

# ローリング制御機能を有する次世代船用オートパイロット

The Next Generation Marine Autopilot System Using Roll Reducible Control Function

松田 真司<sup>\*1</sup> 大津 皓平<sup>\*2</sup>  
MATSUDA Masashi OHTSU Kohei

千種 成友<sup>\*1</sup> 小原 裕喜<sup>\*1</sup>  
CHIGUSA Shigetomo OBARA Hiroyoshi

近年大洋を航海している船舶には、オートパイロットシステムが装備されている。オートパイロットの主な目的は、保針制御である。しかし、操舵をすることによって、船首揺れと横揺れが起こることは良く知られている。我々は、オートパイロット本来の保針制御に加え、ローリング制御機能を有する次世代船用オートパイロットを開発した。

本システムは、バッチ外乱適応舵減揺型オートパイロットであり、制御型多次元自己回帰モデルを使用している。モデルの最適次数は最少AIC (minimum Akaike Information Criterion (H.Akaike (1974))法より得られる。その上、各バッチ毎に Ozaki & Tong により提案された局所定常時系列に対するオンライン構造判断方法を適用することによって、外乱の変化に適応できるシステムが得られる。

The autopilot system is installed in most of the ships that navigate the ocean. The main feature of the autopilot system is the course keeping control. Well-known phenomena such as yawing and rolling breakout are generated by rudder taking, and called yaw-roll-rudder coupling motion. As a counter-measure for the motion, we have developed the next-generation marine autopilot system with the control functions of both rolling and course keeping.

This system is Batch Noise Adaptive Roll Reducible Autopilot that adopted a noise adaptive control typed multi-variable auto-regressive model. The optimal order of this model is obtained by minimum AIC : Akaike Information Criterion (H. Akaike, 1974). Moreover, since the on-line judgment procedure for a locally stationary time series proposed by Ozaki & Tong is adopted at each end of the batch period, the system can cope with the variability of driving noise.

## 1. はじめに

近年、ほとんどの船舶にはオートパイロットが装備されている。オートパイロットは、その設計目標を少ない舵角量による高い保針性能においてきた(図1)。しかし、舵を取ると船首揺れが起こるとともに、横揺れが誘起される。横揺れを軽減することにより、積荷の崩れ防止、乗客の乗り心地改善、快適作業環境の提供による乗組員の有効性増大等が考えられる。

横揺れを軽減させる方法の1つが、舵減揺である。船舶は舵を取ると、周りの流体から流体力を受けて舵面に圧力が生じ、その結果、この圧力の着点と船体重心の周りに、横揺れモーメントが生じる。逆にこのモーメントをうまく利用すれば、横揺れを軽減させることができる。

舵減揺は欧米では艦艇、小型の高速艇などを対象にした多変数制御理論による研究開発が行われた。しかし、この方法は船体運動のモデルとして物理モデルを使用するので、予め水槽実験で詳細な船のモデルを求めておく

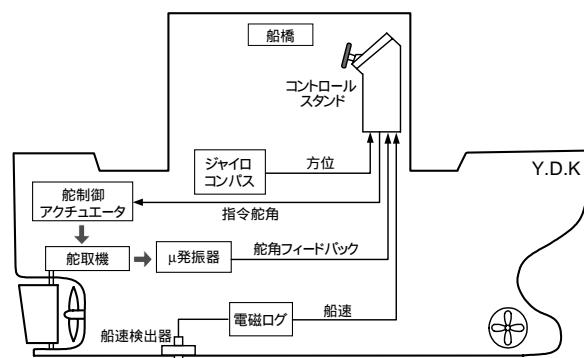


図1 オートパイロットの基本構成

\*1 横河電子機器株式会社 盛岡技術部

\*2 東京商船大学

必要がある。一方、日本では、統計的予測モデルを使用した最適制御を用いた舵減揺システムが、研究開発された<sup>(1)(2)(3)</sup>。これは、船舶のモデルとして制御型多次元自己回帰モデルを使用して表わし、二次評価関数の基に最適制御系を設計する方法である。

これまでの船舶の操縦系を表す制御型自己回帰モデルは、ゲインが固定されたもので、設計時に当てはめたモデルは変更できなかった。しかし、海洋の風、波は短期間では定常であるとみなせるものの、長期的にみるとその確率過程としての構造は変化し、非定常であるとみなす必要がある。このため、外乱変化に適応したモデルをシステム内に構成する機能、すなわち適応機能を持ったシステムが望まれた。

