

《技術報告》

船舶用アダプティブオートパイロットの
航海シミュレーション

森 本 隆*

1. まえがき

従来、船のオートパイロットはアナログ方式によるPID 制御が主体であった。

しかし近年の人件費の上昇とオイルショックによる燃費の上昇の結果、船舶運行時の省人化、省エネルギー化への要求はオートパイロットシステムの自動化と省エネ化（省燃費化）をもたらした。

上記背景と近年のマイクロコンピュータの発達は今現代制御理論によるゲインの自動化設計ともいべきデジタルアダプティブオートパイロットを生み出す契機となった。

オートパイロットの目的は船を所定の設定コースに乗せるよう制御することである。

この際望ましい制御特性は勝れた変針能力と保針能力であり、これは下記の設定条件を満足せねばならない。

- 1) 保針時におけるターンレート（回頭角速度）を

最小にする。

- 2) コースからの偏差を最小にする。
- 3) 操舵量（制御入力 U_δ ）を最小にする。
- 4) コースからの定常偏差を最小にする。
- 5) 変針時での設定レートからの偏差と定常偏差を最小にする。

従来のオートパイロットは積み荷の変化（内部外乱）や気象、海象の変化（外部外乱）に対する制御ゲインの調整を手動で行っていたため航海上にかかる負担は極めて大きかった。

本報告は上記外乱に対し当初の望ましい制御特性を保持するよう制御ゲインを自動調整するアダプティブオートパイロットおよびそのシミュレーション、実船テストについて報告するものである。

1) から 5) を考慮した評価関数を最小にするような最適操舵量は最適トラッキングレギュレータに関するLQG 問題の解より各種の船に対し事前に求めゲインスケジューリング手法によりテーブル化しておく。

拡張力カルマンフィルタの実時間処理による船体の動特性の同定結果に基づき、その船に見合った最適操舵ゲインが前記テーブルより選択される

図1に本アダプティブオートパイロットの機能ブロック図を示す。

2. 船体モデル

同定のための船体モデルは現在オートパイロットによく用いられている野本の簡略化旋回応答モデル¹⁾を採用した。

$$\ddot{\psi}(t) + \dot{\psi}(t)/T_V = K_V U_\delta(t)/T_V \quad (1)$$

ここで $\dot{\psi} = d\psi/dt$; 微分演算子, ψ ; 方位角, $\dot{\psi}$; ターンレート, U_δ ; 操舵量, T_V ; 追従性指数, K_V ; 旋回性指数である。

T_V , K_V は船の種類, 積み荷の変化やバラスト（船体重心を低くするために取りこむ海水）の変化により変動する船体の動特性パラメータである。

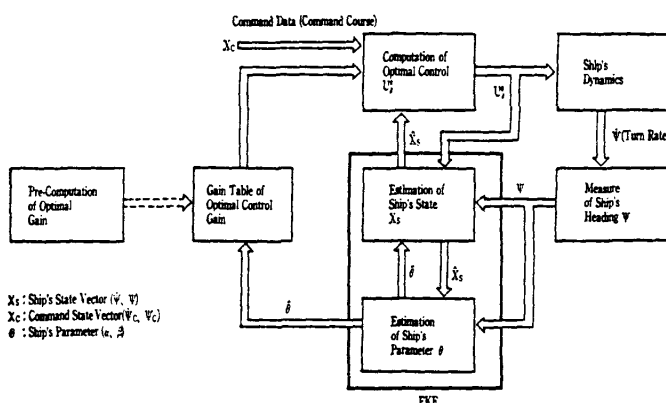


図1 アダプティブオートパイロットの機能ブロック図

Seafaring Simulation of Ship's Adaptive Auto Pilot.
By Takashi Morimoto (Yokogawa Hokushin Electric Corporation)

* 横河北辰電機株式会社

以下

$$\alpha = 1/T_V \quad (2)$$

$$\beta = K_V/T_V \quad (3)$$

とし、この α と β を拡張カルマンフィルタで同定し、 α 、 β に見合った最適操舵量 U_s^0 を決定することが本アダプティブオートパイロットの目的である。

(1)式は本来針路安定船の線形モデルであるが、針路不安定船に対しても充分実用に供しうることをシミュレーションにより確認した。

尚、参考のため肥大船のような針路不安定船の非線形モデルを次式に示しておく。

$$\ddot{\psi}(t) + \alpha \dot{\psi}(t) + \gamma(\dot{\psi}(t))^3 = \beta U_s(t) \quad (4)$$

