

可変適応ゲイン方式 MRACS オートパイロットの研究

正員 山田 秀光* 正員 長谷川 和彦**

Autopilot using Model Reference Adaptive Control System with Variable Adaptive Gain

by Hidemitsu Yamada, *Member* Kazuhiko Hasegawa, *Member*

Summary

Recently Ship's autopilot has two different requirements contrary each other depending her sailing sea area; one is fuel-saving performance and the other is course-keeping performance. In order to meet these requirements many ships equip with adaptive autopilot using modern control theory. Here the problems are lying on the applicability for unstable ships and for the change of ship's velocity, because modern control theory is based on linear control theory.

In this paper, we have applied Model Reference Adaptive Control Theory to ship's autopilot, and investigated the influences of nonlinearity of ship maneuverability, the change of ship's velocity and external disturbances. We have introduced the nondimensional adaptive algorithm to cope with the influence of the change of ship's velocity using numerical simulation. Furthermore it is possible to design the stable adaptive algorithm not only for course-changing but also course-keeping mode by applying model reference adaptive control with variable adaptive gain.

1. はじめに

1920年代 Minorsky¹⁾によって開発された船舶用オートパイロットは1970年代のオイルショックを契機に古典制御理論〔PID+非線形要素〕から現代制御理論へと大きく変貌を遂げた。これは野本²⁾, 小山³⁾, 長谷川⁴⁾の研究によりオートパイロットの調整如何では抵抗増加量が大きく変化することが示され, 最適制御理論や適応制御理論を適用した省エネ型オートパイロットの研究が盛んに行われたことによる。当時は大洋航行中の保針制御が研究の対象であり, 多少ヨーイングが発生してもできるだけ操舵量の少ない制御が良いとされてきた。その後, 混乗による乗組員の技量低下や少人数化により, 従来は手動で操舵していた海域でもオートパイロットを使用したいという要求が強くなってきている。この様な海域では省エネ性よりも保針性が重要視される。また, 大洋航行中に比べ船速の変化が大き

く, 当然のことながら船速変動があってもヨーイングの発生をできるだけ抑えることが望まれる。

最近のオートパイロットには状況に応じ省エネ性と保針性という相異なる要求があり, これを満足させるため現代制御理論を適用した適応制御型オートパイロット(アダプティブパイロットと称する)が多くの船に装備されている。適応制御型オートパイロットの代表的な研究としては Amerongen 等^{5),6)}によるモデル規範型適応制御, Källstrom 等⁷⁾による STR (Self Tuning Regulator) や大津等^{8),9)}による外乱適応型制御システムが挙げられる。しかしながら非線形操縦特性(例えば針路不安定船)を有する船舶に対して線形制御理論をベースにした現代制御理論を適用した場合の問題点や船速が大きく変化した場合の影響は佐伯等¹⁰⁾の研究以外あまり論じられていない。本研究では STR や外乱適応型制御に比べ野本の応答モデルとの関係が分かりやすいモデル規範型適応制御を取りあげ, 非線形特性や船速変動の影響を受ける自動変針制御を例に, モデル規範型適応制御理論をオートパイロットに適用した場合の問題点を示すと同時に, 適応則の無次元化と可変適応ゲイン方式の導入により, 非線形な操縦特性を有する船舶に対しても安定に動作するモデル規範型適応則を示す。

* (株)トキメック

** 大阪大学大学院工学研究科

2. 無次元化されたモデル規範型適応則

無次元化されたモデル規範型適応則を求めするため、船体を含めた自動制御系を Fig. 1 とする。船体モデルを含む自動制御系は次式で表される。

$$\begin{aligned} \dot{\psi}_p + \frac{1+K_S T_D}{T_S} \psi_p + \frac{K_S K_P}{T_S} \psi_p \\ = \frac{K_S K_P}{T_S} \psi_r + \frac{K_S}{T_S} (K_I + K_W) \end{aligned} \quad (1)$$

(1)式を船長 L と船速 V で無次元化すると

$$\begin{aligned} \dot{x}'_p + \frac{1+K'_S T'_D}{T'_S} x'_p + \frac{K'_S K'_P}{T'_S} x'_p \\ = \frac{K'_S K'_P}{T'_S} x'_r + \frac{K'_S}{T'_S} (K'_I + K'_W) \end{aligned} \quad (2)$$

ここで、 $\dot{x}'_p = \dot{\psi}_p (V/L)^2$, $x'_p = \psi_p (V/L)$,

$$x'_p = \psi_p, \quad x'_r = \psi_r$$

$$K'_S = K_S (L/V), \quad T'_S = T_S (V/L),$$

$$T'_D = T_D (V/L)$$

が得られる。同様に無次元化した規範モデルを(3)式とおく。

$$\dot{x}'_m + \frac{1+K'_M T'_Dm}{T'_M} x'_m + \frac{K'_M K'_{Pm}}{T'_M} x'_m = \frac{K'_M K'_{Pm}}{T'_M} x'_r \quad (3)$$

