilde{U} と対水横流れ角 $\tilde{\beta}$ を用いて計算される。

$$\left. \begin{aligned} X' &= X'_H + X'_P + X'_R + X'_{WD} \\ &+ X'_{WV} \\ Y' &= Y'_H + Y'_R + Y'_F + Y'_B + Y'_S \\ &+ Y'_{WD} + Y'_{WV} \\ N' &= N'_H + N'_R + N'_F + N'_B + N'_S \\ &+ N'_{WD} + N'_{WV} \\ K' &= K'_H + K'_R + K'_F + K'_{WV} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、添え字は、 H : 船体、 P : プロペラ、 R : 舵、 F : フィン、 B : バウスラスター、 S : スタンスラスター、 WD : 風外乱、 WV : 波外乱、を示す。スラスター駆動及び風外乱による船体横傾斜は小さいとして、(3) 式の第 4 式では K'_B, K'_S 及び K'_{WD} を無視している。

アプローチ操船から着岸直前のパーシング操船に移る時点では船速は微速または 0 で、横流れ角の非常に大きな運動になる。この場合の横力は、横流れによる揚力ではなくいわゆる cross flow drag が大きく寄与するので、通常の前進数学モデルから低速時の操縦運動モデルに滑らかに変更する必要があるが、現在このような操縦

運動モデルは得られないので、ここでは、通常の操縦運動モデルをそのまま用いることにし、本来適切ではないが、着棧直前の運動は、数値計算上可能な限り小さな船速を与えて得られる運動を便宜的にそれとみなすことにする。

2.2 線形運動方程式

制御対象の伝達関数を求める際に必要となる線形操縦運動方程式を示す。

今、操作部開動または微小外乱によって、 β 、 r' 、 ψ 、 p' 、 ϕ に微小な変化が生じ、その時、船速 U の変化は小さいが無視できないものと仮定する。以上の仮定を設け、外力を MMG モデルによって定式化すれば、線形操縦運動方程式は (1)、(2) 式から次式の形に導かれる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{U} + a_{11}U &= X_\ell \\ \dot{\beta} + a_{21}\beta + a_{22}r' + a_{23}\phi &= Y_\ell \\ \dot{r}' + a_{31}r' + a_{32}\beta + a_{33}\phi &= N_\ell \\ \dot{p}' + a_{41}p' + a_{42}\beta + a_{43}r' + a_{44}\phi &= K_\ell \\ \dot{\beta} - \beta + a_{51}\psi &= C_\ell \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} \dot{\psi} + a_{61}r' &= 0 \\ \dot{\phi} + a_{71}p' &= 0 \\ \dot{x}'_0 + a_{81}U &= 0 \\ \dot{y}'_0 + a_{91}\beta + a_{92}\psi &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ただし、 $X_\ell = b_{11}n + b_{16}X'_{WD} + b_{17}X'_{WV}$
 $Y_\ell = b_{22}\delta + b_{23}\alpha_0 + b_{24}T'_B + b_{25}T'_S$
 $\quad + b_{26}Y'_{WD} + b_{27}Y'_{WV}$
 $N_\ell = b_{32}\delta + b_{33}\alpha_0 + b_{34}T'_B + b_{35}T'_S$
 $\quad + b_{36}N'_{WD} + b_{37}N'_{WV}$
 $K_\ell = b_{42}\delta + b_{43}\alpha_0 + b_{47}K'_{WV}$
 $C_\ell = (V_C/U_0) \sin \Theta_C$
 n : プロペラ回転数、 δ : 舵角、 α_0 : フィン角
 T_B : バウスラスタースタ推力
 T_S : スタンスラスタースタ推力

潮流が無視できる時には、 $V_C = 0 (\beta = \tilde{\beta})$ となり、(4) 式の第 5 式は考えなくてもよいことになる。

3. 学習型フィードフォワード制御システム

自動着棧操船では、誘導実行の前に、操船ルートや船速、船体姿勢などが操船計画⁹⁾によって立案されなければならないが、ここではすでに、操船計画によって自動着棧のための目標値が設定されているものとして、それには触れない。

通常、着棧操船時の船舶の運動特性は、船速の変化とともに大きく変動する。従って、着棧操船を自動制御する場合、アプローチ操船制御時に適正であったフィード

バックゲインは、接岸直前のパーシング操船制御時には不適となり、ゲインを変更するか制御方式を変更する必要がある。

ここでは、学習型フィードフォワード制御方式が、制御対象の動特性変化に対して、制御系を変更しなくても学習による適応機能によってかなりの制御性能が維持されることを示すと同時に、風外乱補償制御系によって風外乱の影響が補償されることを示す。

3.1 自動着棧制御システムの設計

文献^{1, 2, 3)}に述べられている多変数制御系の設計法に従って、自動着棧制御システムを設計する。

Table 1 Principal particulars of the object ship

Items		
Displacement	W	24, 742 ton
Length	L_{pp}	175.00 m
Breadth	B	25.40 m
Draught	d	9.50 m
Block coefficient	C_B	0.572