3. 状態推定とパラメータ同定アルゴリズム

$\Delta^{2), 3)}$

(1)式を次のように2次元の状態ベクトル表現する。

$$\begin{bmatrix} \dot{\psi}(t) \\ \psi(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\psi}(t) \\ \psi(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \beta \\ 0 \end{bmatrix} U_s(t) + \begin{bmatrix} \beta \\ 0 \end{bmatrix} W_d(t) \quad (5)$$

ここで W_d は平均値0分散 σ_w の正規性白色雑音でパラメータ (α, β) は入出港時を除いてはほぼ一定と考えられ下記のようにモデル化される。

$$\begin{bmatrix} \dot{\alpha}(t) \\ \dot{\beta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで α と β を同定するため(5)式に(6)式を付加した拡大モデルを下記のように導出する。

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_s(t) \\ \dot{\theta}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{X_s}(X_s(t), \theta(t), t) \\ 0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_{ws} \\ 0 \end{bmatrix} W_d(t) \quad (7)$$

ここで

$$X_s^T = [\dot{\psi} \quad \psi] \quad (X_s; 2 \text{次元状態ベクトル}) \quad (8)$$

$$\theta^T = [\alpha \quad \beta] \quad (\theta; 2 \text{次元パラメータベクトル}) \quad (9)$$

$$G_{ws}^T = [\beta \quad 0] \quad (G_{ws}; 2 \text{行1列の係数行列}) \quad (10)$$

$$f_{X_s} = \begin{bmatrix} -\alpha \dot{\psi} + \beta u_s \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} \quad (11)$$

状態 X_s の推定とパラメータ θ の同定は以下の拡張カルマンフィルタにより遂行される。

$$\hat{X}_s = f_{X_s}(\hat{X}_s(t), \hat{\theta}(t), t) + K_X(t) \{y(t) - \hat{y}(t)\} \quad (12)$$

$$\hat{\theta}(t) = K_\theta(t) \{y(t) - \hat{y}(t)\} \quad (13)$$

ここで $\hat{X}_s$ は X_s の推定値、 $\hat{\theta}$ は θ の推定値(同定値)を示す。

また K_X 、 K_θ は X_s と θ に関するカルマンゲインで次式より求まる。

$$K_X(t) = P_X(t) H_X^T(t) R^{-1}(t) \quad (14)$$

$$K_\theta(t) = P_{\theta X}(t) H_X^T(t) R^{-1}(t) \quad (15)$$

ここで

$$H_X(t) = [1 \quad 1] \quad (\psi \text{ と } \dot{\psi} \text{ を観測}) \quad (16)$$

で与えられる観測行列で y と $\hat{y}$ は次式により求まる観測ベクトルとその予測値である。

$$y(t) = H_X(t) X_s(t) + V(t) \quad (17)$$

$$\hat{y}(t) = H_X(t) \hat{X}_s(t) \quad (18)$$

また X_s の推定誤差の自己分散 P_X 、 X_s の推定誤差と θ の推定誤差との相互分散 $P_{X\theta}$ は次式で計算される。

$$\begin{aligned} \dot{P}_X(t) &= F_X(t) P_X(t) + P_X(t) F_X^T(t) \\ &\quad + F_{X\theta}(t) P_{\theta X}(t) + P_{X\theta}(t) F_{X\theta}^T(t) \\ &\quad - P_X(t) H_X^T(t) R^{-1}(t) H_X(t) P_X(t) \\ &\quad + G_W Q_W G_W^T \end{aligned} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \dot{P}_{X\theta}(t) &= F_X(t) P_{X\theta}(t) + F_{X\theta}(t) P_\theta(t) \\ &\quad - P_X(t) H_X^T(t) R^{-1}(t) H_X(t) P_{X\theta}(t) \end{aligned} \quad (20)$$

$$\dot{P}_{\theta X}(t) = (\dot{P}_{X\theta}(t))^T \quad (21)$$

$$\dot{P}_\theta(t) = -P_{\theta X}(t) H_X^T(t) R^{-1}(t) H_X(t) P_{X\theta}(t) \quad (22)$$

ここで

$$F_X(t) = \left[\frac{\partial f_{X_s}(X_s(t), \theta(t), t)}{\partial X_s} \right]_{\substack{X_s(t) = \hat{X}_s(t) \\ \theta(t) = \hat{\theta}(t)}} \quad (23)$$

$$F_{X\theta}(t) = \left[\frac{\partial f_{X_s}(X_s(t), \theta(t), t)}{\partial \theta} \right]_{\substack{X_s(t) = \hat{X}_s(t) \\ \theta(t) = \hat{\theta}(t)}} \quad (24)$$