ここで $\dot{x}'_m = \dot{\psi}_m (V/L)^2$, $x'_m = \psi_m (V/L)$, $x'_m = \psi_m$

$$K'_M = K_M (L/V), \quad T'_M = T_M (V/L),$$

$$T'_Dm = T_{Dm} (V/L)$$

ここで規範モデルは減衰係数 ζ , 固有周波数 ω_n の系とすると

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K'_M K'_{Pm}}{T'_M}}, \quad 2\zeta\omega_n = \frac{1+K'_M T'_Dm}{T'_M}$$

の関係があり、これより次式が得られる。

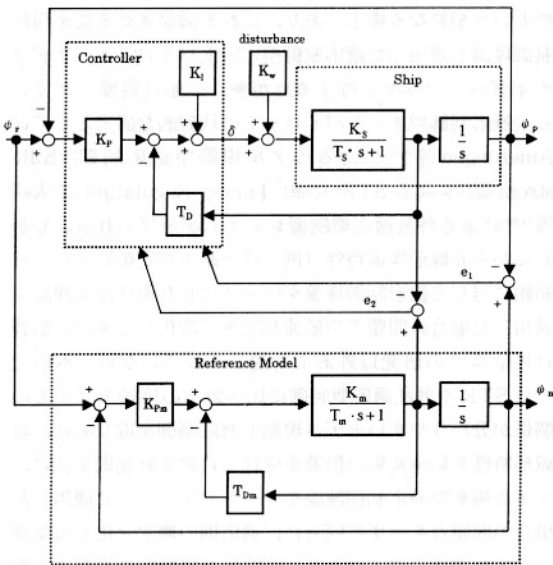


Fig. 1 Control Block Diagram

$$T_{Dm} = \frac{1}{K'_M} \{2\zeta\sqrt{K'_M T'_M K'_{Pm}} - 1\}$$

これを(3)式に代入すると

$$\dot{x}'_m + 2\zeta\sqrt{\frac{K'_M K'_{Pm}}{T'_M}} x'_m + \frac{K'_M K'_{Pm}}{T'_M} x'_m = \frac{K'_M K'_{Pm}}{T'_M} x'_r \quad (4)$$

ここで $K'_M = \frac{1}{2\zeta}\sqrt{\frac{K'_M K'_{Pm}}{T'_M}}$, $T'_M = \frac{1}{2\zeta}\sqrt{\frac{T'_M}{K'_M K'_{Pm}}}$ とおくと

規範モデルの無次元化式は(5)式となり、これはゲイン K'_M , 時定数 T'_M の1次遅れモデルにフィードバックをかけた式となっている。

$$\dot{x}'_m + \frac{1}{T'_M} x'_m + \frac{K'_M}{T'_M} x'_m = \frac{K'_M}{T'_M} x'_r \quad (5)$$

無次元化適応アルゴリズムを求め(2)式と(5)式を状態変数空間で表現する。船体を含む自動操舵系を

$$\dot{X}_p = A_p X_p + B_p U \quad (6)$$

$$\text{ここで } X_p = \begin{bmatrix} x'_p \\ \dot{x}'_p \end{bmatrix}, \quad U = \begin{bmatrix} x'_r \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K'_S K'_P}{T'_S} & -\frac{1+K'_S T'_D}{T'_S} \end{bmatrix},$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K'_S K'_P}{T'_S} & \frac{K'_S (K'_I + K'_W)}{T'_S} \end{bmatrix}$$

規範モデルを

$$\dot{X}_m = A_m X_m + B_m U \quad (7)$$

$$\text{ここで } X_m = \begin{bmatrix} x'_m \\ \dot{x}'_m \end{bmatrix}$$

$$A_m = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\frac{K'_M}{T'_M} & -\frac{1}{T'_M} \end{bmatrix}, \quad B_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \frac{K'_M}{T'_M} & 0 \end{bmatrix}$$

船体応答と規範モデルの出力誤差を E とすると

$$E = X_m - X_p \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \dot{E} &= A_m E + A X_p + B U \\ &= A_m E + \Phi Z \end{aligned} \quad (9)$$

ここで

$$A = A_m - A_p, \quad B = B_m - B_p$$

$$\Phi = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{1+K'_S T'_D}{T'_S} - \frac{1}{T'_M} & \frac{K'_M}{T'_M} - \frac{K'_S K'_P}{T'_S} & \frac{K'_S}{T'_S} (K'_I + K'_W) \end{bmatrix},$$

$$Z = \begin{bmatrix} \dot{x}'_p \\ x'_r - x'_p \\ 1 \end{bmatrix}$$

となり、ここで正定関数として

$$W = E^T P E + a\phi_1^2 + b\phi_2^2 + c\phi_3^2$$

を考える。なお、 T は転置を示す。また、P は正定対称行列で、a, b, c は正数とする。W を船長船速比 (L/V) で無次元した時間 t' で微分する。

$$\dot{W} = \dot{E}^T P E + E^T \dot{P} E + 2a\phi_1 \dot{\phi}_1 + 2b\phi_2 \dot{\phi}_2 + 2c\phi_3 \dot{\phi}_3$$

(9)式を代入し, $A_m^*P + PA_m = -Q$ とおくと

$$\begin{aligned} \dot{W} = & -E^TQE + 2[\phi_1\{(\rho_{12}e_1 + \rho_{22}e_2)\dot{x}'_b + a\phi_1\} \\ & + \phi_2\{(\rho_{12}e_1 + \rho_{22}e_2)\varepsilon + b\phi_2\} \\ & + \phi_3\{(\rho_{12}e_1 + \rho_{22}e_2) + c\phi_3\}] \end{aligned} \quad (10)$$