今回開発したオートパイロットは、バッチ (Batch)<sup>4</sup> 毎に外乱を同定し、最適ゲインを更新することにより、外乱変化に適応する機能と横揺れ軽減を融合したオートパイロットである。以下、表記を簡潔にするため、この機能を BNARRA (Batch Noise Adaptive Roll Reducible Autopilot) と呼ぶことにする。

## 2. 制御システムの設計

2.1 船用システムの制御型多次元自己回帰モデルによる表現  
定常  $s$  次元時系列システムを予測する多次元自己回帰モデルは、(1)

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m)X(n-m) + U(n) \quad (1)$$

である。ここで、 $X(n)$  は  $X(n) = [x_1(n) \ x_2(n) \ \cdots \ x_s(n)]^T$  で、 $A(m)$  は  $a_{ij}(m)$  を  $(i, j)$  成分とする  $s \times s$  行列で、自己回帰係数行列  $U(n)$  は  $U(n) = [v_1(n) \ v_2(n) \ \cdots \ v_s(n)]^T$  で、 $v_i(n)$  は第  $i$  変数に対する白色雑音である。ところで、船舶の制御系を設計する場合のモデルとして、状態変数を2つのグループに分ける必要がある。一つは、設計しようとする船舶制御系の制御対象運動を表す被制御変数であり、他のグループは舵等の制御変数である。ところで、このうち制御変数の部分を予測することは無意味である。そこで、 $X(n)$  を  $r$  個 ( $r = s-l$ ) の被制御変数からなる状態ベクトルとし、新たに  $l$  個の制御変数  $Y(n) = [y_1(n) \ y_2(n) \ \cdots \ y_l(n)]^T$  を考える。この  $X(n)$  と  $Y(n)$  を導入すると、制御系設計のためのモデルを、

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m)X(n-m) + \sum_{m=1}^M B(m)Y(n-m) + U(n) \quad (2)$$

と書き直すことができる。このモデルを以降において、制御型多次元自己回帰モデルと呼ぶこととする。ここで、係数  $A(m)$ 、 $B(m)$  はそれぞれ  $r \times r$ 、 $r \times l$  行列であり、 $U(n)$  は  $r$  次元の白色雑音である。また、このモデルを

$$\tilde{X}(n) = \begin{bmatrix} X(n) \\ Y(n) \end{bmatrix}, U(n) = \begin{bmatrix} U(n) \\ * \end{bmatrix}$$

と定義し、

$$\tilde{A}(m) = \begin{bmatrix} A(m) & B(m) \\ * & * \end{bmatrix}$$

と置くと、式(2)は、式(1)と同じような表現となる。

また、適切な次数  $M$  を決定する方法として、赤池情報量基準<sup>(5)(6)</sup>

$AIC = -2 \times (\text{最大対数尤度}) + 2 \times (\text{パラメータ数})$  を用いる。

## 2.2 外乱適応制御型多次元自己回帰モデル

外乱適応制御型多次元自己回帰モデルを当てはめるために、

船の動特性を表す  $A(m)$ 、 $B(m)$  は、低次数に抑え、それは既知、不変とする。

外乱項  $U(n)$  は、有色雑音とする。

$$U(n) = \sum_{k=1}^K C(k)U(n-k) + V(n) \text{ と表現する。}$$

ここで、 $\alpha(k)$  自己回帰係数、 $V(n)$  は白色雑音、 $K$  はモデルの次数である。

のように定義することにより、外乱適応制御型多次元自己回帰モデル

$$X(n) = \sum_{m=1}^{M-K} \tilde{A}(m)X(n-m) + \sum_{m=1}^{M-K} \tilde{B}(m)Y(n-m) + V(n) \quad (3)$$

を得る。ここで、

$$\tilde{A}(m) = A(m) + C(m) - \sum_{j=1}^{m-1} C(j)A(m-j)$$

$$\tilde{B}(m) = B(m) - \sum_{j=1}^{m-1} C(j)B(m-j)$$

である。ただし、

$$A(m) = \alpha(m > M), B(m) = \alpha(m > M)$$

とする。

## 2.3 状態空間表現

時刻  $n-1$  を考えて、 $X(n-1)$ 、 $X(n-2)$ 、 $\cdots$  のように  $X(n)$  の過去の値が与えられたと考え、 $X(n)$ 、 $X(n+1)$ 、 $\cdots$  のような将来の値に線形に關係する情報は、式(1)によると  $X(n-1)$ 、 $\cdots$ 、 $X(n-M)$  によって左右される。式(2)の自己回帰モデルの一つの状態空間表現は、

$$Z_n = \begin{bmatrix} Z_n(n) \\ Z_n(n) \\ \vdots \\ Z_{n-1}(n) \end{bmatrix}$$

と  $Z_n$  を定義すると、

$$\begin{aligned} Z_n &= \Phi Z_{n-1} + \Gamma Y_{n-1} + W_n \\ X(n) &= H Z_n \end{aligned} \quad (4)$$