である。

以上で W_d と V は下記性質を満足する正規性白色雑音である。

$$E[W_d(t)] = 0 \quad (25)$$

$$E[V(t)] = 0 \quad (26)$$

$$E[W_d(t) V_d^T(\tau)] = 0 \quad (27)$$

$$E[V(t) V^T(\tau)] = R(t) \delta_D(t - \tau) \quad (28)$$

$$E[W_d(t) W_d^T(\tau)] = Q_W(t) \delta_D(t - \tau) \quad (29)$$

ここで A^T は A の転置、 $E[A]$ は A の集合平均を ∂_D はディラックのデルタ関数、そして Q_W と R は W_d と V の分散を示す。以上(22)式から(24)式によりパラメータ $\theta(\alpha, \beta)$ を同定する。

この時の可同定性は下記の場合良好である。

- 1) 船が舵 U_s をとる場合
- 2) 船速が定速に近い場合
- 3) 気象、海象がおだやかな場合

今回 W_d を白色化近似しているため運用条件が 3) を満足しない時有色波浪外乱により状態 X_s の推定精度とパラメータ θ の同定精度は劣化する。

4. 評価関数と最適操舵量計算アルゴリズム

△ (4)~(11)

4.1 評価関数

評価関数を導出するまえに制御対象を導出する。

(5) 式を次のような状態ベクトル表現する。

$$\dot{X}_s(t) = F_s(\theta(t), t) X_s(t) + B(\theta(t), t) U_\delta(t) + G_w W_d(t) \quad (30)$$

ここで未知パラメータ θ は同定された値 $\hat{\theta}$ を用いる。

次に設定コース発生のためのコマンドモデルを導出する。

$$\begin{bmatrix} \ddot{\psi}_c(t) \\ \dot{\psi}_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

ここで

$$\dot{\psi}_c(0) = w_c \text{ (設定レート)} \quad (32)$$

$$\psi_c(0) = \psi_c \text{ (設定方位角)} \quad (33)$$

最後に定値外乱によるオフセット誤差を解決するために必要な I 制御のための設定コースからの偏差モデルを下記のように表わす。

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_1(t) \\ \dot{e}_2(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\psi} \\ \psi \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \dot{\psi}_c \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (34)$$

以上(30), (31), (34) 式より次の拡大制御対象がえられる。

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_s(t) \\ \dot{X}_c(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_s(\theta(t), t) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ H_s & -H_m & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_s \\ X_c \\ e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} G_w \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} W_d(t) + \begin{bmatrix} B(\theta(t), t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} U_\delta(t) \quad (35)$$

ここで

$$X_s^T = [\dot{\psi} \quad \psi] \text{ (2次元状態ベクトル)} \quad (36)$$

$$X_c^T = [\dot{\psi}_c \quad \psi_c] \text{ (2次元コマンドベクトル)} \quad (37)$$

$$e^T = [e_1 \quad e_2] \text{ (2次元偏差ベクトル)} \quad (38)$$

次に新しく Y_z を以下のように定義する。

$$Y_z(t) \triangleq \underbrace{\begin{bmatrix} [H_s \quad -H_m] & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix}}_{\parallel H_z} \underbrace{\begin{bmatrix} X_s \\ X_c \\ e \end{bmatrix}}_{\parallel Z} = H_z \cdot Z \quad (39)$$

ここで

$$H_s = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$$H_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ (変針中)} \quad (41)$$

あるいは

$$H_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ (変針中)} \quad (42)$$

(39) 式の Y_z を用いて評価関数 J は次式で表わされる。

$$J = E \left[Y_z^T(T) M_z(T) Y_z(T) + \int_{t_0}^T \{ Y_z^T(t) Q_z(t) Y_z(t) + U_\delta^T(t) R_z(t) U_\delta(t) \} dt \right] \quad (43)$$

ここで Y_z は以下のような物理的意味をもつ。

$$Y_z = H_z \cdot Z = \left\{ \begin{array}{l} \dot{\psi} - \dot{\psi}_c \quad \leftarrow \text{(設定レート偏差)} \\ \psi - \psi_c \quad \leftarrow \text{(設定方位偏差)} \\ \int (\dot{\psi} - \dot{\psi}_c) dt \quad \leftarrow \text{(上記偏差の積分)} \\ \int (\psi - \psi_c) dt \end{array} \right\} \quad (44)$$