ここで $\varepsilon = x'_r - x'_b$

となり, W がリアプノフ関数となるためには

$$(\rho_{12}e_1 + \rho_{22}e_2)\dot{x}'_b + a\phi_1 = 0 \quad (11)$$

$$(\rho_{12}e_1 + \rho_{22}e_2)\varepsilon + b\phi_2 = 0 \quad (12)$$

$$(\rho_{12}e_1 + \rho_{22}e_2) + c\phi_3 = 0 \quad (13)$$

が成立すればよい。これより無次元化された適応則(14)~(16)式が得られる。

$$\frac{d}{dt'}(K_p) = \beta'(\rho_{12}e_1 + \rho_{22}e_2)\varepsilon \quad (14)$$

$$\frac{d}{dt'}(T_b) = -\alpha'(\rho_{12}e_1 + \rho_{22}e_2)\dot{x}'_b \quad (15)$$

$$\frac{d}{dt'}(K_I) = \gamma'(\rho_{12}e_1 + \rho_{22}e_2) \quad (16)$$

ここで $\alpha' = \frac{1}{a} \cdot \frac{T'_s}{K'_s}$, $\beta' = \frac{1}{b} \cdot \frac{T'_s}{K'_s}$, $\gamma' = \frac{1}{c} \cdot \frac{T'_s}{K'_s}$

次に Amerongen 等により求められた有次元適応則との関係を示す。まず, 無次元適応則のパラメータには全てをつけて有次元パラメータと区別する。

$$K_M = \frac{1}{2\xi} \sqrt{\frac{K_m K_{p_m}}{T_m}} = \frac{1}{2\xi} \sqrt{\frac{K'_m K'_{p_m}}{T'_m}} (V/L) = K'_M (V/L)$$

$$T_M = \frac{1}{2\xi} \sqrt{\frac{T_m}{K_m K_{p_m}}} = \frac{1}{2\xi} \sqrt{\frac{T'_m}{K'_m K'_{p_m}}} (L/V) = T'_M (L/V)$$

ここで $Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & q \end{bmatrix}$ とおくと

$$\rho_{12} = \frac{T_M}{2K_M} = \frac{T'_M}{2K'_M} (L/V)^2 = \rho'_{12} (L/V)^2$$

$$\begin{aligned} \rho_{22} &= \frac{T_M}{2} \left(\frac{T_M}{K_M} + q \right) = \frac{T'_M}{2} \left(\frac{T'_M}{K'_M} + q' (V/L)^2 \right) (L/V)^3 \\ &= \rho'_{22} (L/V)^3 \end{aligned}$$

以上の関係を Amerongen 等により得られた適応則に代入する。

$$\frac{d}{dt'}(K_p) = \beta(\rho_{12}e_1 + \rho_{22}e_2)\varepsilon$$

$$\frac{d}{dt'}(K_p)(L/V) = \beta(\rho'_{12}e'_1 + \rho'_{22}e'_2)(L/V)^2\varepsilon$$

$$\frac{d}{dt'}(K_p) = \beta(L/V)(\rho'_{12}e'_1 + \rho'_{22}e'_2)\varepsilon$$

よって

$$\beta' = \beta(L/V) \quad (17-1)$$

以下同様に

$$\alpha' = \alpha(V/L) \quad (17-2)$$

$$\gamma' = \gamma(L/V) \quad (17-3)$$

無次元化された適応ゲインと有次元の適応ゲインの関係が得られる。

3. 有次元適応則と無次元適応則の比較

船速変動が適応則に与える影響をシミュレーションによ

り確認する。シミュレーションに用いた操縦運動数学モデルは MMG モデルを, また, 船体データとしてはシリーズ 60 船型 (船長 200 m, $C_b=0.7$ を想定) を用いた。参考として船速 20 k't 及び 10 k't で $10^\circ Z$ 試験をシミュレートし, その線形 1 次解析結果を Table 1 に示す。

船速を 20 k't から 10 k't, また 10 k't から 20 k't へ変化させたシミュレーション結果を Fig. 2, 3 に示す。なお, 規範モデルは

$$K_m = 0.05, \quad T_m = 30.0 \quad (\text{船速 } 20 \text{ k't})$$

を用いている。船速を 20 k't から 10 k't に減速させた Fig. 2 では 4 回目の変針でもモデル誤差が発生しており, 十分な適応動作が行われていないことが分かる。また, 10 k't から 20 k't に増速させた Fig. 3 では制御ゲイン K_p ,

Table 1 Simulation result of $10^\circ Z$ test

Ship velocity	20k't	10k't
$K_m (K'_m)$	0.045 (0.879)	0.22 (0.889)
$T_m (T'_m)$	28.3 (1.45)	60.8 (1.54)
δ_r	1.74	1.84