と状態空間表現できる。ここで、 $Z_n$ は状態変数、 $\Phi$ は状態遷移マトリクス、 $\Gamma$ は制御ベクトル、 $H$ は観測ベクトル、 $W_n$ は外乱である。ただし、

$$\Phi = \begin{bmatrix} A(1) & I & 0 & \cdots & 0 \\ A(2) & 0 & I & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A(M-1) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ A(M) & 0 & 0 & \cdots & 0 \end{bmatrix}, \Gamma = \begin{bmatrix} B(1) \\ B(2) \\ \vdots \\ B(M-1) \\ B(M) \end{bmatrix}, W_n = \begin{bmatrix} U(n) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$H = [I \ 0 \ \cdots \ 0], Y_n = Y(n)$$

## 2.4 二次評価関数の基での最適制御系設計

得られた状態空間表現で動くシステムについて、制御入力  $Y_n$  の良さを評価する為に、適切な整数  $I$  をとって二次評価関数

$$J_I = E\{K_I\}$$

$$K_I = \sum_{n=1}^I \{Z_n^T Q(n) Z_n + Y_{n-1}^T R(n) Y_{n-1}\} \quad (5)$$

を考える。ここで  $Q(n)$ 、 $R(n)$  は、それぞれ  $Mr \times Mr$ 、 $l \times l$  の非負行列で、特に  $R(n)$  は正直行列とする。また、与えられた区間の長さ  $I$  に対して、 $J_I$  を最小にするような  $Y_n$  の列が、最適制御を与える。

$J_I$  を最小にするような  $Y_n (n = 0, 1, \dots, M-1)$  を求めるには、よく知られているダイナミックプログラミング(動的計画法)の最適原理を利用すると、

$$Y_n = GZ_n \quad (6)$$

のようなフィードバック型制御系が得られる。

## 3. 実 船 実 験

開発したオートパイロットの有効性を確かめるために、実船による海上実験を行った。海上実船実験に使用した船は、東京商船大学練習船「汐路丸」と、富山商船高等専門学校練習船「若潮丸」である。主要目を表1に示す。

図2は実験装置である。実験装置を大きく3部分に分けることができる。既存のオートパイロットスタンドと、サーバの役割をするデータ収録装置と、クライアントの機能を持っている制御演算処理装置である。

本システムは、予めランダム操船によって対象船の基本的な船体運動のモデルを求めておく必要がある。このモデル(基本モデル)を使用して、船体運動の推定値を求めることになる。実船実験時の制御の流れは、最初のバッチは基本モデルで制御(固定型という)、2番目のバッチからは、外乱モデルを含んだ新しいモデルと、最

表1 実験提供船の主要目

	汐路丸	若潮丸
LENGTH	49.30 [m]	46.00 [m]
BREADTH	10.00 [m]	10.00 [m]
DRAFT	3.80 [m]	3.20 [m]
GROSS TONNAGE	425 [ton]	231 [ton]

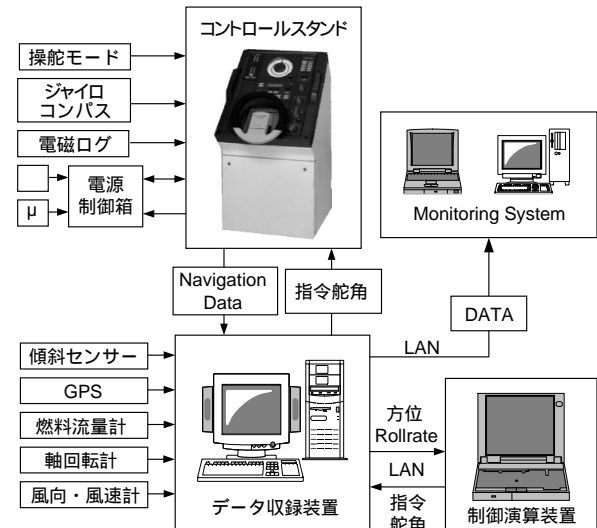


図2 実験装置

適ゲインによって制御を行う(これを適応型という)。また、最適ゲインの計算の時は、重み係数の変更が可能であるので、重み係数を変えながら実験を行った。実船実験では、制御周期を0.5秒、バッチのデータ数を200にした。