また(43)式の Q_z と R_z は次式に従う 4 行 4 列の非負定対称行列とスカラーである。

$$Q_z = \begin{bmatrix} Q_{z1} & 0 \\ 0 & Q_{z2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \begin{bmatrix} q_{11} & 0 \\ 0 & q_{22} \end{bmatrix} & 0 \\ 0 & \begin{bmatrix} q_{33} & 0 \\ 0 & q_{44} \end{bmatrix} \end{bmatrix} \quad (45)$$

$$R_z = r_z (>0) \quad (46)$$

そして q_{11} から q_{44} , r_z 等の重みは次のような物理的意味をもつ。(43) 式の J を次のように書き直す。

$$J = \int_{t_0}^T \{ \lambda_1 (\bar{\delta\psi})^2 + \lambda_2 (\bar{U_\delta})^2 + \lambda_3 (\bar{\delta\psi})^2 + \lambda_4 (\int \bar{\delta\psi} d\tau)^2 + \lambda_5 (\int \bar{\delta\psi} d\tau)^2 \} dt \quad (47)$$

ここで $\bar{a}$ は a の集合平均であり $M_z(T) = 0$ である。

$\lambda_1 = q_{22}$; 針路偏差による航程増加率

$\lambda_2 = r_z$; 操舵による抵抗増加率

$\lambda_3 = q_{11}$; ヨーイングによる抵抗増加率

$\lambda_4 = q_{44}$; 針路偏差による航程増加率の累積

$\lambda_5 = q_{33}$; ヨーイングによる抵抗増加率の累積

λ_1 から λ_5 は船体特性により異なり船体の長さ、重さにより決まる。

4.2 最適操舵量 U_δ^0 の計算

(35) 式の制御対象に従い(43) 式の評価関数を最小にする最適操舵量 U_δ^0 を求める問題は LQG 問題の解

より次式で与えられる。

$$U_\delta^0(t) = -R_z^{-1} B_z^T(t) M_z(t) \dot{Z}(t) \quad (48)$$

ここで

$$\dot{Z}(t) = [\dot{X}_s^T \dot{X}_c^T \dot{e}^T]^T \quad (49)$$

であり Z の推定値を意味する。

また

$$B_z(t) = \begin{bmatrix} B_a(t) \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B(t) \\ 0 \end{bmatrix} \quad (50)$$

$$M_z(t) = \begin{bmatrix} M_a(t) & M_{ae}(t) \\ M_{ea}(t) & M_e(t) \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} M_s(t) & M_{sc}(t) & M_{ae}^1(t) \\ M_{cs}(t) & M_c(t) & M_{ae}^2(t) \\ M_{ea}^1(t) & M_{ea}^2(t) & M_e(t) \end{bmatrix} \quad (51)$$

上記 M_z は次式により求まる。

$$\dot{M}_z(t) = -M_z(t) F_z(t) - F_z^T(t) M_z(t) + M_z(t) B_z(t) R_z^{-1} B_z^T(t) M_z(t) - H_z^T Q_z H_z \quad (52)$$

$$M_z(T) = 0$$

ここで

$$F_z = \begin{bmatrix} F_s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ H_z & -H_m & 0 \end{bmatrix} \quad (54)$$

$$H_z = \begin{bmatrix} H_s & -H_m & 0 \\ 0 & 0 & I \end{bmatrix} \quad (55)$$

さて(48)式で与えられる U_δ^0 は(49), (50), (51) 式より

$$U_\delta^0(t) = -K_{xs}^0(t) \dot{X}_s(t) - K_{xc}^0(t) X_c(t) - K_e^0(t) \hat{e}(t) \quad (56)$$

となり、ここで

$$K_{xs}^0(t) = R_z^{-1} B^T(t) M_s(t) \quad (57)$$

$$K_{xc}^0(t) = R_z^{-1} B^T(t) M_{sc}(t) \quad (58)$$

$$K_e^0(t) = R_z^{-1} B^T(t) M_{ae}^1(t) \quad (59)$$

である。

(52)式を各種クラスの船により設定される重み行列 Q_z , R_z および $F_z(\theta(t), t)$, $B_z(\theta(t), t)$ に対し K_{xs}^0 , K_{xc}^0 , K_e^0 等を図2のようにゲインテーブルに書きこんでおき同定された船体パラメータ $\hat{\theta}(\hat{\alpha}, \hat{\beta})$ つまり $\hat{T}_v$, $\hat{K}_v$ の値に適したゲインが選択決定される。