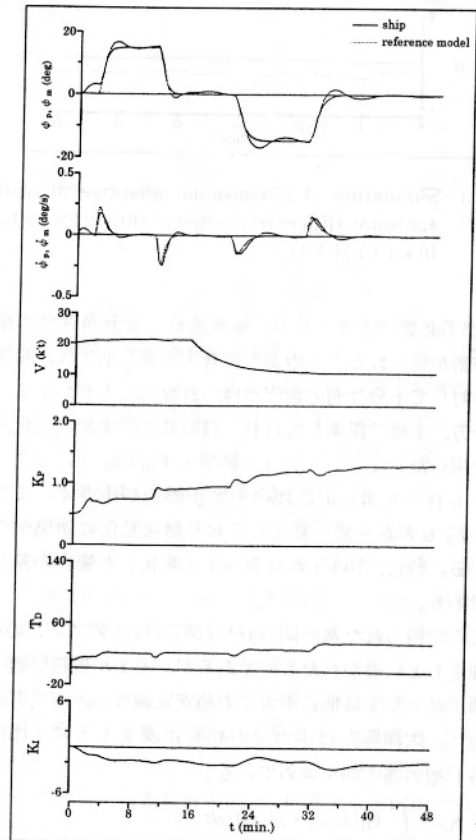


Fig. 2 Simulation of dimensional adaptive algorithm autopilot (Effect of change of ship velocity from 20 k't to 10 k't)

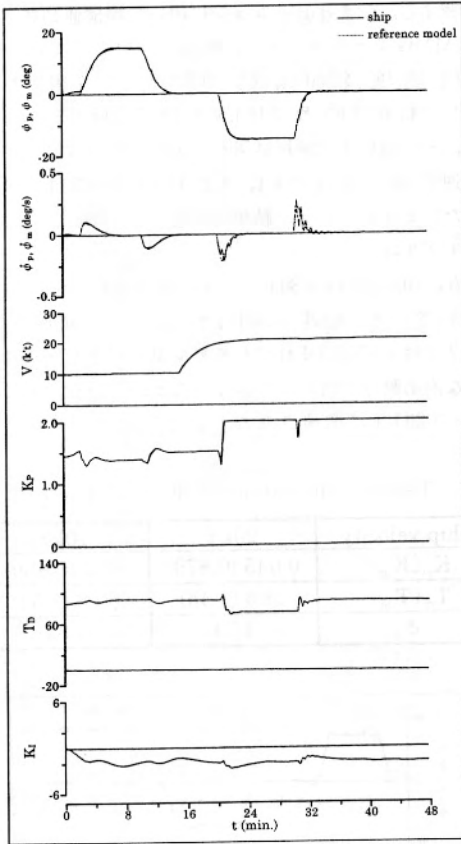


Fig. 3 Simulation of dimensional adaptive algorithm autopilot (Effect of change of ship velocity from 10 k't to 20 k't)

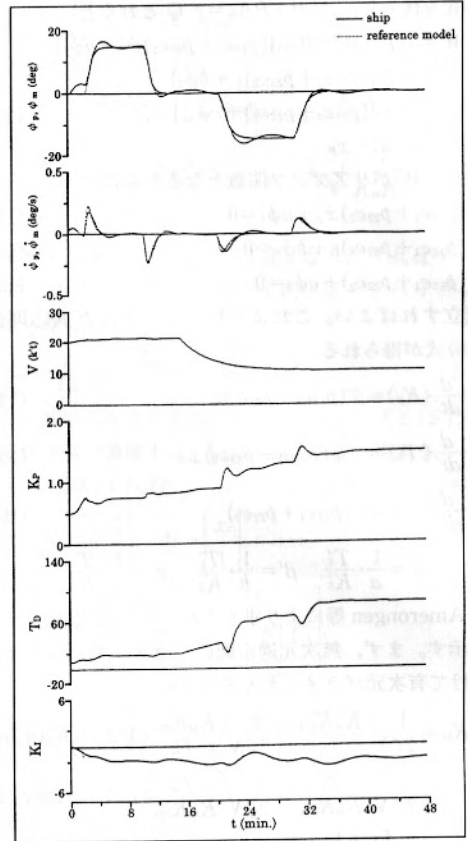


Fig. 4 Simulation of nondimensional adaptive algorithm autopilot (Effect of change of ship velocity from 20 k't to 10 k't)

T_D が不必要に大きくなり、転舵直後に旋回角速度の振動的挙動が見られる。このように有次元適応則では、船速変動に対して十分な適応動作が得られないことがわかる。

一方、本稿で提案した(14)~(16)式に示す無次元化適応則を用いたシミュレーション結果を Fig. 4, 5 に示す。両者とも有次元適応則に比べモデル誤差が小さく、また、 K_P , T_D もスムーズに変化しており無次元化の効果がうかがえる。特に、10 k't から 20 k't に変化した場合の差が顕著である。