制御対象船は船長 175 m のいわゆる SR108 コンテナ船であり、船体主要目を Table 1 に示す。詳細については文献¹⁰⁾に記載されているのでここでは省略する。ただし、SR108 コンテナ船にはフィン及びスラスタの装備は想定されていないが、本論文ではバウスラスタースタ及びスタンスラスタースタを用いて制御を行うので、スラスタはそれぞれ船体重心位置から $x'_B = x_B/L = 0.375$ 及び $x'_S = x_S/L = -0.350$ の位置に設置されているものと仮定する。スラスタの最大推力はそれぞれ 40 ton、推力の最大増加率は 2.86 ton/sec と仮定している。

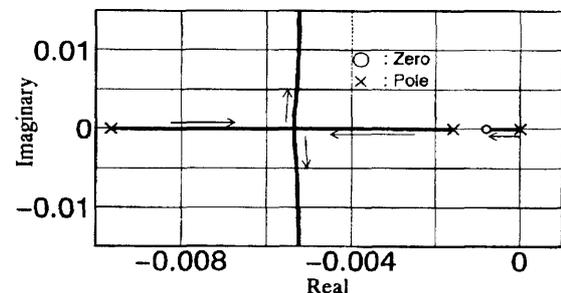


Fig. 2 Root loci of the closed-loop transfer function from thrust of the bow thruster to heading angle ($U_0 = 1$ knot)

学習型フィードフォワード制御システムを構成する逆システムは安定でなければならず、そのためには、

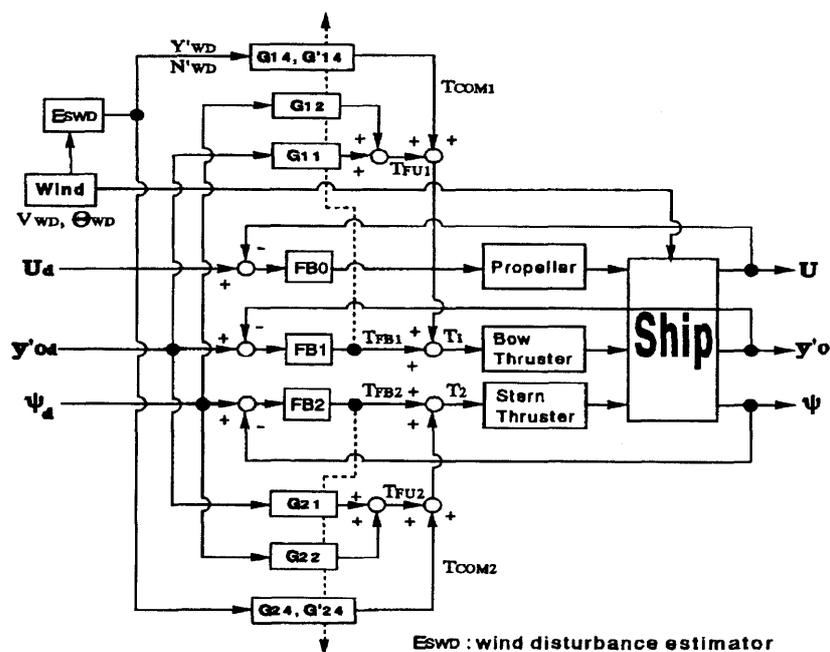


Fig. 3 Block diagram of automatic approach and berthing control system based on the LFFC system

SR108 コンテナ船の伝達特性が安定でなければならない^{4, 5)}。バウスラスタ-推力から回頭角までの伝達関数を例にとってその根軌跡を Fig. 2 に示す。この伝達特性は、極及び零点が左半平面にある安定な最小位相推移系であり、従って、それから得られる逆伝達関数も安定である。その他の伝達特性についても安定であることを確認している。

Fig. 3 に、プロペラ、バウスラスタ-、スタンスラスタ-によって船速、横移動量、回頭角を同時に制御し、目標の位置に船体を接岸する自動着岸制御系のブロック線図を示す。

船速に関する制御は、簡単のため、比例ゲインのみの単純なフィードバックループとし、目標値をできるだけ速やかに実現できるようなゲインを設定している。その他のフィードバック制御系は、横方向の移動量 y'_0 の偏差からバウスラスタ-の推力が、また、回頭角 ψ の偏差からスタンスラスタ-の推力が得られるように構成されている。各々のフィードバックコントローラから出力される操作量 T_{FBi} は、バウスラスタ-推力とスタンスラスタ-推力を出力する LFFC システムのフィードバック誤差学習を実行するための教師信号となる。教師信号は結合係数の学習ができればよいため、各フィードバックコントローラに良好な制御性能を要求する必要はなく、ゲインは安定な小さな値が設定されている。

文献^{1, 2, 3)} に記述されている設計法に従って選択されたフィードバックコントローラ (PD 動作) は、 $k_p(1 + T_D s)$ で表され、それらのパラメータ値は次のよ

うである。

$$FB0 : k_p = 1.47 \text{ rps/knot}$$

$$FB1 : k_p = 16000 \text{ kg}, T_D = 150 \text{ sec}$$

$$FB2 : k_p = -389 \text{ kg/deg}, T_D = 200 \text{ sec}$$

フィードバックコントローラのみによる、目標値 (破線) に対する制御結果を Fig. 4 に一点鎖線で示している。船速は目標の 3 ノットを実現しているが、横移動量 y'_0 および回頭角 ψ については、制御精度がよくない。