5. シミュレーションテストおよび実船テスト

5.1 シミュレーションテスト

シミュレーションの目的は事前に実装アルゴリズム

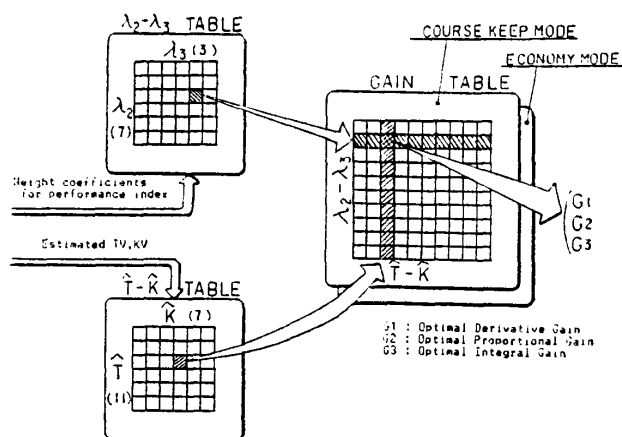


図2 最適制御ゲインテーブル

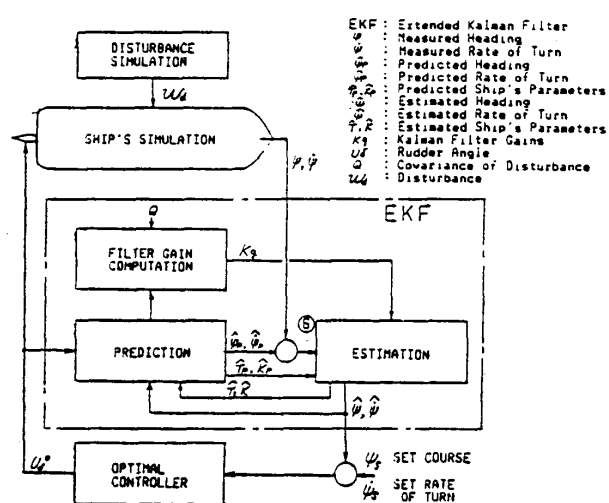


図3 アダプティブオートパイロットシミュレーション機能ブロック図

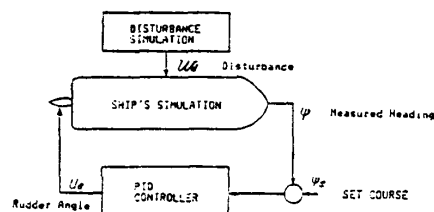


図4 従来型オートパイロットシミュレーション機能ブロック図

の実用性を確認することにあり次の3項目に関する機能評価テストを行なった。

- 1) 船体のパラメータ T_v と K_v に関する可同定性の評価
- 2) 船首方位 (ψ) と回頭角速度 ($\dot{\psi}$) を観測した時の外乱に対する ψ と $\dot{\psi}$ の推定可能性の評価
- 3) 最適制御による変針特性と保針特性を PID 制御の従来のオートパイロットとの比較による評価

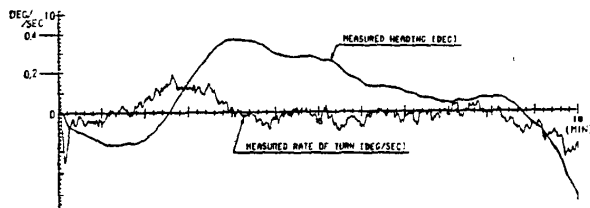


図5 ピアソンモスコビッチ型波浪外乱による船体応答 (開ループ)

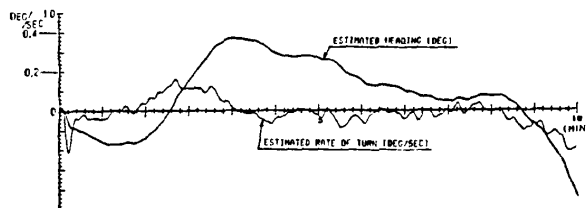


図6 ピアソンモスコビッチ型波浪外乱による船体応答のカルマンフィルタリング (開ループ)