ここで得られた適応則(14)~(16)式はリアプノフの第2定理をもとに導かれたものであるが、モデル規範型適応則の導出法としては他にポポフの超安定論をもとづく方法がある¹¹⁾。大津等¹²⁾はポポフの超安定論をもとに「比例+積分」型の適応則を求めている。

$$K_P = \int_0^t k_{21}(p_{12}e_1 + p_{22}e_2) \varepsilon d\tau + k_{22}(p_{12}e_1 + p_{22}e_2) \dot{x}'_p + K_P(0)$$

$$T_D = - \int_0^t k_{11}(p_{12}e_1 + p_{22}e_2) \dot{x}'_p d\tau$$

$$-k_{12}(p_{12}e_1 + p_{22}e_2) \dot{x}'_p + T_D(0)$$

$$K_I = \int_0^t k_{31}(p_{12}e_1 + p_{22}e_2) d\tau + k_{32}(p_{12}e_1 + p_{22}e_2) + K_I(0)$$

ここで k_{11} , k_{12} , k_{21} , k_{22} , k_{31} , k_{32} はポポフの積分不等式を満たす様に選ばれる。

これはリアプノフ関数をもとに得られた適応則(積分型)の拡張となっている。「比例+積分」型の効果をシミュレーションで確認した。結果を Fig. 6 に示す。比例項の影響により Fig. 4 に比べ変針中のパラメータ変動が大きくなっているが、方位、旋回角速度の追従にはそれ程の改善は見られない。従って、自動変針時に用いる適応則としては比例項の効果は少なく、積分型の適応則で十分であると言える。

4. 針路不安定船への適用

3. で得られた適応則を針路不安定船に適用し、非線形操縦特性が与える影響を検討する。シミュレーションにはシリーズ 60 船型の供試船の質量を変えて針路不安定にした

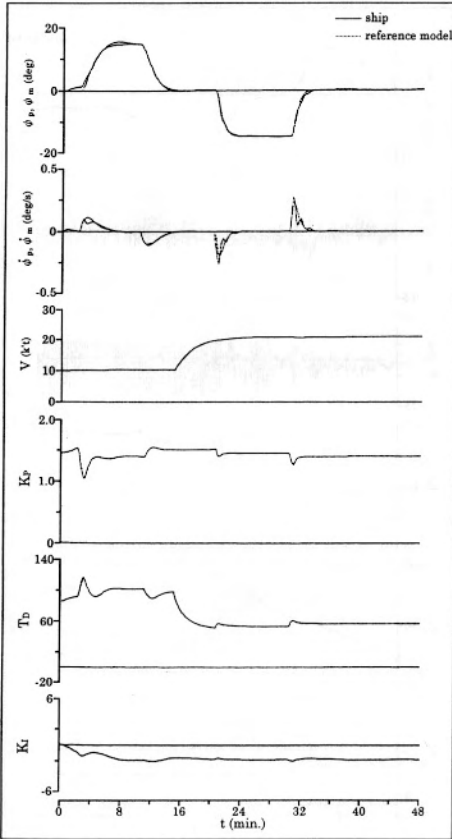


Fig. 5 Simulation of nondimensional adaptive algorithm autopilot (Effect of change of ship velocity from 10 k't to 20 k't)

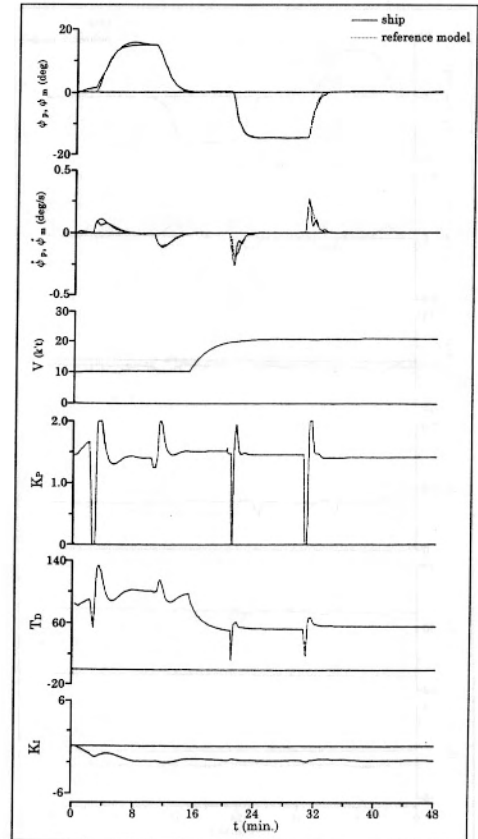


Fig. 6 Simulation of nondimensional adaptive algorithm autopilot based on Popov's theory (Course changing)

架空のモデルを用いており、その不安定ループ幅は約 4° である。

シミュレーション結果を Fig. 7 に示す。なお、規範モデルは

$$K_m = 0.1, \quad T_m = 135.0 \quad (\text{船速 } 20 \text{ k't})$$

を用いている。これは本供試船モデルの $10^\circ Z$ 試験シミュレーションを行い、結果を線形1次解析したものである。本供試船モデルは非線形性が強いので、線形1次の規範モデル出力に完全に一致させることができないことが分かる。しかし方位データは十分追従しており、実用上は問題ないと言える。変針中、制御ゲイン K_p 、 T_D は定常値に落ちついていないが、これは船体モデルの非線形性を補うものであり、逆の見方をすれば、本適応則が針路不安定船に対しても適用可能なことがうかがえる。