Fig. 3 における G_{ij} は逆システムを表し、 (G_{11}, G_{12}) 及び (G_{21}, G_{22}) は目標値追従系 (LFFCD)、 (G_{14}, G'_{14}) 及び (G_{24}, G'_{24}) は風外乱補償系 (LFFCWD) で、結合係数 W_{ijk} を用いて次式で表される。

$$\left. \begin{aligned} G_{11}(s) &= \frac{T'_B(s)}{y'_0(s)} = \frac{b_{35}s^2 \cdot W_{111} + E \cdot W_{112}}{-a_{91}H} \\ G_{12}(s) &= \frac{T'_B(s)}{\psi(s)} = \frac{a_{91}b_{25}s^2 \cdot W_{121} - J \cdot W_{122} - D \cdot E \cdot W_{123}}{a_{61}a_{91}H} \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} G_{21}(s) &= \frac{T'_S(s)}{y'_0(s)} = \frac{b_{34}s^2 \cdot W_{211} + Q \cdot W_{212}}{a_{91}H} \\ G_{22}(s) &= \frac{T'_S(s)}{\psi(s)} = \frac{-a_{91}b_{24}s^2 \cdot W_{221} + P \cdot W_{222} + D \cdot Q \cdot W_{223}}{a_{61}a_{91}H} \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\left. \begin{aligned} G_{14}(s) &= \frac{T'_B(s)}{Y'_{WD}(s)} = \frac{-b_{26}b_{35} \cdot W_{141}}{H} \\ G'_{14}(s) &= \frac{T'_B(s)}{N'_{WD}(s)} = \frac{b_{25}b_{35} \cdot W_{142}}{H} \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

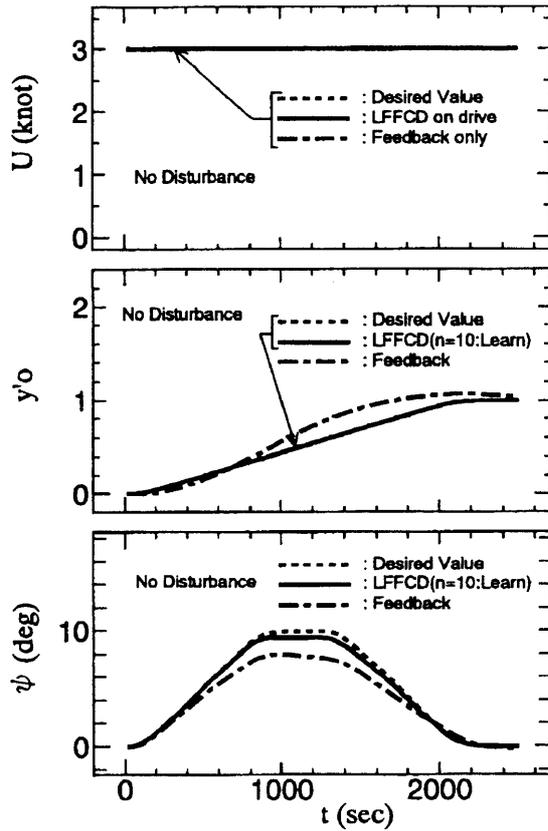


Fig. 4 Desired values for learning and responses of LFFCD after 10 learning trials

$$\left. \begin{aligned} G_{24}(s) &= \frac{T'_S(s)}{Y'_{W,D}(s)} = \frac{b_{26}b_{34} \cdot W_{241}}{H} \\ G'_{24}(s) &= \frac{T'_S(s)}{N'_{W,D}(s)} = \frac{-b_{24}b_{36} \cdot W_{242}}{H} \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ただし、

$$\begin{aligned} H &= b_{24}b_{35} - b_{25}b_{34} \\ J &= a_{22}a_{91}b_{35} - a_{31}a_{91}b_{25} + a_{61}a_{92}b_{35} \\ D &= a_{61}a_{92} + a_{51}a_{61}a_{91} \\ E &= a_{21}b_{35} - a_{32}b_{25} \\ P &= a_{22}a_{91}b_{34} - a_{31}a_{91}b_{24} + a_{61}a_{92}b_{34} \\ Q &= a_{21}b_{34} - a_{32}b_{24} \end{aligned}$$

G_{ij} と G'_{ij} は同一の外乱からの信号を入力とすることから、一対で1つの逆システムとみなしている。また、逆システム G_{ij} の添え字 i は操作部の種類 (バウスラスタ: $i=1$ 、スタンスラスタ: $i=2$)、 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 : $j=2$) または外乱の種類 (風: $j=4$) である。

逆システムは s の次数の異なるサブシステムに分けられると考え、それぞれに結合係数が連結され、結合係数はフィードバック誤差学習によって制御対象の逆特性を正確に近似するように調整される。

逆システムへの入力が高率過程で、結合係数 (シナプス荷重) 変化の時定数が十分に大きければ、結合係数 W は学習方程式によって、フィードバックコントローラからの出力 T_{FB} が最小となる値に平均収束し、制御対象の入出力特性を逆に見たシステムの近似が得られることが、川人¹¹⁾によって数学的に証明されている。ただし、このときの学習方程式は (10) 式の右辺第 2 項を除いた式で、この場合、学習速度は非常に遅く、数百回または数千回の学習回数を必要とする。