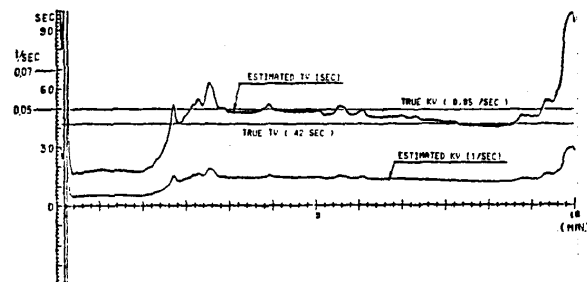


図7 ピアソンモスコビッチ型波浪外乱入力時の船体パラメータ(T_V , K_V)の同定 (舵角が微小時: 開ループ)

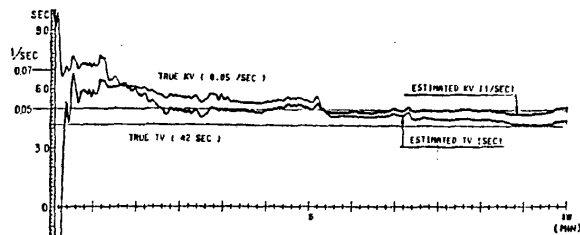


図8 ピアソンモスコビッチ型波浪外乱入力時の船体パラメータ(T_V , K_V)の同定 (正負ジグザグ操舵時: 開ループ)

5.1.1 シミュレーションの方法

シミュレーションは大きくわけて波浪外乱発生部、船体の運動計算部、カルマンフィルタ部、そして最適操舵量計算部と従来のオートパイロットを模擬する部分等より構成される。図3に波浪外乱発生部から最適操舵量計算部までの本アダプティブオートパイロットのシミュレーション機能ブロック図を、図4に従来のオートパイロットシミュレーション機能ブロック図を

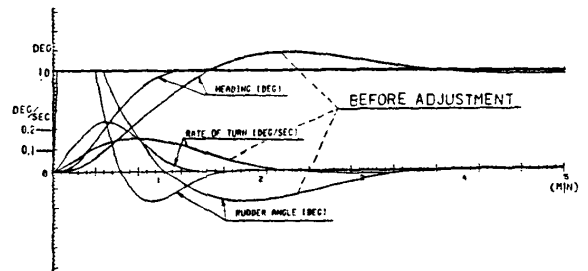


図9 PID 制御によるオートパイロットの変針特性

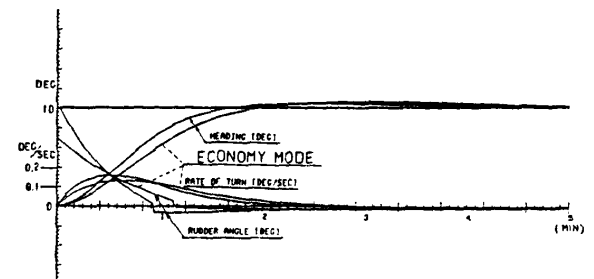


図10 最適制御によるオートパイロットの変針特性

示す。

図3は船の実際の方位角(ψ)、ターンレート($\dot{\psi}$)等を観測し、EKF部で ψ と $\dot{\psi}$ そして船体パラメータ T_V , K_V 等を推定し、推定された $\hat{\psi}$, $\hat{\dot{\psi}}$ より最適操舵量 U_δ^0 が計算されることを示している。

図4は外乱 W_d 入力に対し船がPID制御により設定方位 ψ_c に追従するようなシミュレーション機能ブロック図である。

このPID制御による操舵量 U_δ は次式による。

$$U_\delta = K_R \left[\frac{1}{(1+T_f S)^2} \left\{ (1 + (1+K_d T_d S) / (1+T_d S)) + 1/T_i S \right\} (\psi_c - \psi) \right] \quad (60)$$