5. 外乱の影響及び可変適応ゲイン方式の適用

実際に、この適応則を使用して自動操舵系の調節を行うためには、3, 4回の変針が必要である。しかしながら、実航海では連続した変針が行われるのはまれで、調整が不完

全なまま自動保針に入ることも考えられる。そのような場合にも自動操舵系の調整が自動的に行われることが望ましい。そこでここでは3.で得られた適応則を自動保針に適用し、その問題点を検討する。なお、シミュレーションには4.で用いた針路不安定船モデルを用いている。

5.1 高周波外乱が与える影響

自動保針時に適応動作を行なう時に最も問題となるのが外乱の取り扱いである。ここでは特に高周波外乱が適応則にどのような影響を与えるのかを検討する。なお、外乱は自動保針中の実船データを観測ノイズとして旋回角速度レベルで加えている。この外乱データを用いたシミュレーション結果を Fig. 8 に示す。外乱を加えると制御ゲイン K_p 、 T_D とも急激に増大し、舵がハンチング現象を起こす。特に微分ゲイン T_D は長谷川¹³⁾が示したように時間とともに増大している。自動保針中の T_D に関する適応則(15)式を展開すると

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}(T_D) &= -\alpha'(p_{12}e_1 + p_{22}e_2)\dot{x}'_p \\ &= -\alpha'\{p_{12}(x'_m - x'_p) + p_{22}(\dot{x}'_m - \dot{x}'_p)\}\dot{x}'_p \end{aligned}$$

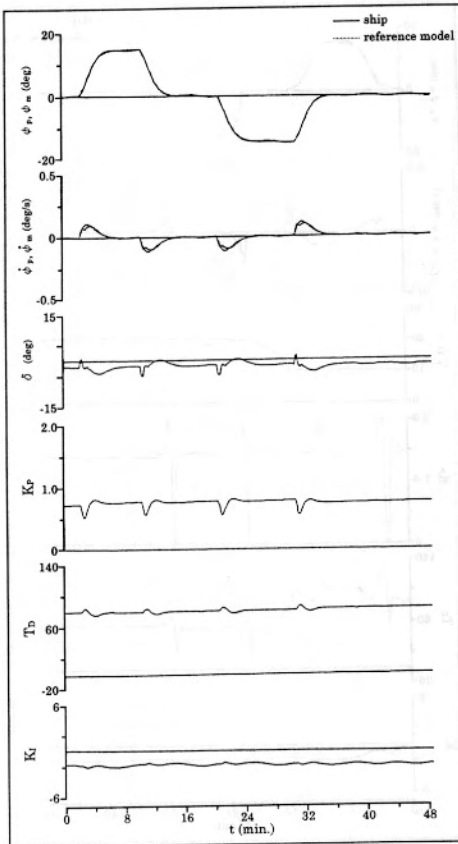


Fig. 7 Simulation of nondimensional adaptive algorithm autopilot (Course changing, unstable ship)

$$= -\alpha' p_{12}(x_m - x_p) \dot{x}_p + \alpha' p_{22} \dot{x}_p^2$$

となり、操舵によって誘起される旋回角速度よりも遙かに大きな外乱が加わると第2項が支配的となり T_D が増大する結果となる。これを避けるためにはフィルタ処理により外乱成分をできるだけ除去する必要がある。そこで観測値の代わりにカルマンフィルタの出力値を用いた結果を Fig. 9 に示す。カルマンフィルタの出力を用いることにより高周波成分が除去され改善されていることが分かる。しかしながら微分ゲイン T_D は時間と共に増大しており満足な結果が得られたとは言い難い。

5.2 可変適応ゲイン式モデル規範型適応則

自動操舵中に常時適応動作を行うと微分ゲインの増大を招く結果となるため、ある一定の条件下でのみ適応動作を行うことを検討する。オートパイロットにとっては自動操舵中のヨーイングが最も問題となるため、ヨーイング幅を設定条件に下記適応則を導入する。

$$\frac{d}{dt}(K_r) = f \cdot \beta' (p_{12}e_1 + p_{22}e_2) \varepsilon$$

$$\frac{d}{dt}(T_D) = -f \cdot \alpha' (p_{12}e_1 + p_{22}e_2) \dot{x}_p$$

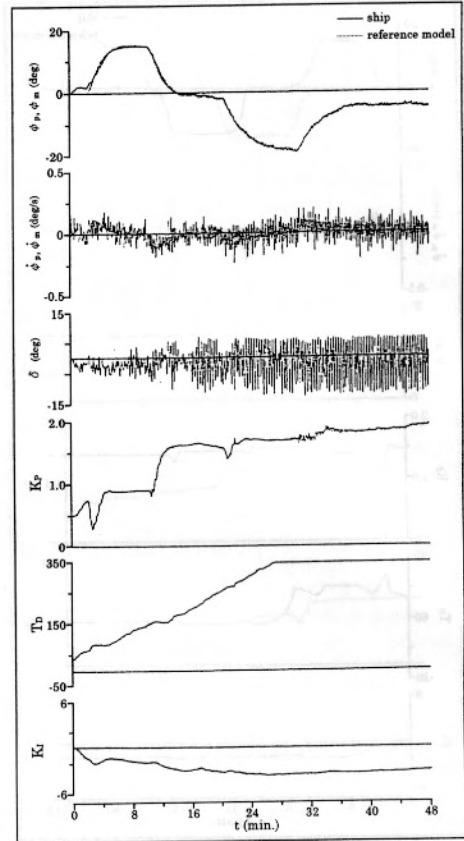


Fig. 8 Simulation of nondimensional adaptive algorithm autopilot (Course changing under disturbance)