ここでは、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を用いることにする¹²⁾。

$$W_{ijk} = w_{ij} \int y_{ijk} \cdot T_{FBi} dt + w_{pij} \cdot y_{ijk} \cdot T_{FBi} \quad (10)$$

ただし、 y_{ijk} は逆システムの中の各サブシステムからの出力、 T_{FBi} はフィードバックコントローラからの出力である。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} の学習の安定と速度に関する学習方程式の係数である。

これらの学習方程式の係数は、(11) 式に示す制御偏差の自乗時間積分値 ϵ_j の学習 1 回目の値を評価規範とし、1) 積分項、2) 比例項、の順に決定される^{1, 2, 3)}。

$$\epsilon_j = \int \{x_{dj}(t) - x_j(t)\}^2 dt \quad (j=1, 2) \quad (11)$$

ここで、 x_d は目標値、 x は制御量を表す。

LFFCD のために採用された学習方程式の係数は、

$$\begin{aligned} (G_{11}, G_{12}) : w_{11} = w_{12} = 10^{-9} \\ w_{p11} = w_{p12} = 10^{-2} \\ (G_{21}, G_{22}) : w_{21} = w_{22} = 10^{-6} \\ w_{p21} = w_{p22} = 3 \times 10^{-1} \end{aligned}$$

である。

学習方程式の係数が決定された後、Fig. 4 に示す目標値に対してくり返し学習を実施する。 ϵ_j が十分に小さくなれば学習が終了したとみなし、普通 2、3 回で学習は終了する。実際には念のため 2500 秒間の学習を 10 回実施している。

10 回学習後の LFFCD による制御結果を Fig. 4 に実線で示している。回頭角に若干制御偏差が残っているが良好な制御結果が得られている。

LFFCWD の諸量を決定する時には、時刻 $t=0$ 秒において、ステップ状の風が突然に吹いてくるものとし、外乱に対して原針路を保つ補償制御を考える¹⁾。実際の風外乱は時間と共に変動するが、このような変動外乱は近似的にステップ関数の重ね合せと考えることができ、ステップ状のある代表風外乱に対して学習が終了していれば、変動風に対しても学習効果が期待でき、後は

ニューラルネットワーク特有の汎化特性によって対応できると考えられる。その証左は文献^{1), 5)}に示されているので、ここでは LFFCWD の学習及び変動風に対するシミュレーション結果についての詳細は省略する。

LFFCWD のために採用された学習方程式の係数は、

$$(\mathbf{G}_{14}, \mathbf{G}'_{14}) : w_{14} = 10^{-8}, w_{p14} = 10^{-1}$$

$$(\mathbf{G}_{24}, \mathbf{G}'_{24}) : w_{24} = 10^{-8}, w_{p24} = 10^{-1}$$

である。

LFFCD 及び LFFCWD の学習方程式の係数探索における結合係数の初期値は全て 1 としている。LFFCWD は風速 15 ノットの風に対して、LFFCD と同様に 10 回の学習を実施している。学習時の船速は 3 ノットである。制御系は制御実行中も、与えられた目標値に対して学習を継続している。

風外乱によって船体に働く外力の推算法は多くの方法が提案されているが、ここでは Isherwood¹³⁾の方法に従っている。

4. 自動着棧制御のシミュレーション結果

操船計画によって決定された操船目標は、初期船速 3 ノットを保ったままバウスラスタースタートとスタンスラスタースタートを用いて、回頭しながら横方向に 1.9 船長まで幅寄せし、その後、0.3 ノットに減速し、更に岸壁に平行に 0.1 船長幅寄せする着棧操船とする。

Fig. 5 に外乱がないと仮定した時の LFFCD 単独の制御結果を示す。

左図の上段の図は船速、中段の図は横移動量、下段の図は回頭角を示す。また、中央図の上段の図はプロペラ回転数、中段の図はスラスタースタート推力、下段の図は横流れ角を示す。右図は船の 100 秒毎の位置と姿勢そして船体重心の目標軌道を示している。以下、図の並びは同じである。

アプローチ操船からパーシング操船に移行する際にも、制御系の変更は行わず制御系の学習機能に任せている。

3 ノットから 0.3 ノットに減速された後も制御性能はさほど低下しているようには見られず、1000 ~ 1100 秒でスタンスラスタースタートの推力に振動傾向が現れているが、総じて LFFCD の学習機能が有効に働いていると思われる。スラスタースタート推力の振動は、推力の最大増加率を大きくすることによって解消されることから、操作部の能力は制御性能にかなり影響があると思われる。また、左図の下段の図に見られるように、2° 程度の回頭が生じているが、実用上は許容できるものと思われ、これは時間の経過と共に 0 に収束することを確認している。

次に、Fig. 6 に風外乱がある時の LFFCD 単独の制御結果を示す。

実際の風外乱は時間と共に変動するが、ここでは、簡単のため時刻 $t = 0$ 秒においてステップ状の定常外乱として与えた。

風外乱は絶対風速 $V_{WD} = 30$ ノット、絶対風向 $\Theta_{WD} = 135^\circ$ である。LFFCD 単独では風外乱は補償できず、0.3 ノットに減速してからは制御不能となっている。これは LFFCWD がいないため、風外乱を補償するための適切な操作量が出力されないからである。