ここで K_R は舵の比列ゲイン、 T_f はローパスフィルタの時定数、 K_d は微分ゲイン、 T_d は微分時定数、 T_i は積分時定数である。

また波浪外乱発生モデルはピアソンモスコビッチ型のスペクトルに従って発生させた¹²⁾。

尚、シミュレーションの為の船体データは約5万トン、 $T_V=42$ sec, $K_V=0.05/\text{sec}$ の船を用いた。

5.1.2 シミュレーション結果

シミュレーション結果を図5から図10に示す。

図5はピアソンモスコビッチ型波浪外乱 (以下波浪外乱) による開ループ (舵が0) での測定方位と測定ターンレートを示している。

図6は図5の条件の時の方位角とターンレートの推定結果であり、ターンレートに関しては高周波雑音がフィルタされていることがわかる。

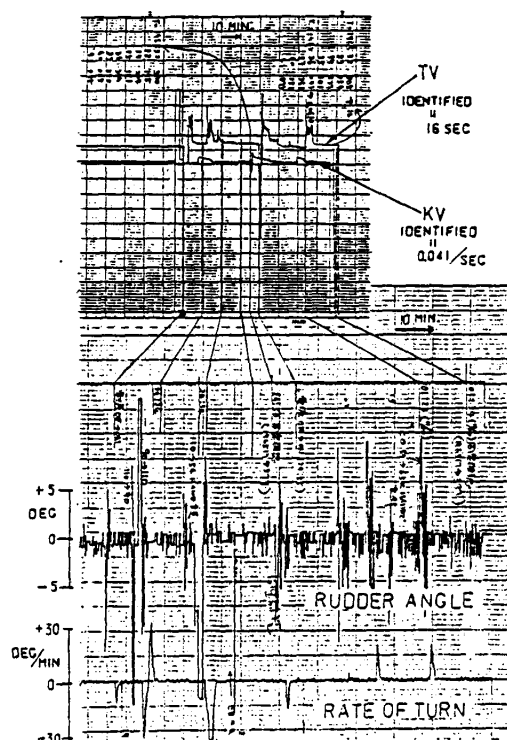


図 11 実船テストにおいて舵をとった時の船体パラメータ (T_V , K_V) の同定 (手動操舵時)

図 7 はこの時の船体パラメータ T_V , K_V の同定結果であるが舵角が微小なため T_V , K_V の観測性は悪く同定精度は良くない。

図 8 は舵を正負逆にきった時 (Z 試験時) のパラメータ同定結果で、この時 T_V , K_V の観測性は良く同定効果も良好である。

図 9 と図 10 は従来のオートパイロットと最適制御によるオートパイロットの変針特性をシミュレーションしたもので図 9 の従来型は 10 度変針の際オーバーシュートが起り、さらに舵が正から負側にきるような操船上好ましくない当舵現象が発生している。

図 10 は最適制御方式のもので当舵とオーバーシュートが発生していない。

以上のシミュレーション結果によりシミュレーションテスト項目 1) から 3) を評価しほぼ理論的考察通りの結果を得て充分実用に供しえることを確認し次の実船テストにより機能の最終評価に移る。

5.2 実船テスト

実船テストは 1 次航と 2 次航の 2 回にわけて行なわれ 1 次航は 1983 年 10 月 12 日から 12 月 2 日まで日本からインドそしてクエート間、2 次航は 1983 年 12 月 18 日から翌年の 2 月 2 日までで航路は 1 次航に同じ。

船は排水量 32,000 トンの重量物運搬船により行なわ

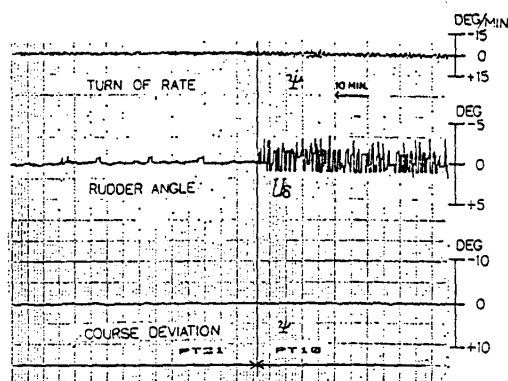


図 12 CALM SEA (さざ波程度) における従来型オートパイロット PT 10 と本アダプティブオートパイロット PT 21 との保針特性の比較 (振れ巾が小さく振れの頻度の少ないほど良い)

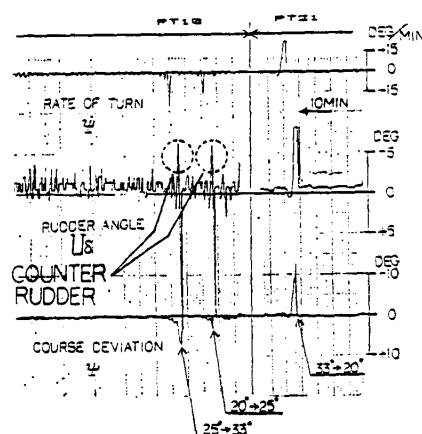


図 13 従来型オートパイロット PT 10 と本アダプティブオートパイロット PT 21 との変針特性の比較 (振れ巾が小さく、振れる頻度も少なく、また舵角に関し当舵 (図中○印) の小さいものが良い)