$$\frac{d}{dt}(K_i) = \gamma'(p_{12}e_1 + p_{22}e_2)$$

$$f = \exp\left(-\frac{t-t_0}{T_f}\right)$$

ここで $|\phi_e| \geq 2.0$ の時 $t_0 = t$

ここで、時事刻々変化する外乱に対応するため K_i の適応則には可変ゲイン f をかけていない。

本適応則を適用した結果を Fig. 10 に示す。制御ゲイン K_r , T_D はほぼ一定値に収束しており適応則の有効性が示されている。尚、 T_f は船体応答の時定数 T_s と相関をもつ時定数であり、ここでは $2T_s$ としている。また、 f が 0.1 以下になった場合には強制的に $f=0$ としている。ここで求めた適応則は方位偏差がその設定値以下になるように制御ゲイン K_r , T_D を調整する方法であり、外乱の大きさと設定値の関係によっては制御ゲインが上がりすぎてしまう可能性がある。そこである程度以上海象が荒れた場合には適応動作を停止する必要がある、海象の荒れ具合を示す指標として旋回角速度の高周波成分を採用し、実船データによりその判定基準を類推してみる。一例として Fig. 11 に大型コンテナ船 ($L_{pp}=248$ m) により得られた海象と

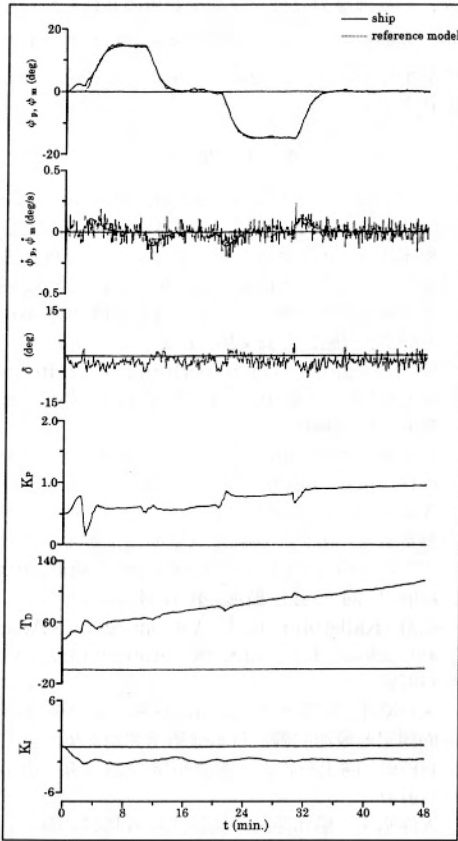


Fig.9 Simulation of nondimensional adaptive algorithm autopilot (Course changing under disturbance with Kalman filter)

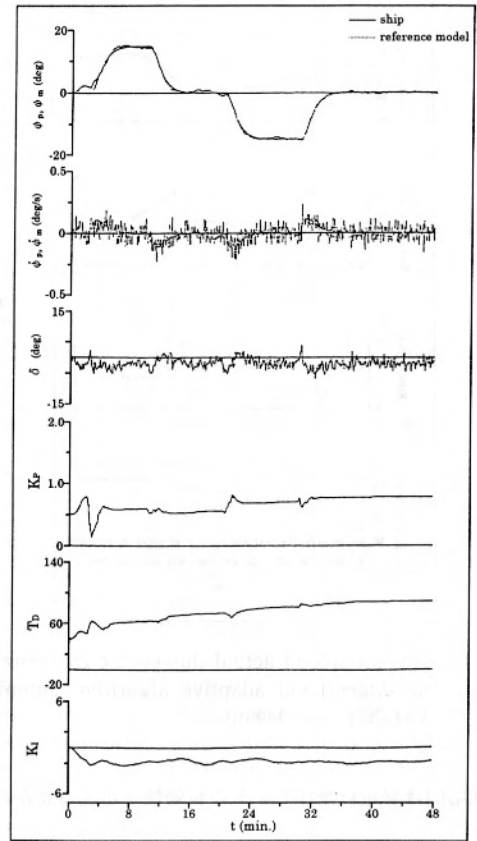


Fig.10 Simulation of nondimensional adaptive algorithm autopilot (Course changing, variable adaptive gain method)

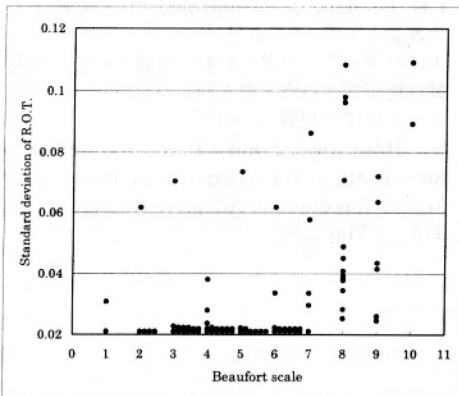


Fig.11 Relation between beaufort scale and rate of turn (R.O.T.)