フィードバック制御システムでは、目標値からの偏差および外乱の影響は全て制御偏差に現れており、その偏差をどのような制御則で補償するかが問題であった。学習型フィードフォワード制御系においては、目標値追従系と外乱補償系は明確に分離されており、目標値追従系のみでは外乱を補償できないことは文献^{1), 2), 3), 5)}にも明確に示されている。

実際の着棧操船においては常に外乱が存在し、操船者が手動で着棧操船する場合は、外乱の影響を常に念頭に置いて操船される。これと同様に、自動着棧制御システムにおいても、目標値に対する精度よい追従機能を有することはもちろん、外乱に対する補償機能を備えていなければならない。

ここでは、絶対風速 $V_{WD} = 30$ ノット、絶対風向 Θ_{WD} が 45° 、 135° 、 225° 及び 315° の場合について、LFFCD と LFFCWD を備えた制御システムの計算機シミュレーションを実施し、Fig. 7~Fig. 10 に示す。

目標値は Fig. 5 及び Fig. 6 と同じである。

風向に関わりなく良好な制御結果が得られており、LFFCD と LFFCWD が干渉することなく有効に作動していると考えられる。

以上の計算アルゴリズムは積分法として 5 次のルンゲ・クッタ法を用いている。計算ステップは、Fig. 5 及び Fig. 6 は 1 秒の固定ステップとしている。また、Fig. 7~Fig. 10 では、0.1 秒の固定ステップとしている。Fig. 7~Fig. 10 の計算を 1 秒の固定ステップで実施すると、計算が振動的となる。因みに、風速が $V_{WD} = 10$ ノット程度の低外乱であれば、1 秒の固定ステップでも安定に計算できる。この原因は、LFFCD 単独時の計算及び低外乱時の計算が 1 秒の固定ステップで可能であることを考えると、大きな外乱がある時の LFFCWD の学習速度に問題があると考えられる。

実船実験時に GPS から得られる位置情報は、サンプリングタイムが 1 秒であることを考えると、LFFCWD の改良が更に必要であると考えられる。

5. 結 言

アプローチ操船から着棧直前のパーシング操船までの運動特性を連続的に表現できる操縦運動モデルは、現時

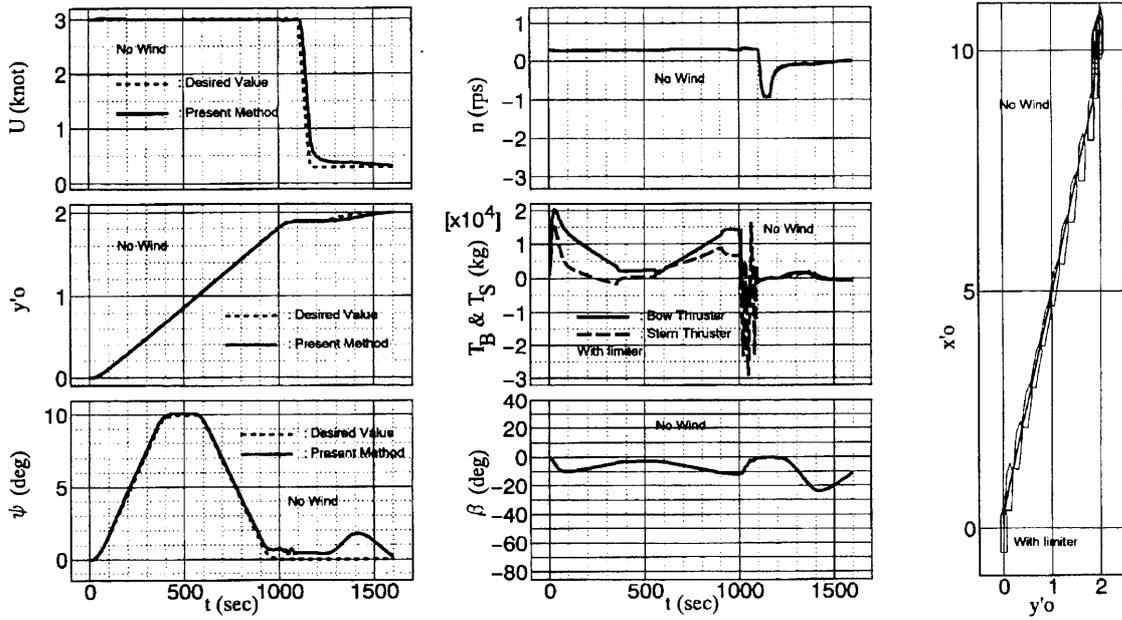


Fig. 5 Follow-up ability with respect to the desired values, manipulated variables, and trajectory with LFFCD, under no disturbance