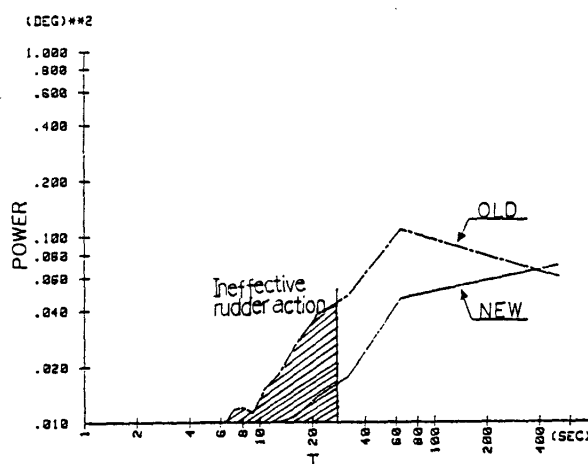


図 14 実船テストデータによる舵角量のスペクトル解析

れた。評価テストの方法は従来型 PID 制御によるオートパイロット PT 10 と本アダプティブオートパイロット PT 21 を装備し両パイロットを1時間毎に切り換え20分後の整定状態でデータ計測収集し評価した。この実船テスト結果を図11から図14に示す。

図11は船を手動操舵で操舵した時の T_v , K_v の同定結果で同定された値は $T_v=16$ sec, $K_v=0.041/\text{sec}$ であり真値 $T_v=16.5$ sec, $K_v=0.06/\text{sec}$ にほぼ合っている。

図12は CALM SEA (さざ波) での保針特性を示しており従来型 PT 10 に比べてターンレート, 操舵量, 方位偏差等が非常に小さくなっていることがわかる。

図13は変針特性を示しており従来型 PT 10 に比べ操舵量は正側から負側への当舵をとっておらず変針についても船速ロスの少ない省エネタイプであることを示している。

図14は計測収集したデータより求めた操舵量のスペクトル解析で従来型 PT 10 より操舵量は少なく, また操舵の無効周期約30秒以下についてはほとんど無駄舵を取っていないことが判る。

省エネ効果については従来型オートパイロット PT 10 に比べて約3.5%の省エネ効果が得られた。

6. あとがき

今後、波浪外乱の物理的現象をより正確に調査把握し波浪外乱に対する適応制御機能の向上を図ることが急務かと考えている。

そして実物理系をいかに正確にモデル化しシミュレートできるか、また現代制御理論の実際面への応用技術の研究と定式化が従来考えられなかった新機能を具備した素晴らしいアダプティブオートパイロットを完成させるものと確信する。

本アダプティブオートパイロットの開発にあたり終始有益な助言を賜った東京大学船舶工学科小山健夫教授に深く感謝する次第です。

参考文献

- 1) 野本謙作, 田口賢士, 本田啓之助, 平野進: 船の操縦性について, 造船協会論文集, 第99号 (1956)
- 2) Andrew P. Sage and James L. Melsa: Estimation Theory with Applications to Communications and Control, McGraw-Hill (1971)
- 3) LENNART LJUNG: A Symptotic Behavior of the Extended Kalman Filter as a Parameter Estimator for Linear Systems, IEEE, Trans. AC-24, 1, 36/50 (1979)
- 4) 小山健夫, 葛西宏直, 山上順雄: 造船設計への操縦運動モデルの応用1, 第3回操縦性シンポジウム, 日本造船学会, 81/100 (1981)
- 5) 大津皓平, 長谷川和彦: オートパイロットの評価と展望, 第3回操縦性シンポジウム, 日本造船学会, 243/279 (1981)
- 6) 大津皓平: Self-Tuning Autopilot について, 日本航海学会誌, 第61号, 36/41 (1979)
- 7) Job Von Amerongen: Adaptive Steering of ships-A model Reference Approach to Improved Manoeuvring and Economical Course Keeping, Control Laboratory Electrical Engineering Department Delft University Technology (1982)
- 8) I. D. Landau: Model Reference Adaptive Controllers and Stochastic Self-Tuning Regulators-Unified Approach, Transactions of the ASME, 103, 404/416 (1981)
- 9) Peter S. Maybeck: Stochastic Models, Estimation and Control, 3, Academic Press (1982)
- 10) 北森俊行: 適応制御理論の再検討, 第9回適応制御部会資料 (1983)
- 11) 木村英紀, 杉山治: 完全制御と完全可観測を用いたロバスト制御系の設計法, 計測自動制御学会論文集, 18, 10, 955/960 (1982)
- 12) 日野幹雄: スペクトル解析, 朝倉書店 (1977)