旋回角速度標準偏差（無次元値）の関係を示す。本データは冬の北太平洋で採取されたものである。ビューフォートスケール6以下のデータの内、90%のデータが入るレベルを求めると

$$\sigma_r = 0.026$$

となる。当然この値は船型によって異なってくるが、大型コンテナ船の場合は旋回角速度の標準偏差（無次元値）が0.026を超えた場合に適応則を停止させることにより安定に作動させることが可能となる。最後にモデル規範型適応則を実船に適用した例を Fig. 12 に示す。

6. 結 論

モデル規範型適応制御を船舶用オートパイロットに適用する場合の問題点について検討した。特に、非線形特性と船速変動が適応動作に与える影響とその対策例を示した。以下、本研究で得られた結論を以下に示す。

- (1) モデル規範型オートパイロットにおいて無次元化適応則を求め、有次元適応則との関係を明確にした。この結果を用いれば有次元アルゴリズムで得られている適応ゲインの適値等のデータをそのまま無次元化し、使用することができる。
- (2) 大きな船速変動に対し、有次元適応則では十分な適応動作を行えない場合がある。このような場合にも無次元

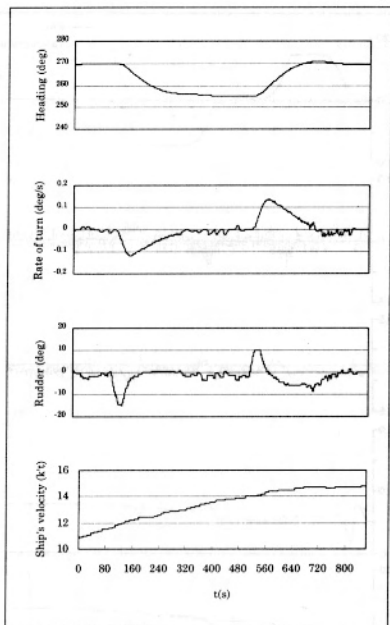


Fig. 12 An example of actual ship course changing by nondimensional adaptive algorithm autopilot (VLCC; $L_{pp}=340$ m)

化適応則は安定に動作し、その有効性を示すことができた。

(3) 線形1次応答モデルを規範モデルとする本適応則を針路不安定船に適用したところ、船体の非線形特性の影響を補うように制御ゲインが変動し、実用上問題ない変針特性が得られた。

(4) 超安定論に基づく適応則は「比例+積分」型となるが、比例要素の効果はあまりなく、リアプノフの第2定理のもとづく積分型の適応則で十分である。

(5) 可変適応ゲイン方式を導入することにより自動保針時に安定な適応動作を行うことが可能となった。ただし、荒天時には適応動作を停止する必要がある、そのアルゴリズムを示した。また、その指標として旋回角速度の高周波成分を採用し、大型コンテナ船の場合の目安を示した。

近年、制御理論の分野では制御対象の非線形特性を直接取り扱う非線形制御理論の研究が盛んに行われており、今後、非線形応答モデルを規範モデルとする非線形適応則の研究が望まれる。

参考文献

- 1) N. Minorsky: Directional stability of automatically steered bodies, J. of ASNE, Vol. 34 (1922)
- 2) 野本謙作, 元山登雄: 船首揺れにもとづく推進馬力の損失について, 造船協会論文集, 第120号 (1966)
- 3) 小山健夫: 外洋航行中の船の最適自動操舵系に関する研究, 造船協会論文集, 第122号 (1967)
- 4) K. Hasegawa: On a performance criterion of autopilot navigation, J. of Kansai SNA, Japan, No. 178 (1980)
- 5) J. Van Amerongen and A. J. Udink Cate: Model reference adaptive autopilot for ships, Automatica, Vol. 11 (1975)
- 6) 堀籠教夫: モデル規範型適応系によるオートパイロットについて(I), 日本航海学会誌, 航海, 第63号 (1980), 同上(II), 航海, 第64号 (1980)
- 7) C. G. Källstrom, K. J. Åstrom, et al.: Adaptive autopilots for tankers, Automatica, Vol. 15 (1979)
- 8) 大津皓平, 堀籠教夫, 北川源四郎: 保針運動の統計的同定と最適制御, 日本造船学会論文集, 第139号 (1976), 同上(続), 日本造船学会論文集, 第143号 (1978)
- 9) 大津皓平: 船体運動の統計的最適制御に関する研究(1), 日本造船学会論文集, 第152号 (1982), 同上(2), 日本造船学会論文集, 第153号 (1983)
- 10) 佐伯敏朗, 高井忠夫, 国米昭久: 外乱適応型オートパイロットによる保針操舵シミュレーション, 関西造船協会誌, 第197号 (1985)
- 11) I. D. Landau, M. Tomizuka: 適応制御システムの理論と実際, オーム社
- 12) 大津皓平, 押見国孝: 船舶の操縦と横揺れの制御, 運動性能研究委員会・第6回シンポジウム マリンビークルの運動制御 (1989)
- 13) K. Hasegawa: Some Problems on System Identification for Adaptive Autopilots, Mini-Mini Symposium on Adaptive Autopilot, Univ. of Tokyo, May 1985