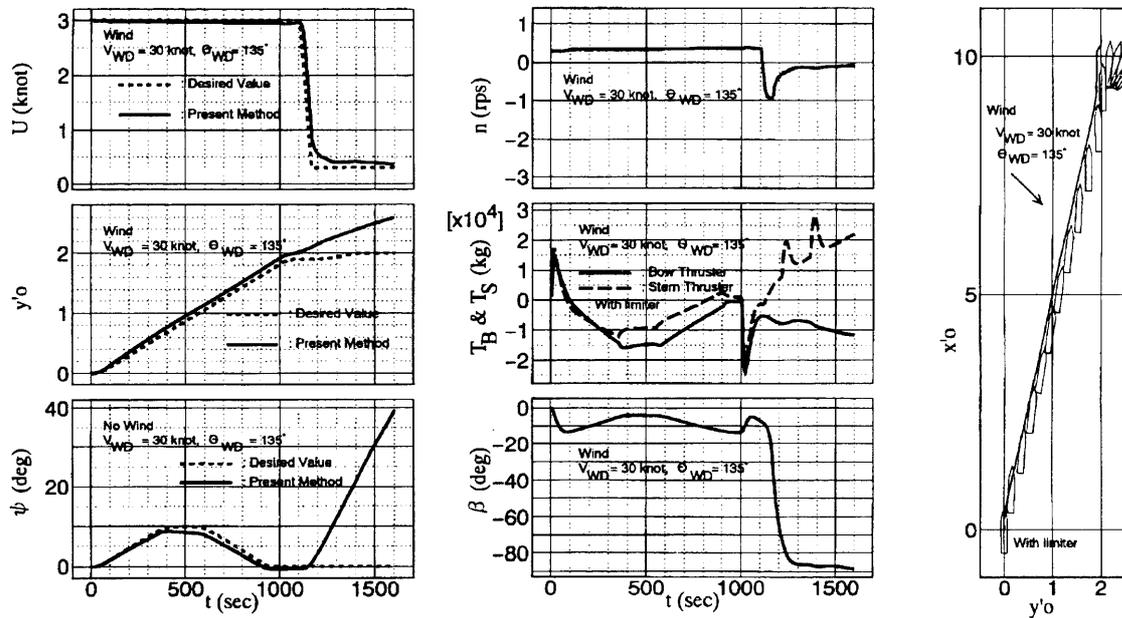


Fig. 6 Follow-up ability with respect to the desired values, manipulated variables, and trajectory with LFFCD, under wind disturbance ($V_{WD} = 30\text{knots}$, $\Theta_{WD} = 135^\circ$)

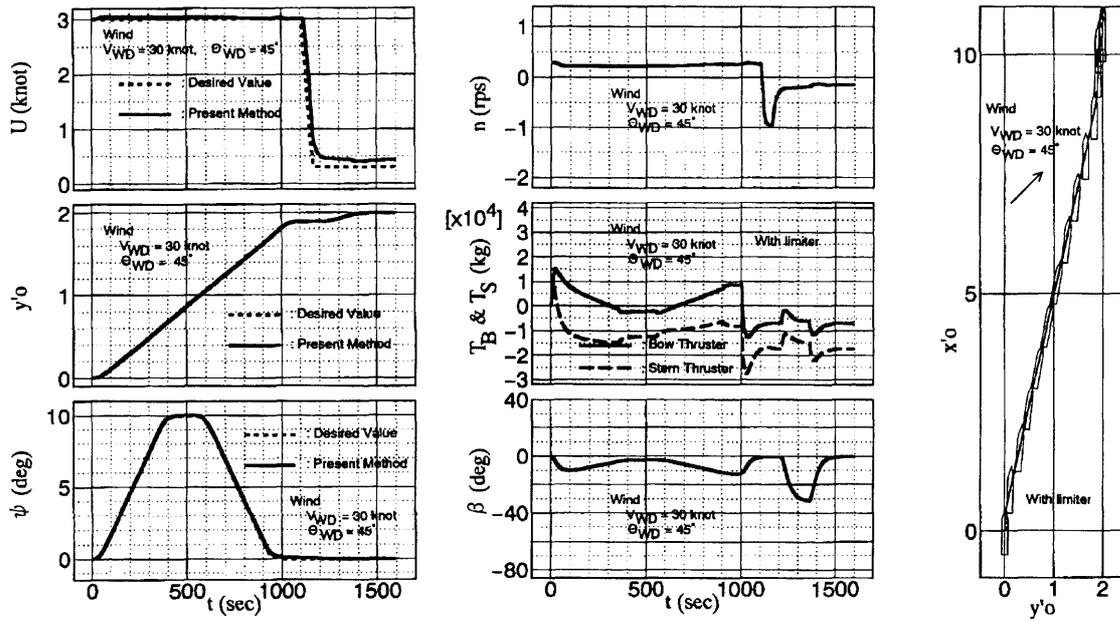


Fig. 7 Follow-up ability with respect to the desired values, manipulated variables, and trajectory with LFFCD and LFFCWD, under wind disturbance ($V_{WD} = 30\text{knots}$, $\Theta_{WD} = 45^\circ$)

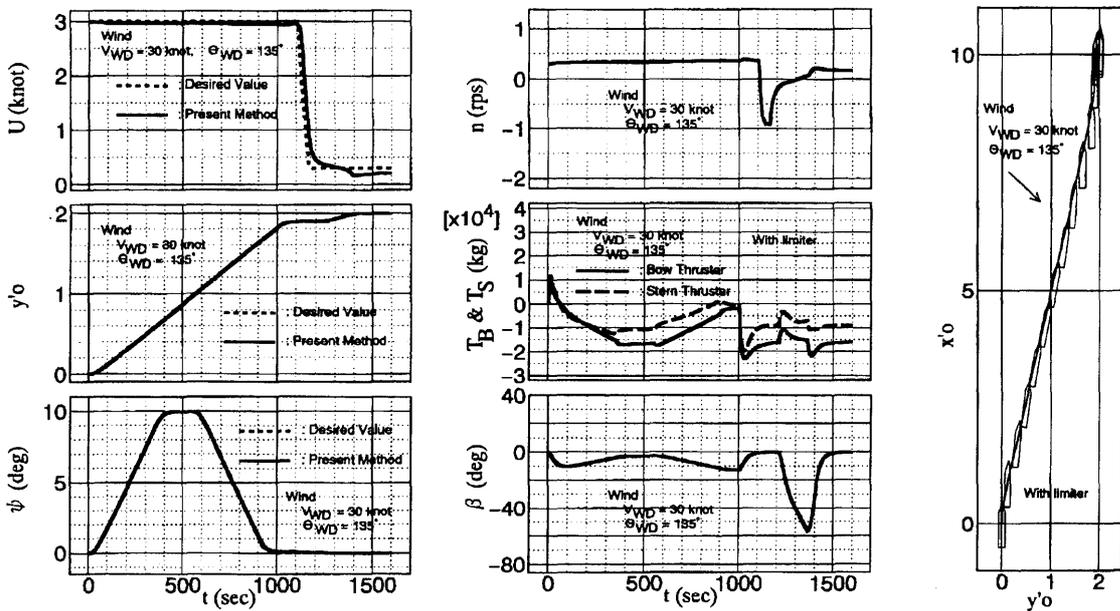


Fig. 8 Follow-up ability with respect to the desired values, manipulated variables, and trajectory with LFFCD and LFFCWD, under wind disturbance ($V_{WD} = 30\text{knots}$, $\Theta_{WD} = 135^\circ$)

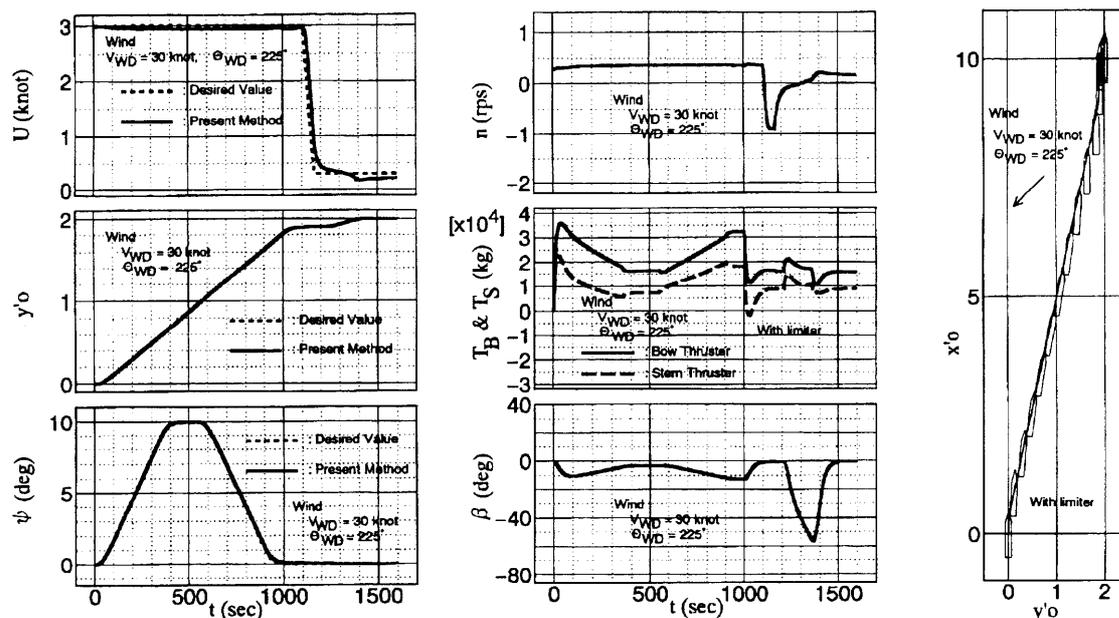


Fig. 9 Follow-up ability with respect to the desired values, manipulated variables, and trajectory with LFFCD and LFFCWD, under wind disturbance ($V_W = 30\text{knots}$, $\Theta_{WD} = 225^\circ$)

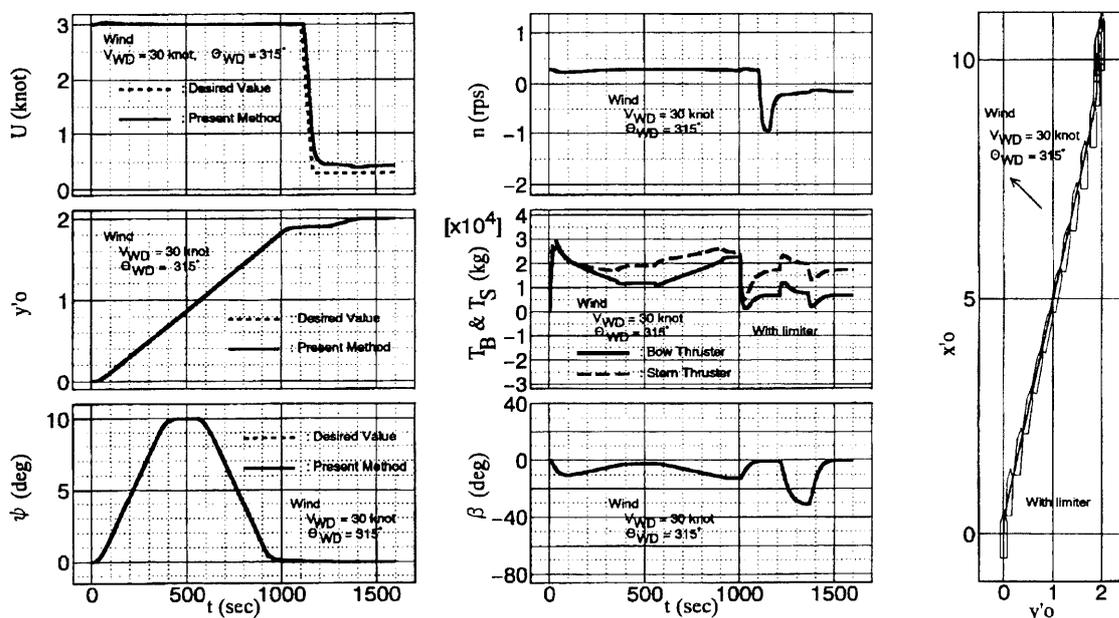


Fig. 10 Follow-up ability with respect to the desired values, manipulated variables, and trajectory with LFFCD and LFFCWD, under wind disturbance ($V_W = 30\text{knots}$, $\Theta_{WD} = 315^\circ$)

点では入手困難であり、今後この操船問題に対応できる操縦運動モデルの開発が待たれるところである。今回は、通常船速モデルに数値計算上可能な限り小さな船速を与えて得られる運動を便宜的に着陸直前の運動とみなすことにし、このモデルで得られる範囲の非線形性と運動特性変化に対して学習による適応機能と汎化特性が発揮できるかを調査した。

文献^{1, 2, 3)}に示されている設計法に従って設計された自動着陸制御システムの制御性能を計算機シミュレーションによって検討した結果、以下のような結論が得られた。

1. 学習型フィードフォワード制御システムの逆システムの構成は、線形操縦運動方程式から導かれるいわゆる逆伝達関数と同じ構造にすることによって、十分なフィードフォワード制御機能を発揮できる。
2. 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間の干渉は小さく、予め学習されていない目標値や外乱に対しても学習機能と汎化特性によって適応できる。
3. 学習型フィードフォワード制御方式によって、複数の目標値追従と風外乱を同時に補償する制御系が得られたが、実用的な観点から、風外乱補償系は更に改良が必要である。

以上の結論の有効性は、通常の操縦運動モデルから得られる非線形運動と運動特性変化の範囲に限られる。従って、実際の操縦運動制御の立場からは、通常船速から着陸直前の低船速までの運動特性変化をもっと正確に一貫して表現できる数学モデルを用いて、再度検討すべき余地が残されている。

参 考 文 献

- 1) 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.
- 2) 小川原陽一, 岩本才次, 山本善弘: 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 —, 日本造船学会論文集, 第180号(1996) pp.705-712.
- 3) Iwamoto, S. and Ogawara, Y: A Ship manoeuvring Control System to Compensate for the Influence of Current, Wind, and Wave Disturbances, *Memoirs of the Faculty of Engineering, Kyushu University*, Vol. 57, No. 4, December (1997) pp.133-145.
- 4) 岩本才次, 山本善弘, 小川原陽一: 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(II) — 実船実験による目標値追従制御系の検証 —, 日本造船学会論文集, 第183号(1998) pp.165-171.
- 5) 岩本才次: 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(III) — 実船実験による風外乱補償制御系の検証 —, 日本造船学会論文集, 第188号(2000) pp.201-209.
- 6) 小山健夫, 金 雁, 金 奎煥: 船の自動離着陸システムの考察(第1報), 日本造船学論文集 第162号, (1987) pp.201-210.
- 7) Kijima, K., Katsuno, T., Nakiri, Y. and Furukawa, Y: 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.
- 8) 貴島勝郎, 古川芳孝, 江島光昭, 山本欽司: 操縦運動時における横傾斜に関する一考察, 西部造船会々報, 第93号(1997) pp.35-46.
- 9) 小瀬邦治, 福戸淳司, 菅野賢治, 赤木 茂, 原田美秀子: 船の自動離着陸システムに関する研究, 日本造船学論文集 第160号, (1986) pp.103-110.
- 10) 第108研究部会 高速貨物船の波浪中における諸性能に関する研究報告書, 社団法人日本造船研究協会, 1970.3.
- 11) Kawato, M: 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.
- 12) 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.
- 13) Isherwood, R. M: Wind Resistance of Merchant Ships, *TRANSACTIONS OF THE ROYAL INSTITUTION OF NAVAL ARCHITECTS*, Vol. 115 (1973) pp.327-338.