### 3.1 実験結果

汐路丸を使用した実験結果の例を、図3に示す。基本モデルの次数は、2次である。

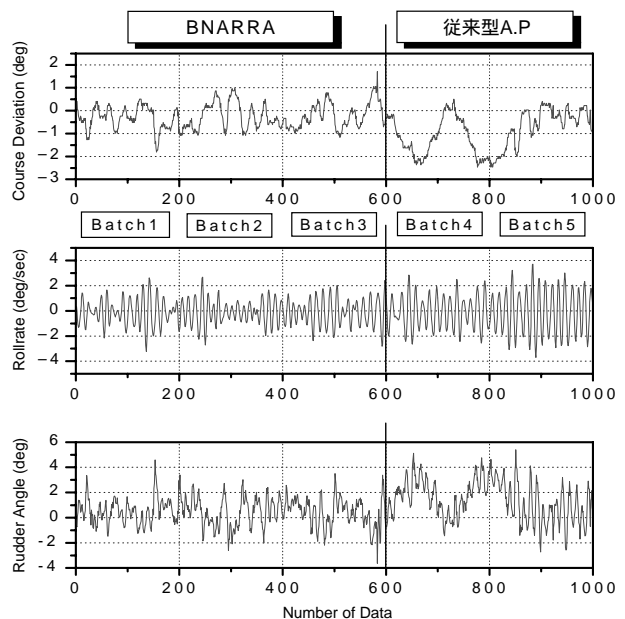


図3 実験結果の時系列

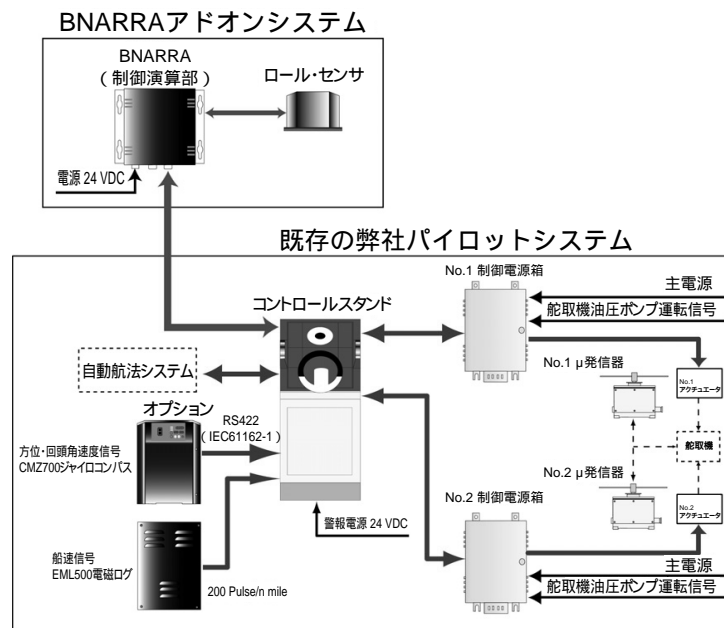


図4 BNARRAのアドオンシステム

実験、海上条件等:Cpp12度、向かい波、風速10 m/sec、波高0.5-1.0 m

意図した通り、100秒間のバッチ毎にモデルの良さを判定し、その時々に対応したモデルによって、制御を実行している。

モデル更新後、保針に悪影響を及ぼさず、横揺れの軽減を実現している。

設定コースからの偏差が約1度以内で、保針制御を行っている。

4.5番目のバッチは、汐路丸の従来のオートパイロットのデータである。

その上、織田らによって提案された横揺れ減少率<sup>1)</sup>を見ると約60%の横揺れが減少していることが判る。

$$REDUCTION(\%) = \frac{CoAV - BnarrAV}{CoAV} \times 100 \quad (7)$$

ここで、 $CoAV$ は従来型オートパイロットの分散、 $BnarrAV$ はBNARRAのバッチ毎の分散を示す。

#### 4. BNARRAの既存船への適用

今後の製品化の面から見ると、新造船の場合はコントロールスタンドに直接組み込むことになるが、既存船の場合は、図4の示すようにアドオンシステムとして取り付けることができ、既存のコントロールスタンドを交換しなくても、低コストで舵減揺システムを搭載することができると考えられる。

#### 5. おわりに

本稿では、BNARRAの制御系の設計方法、BNARRAを使用して行った実船実験結果などについて述べた。実船実験結果BNARRAは、オートパイロット本来の保針性能を損なうことなく横揺れを減揺することができ、横揺れが最大約60%程度軽減されることが判った。

#### 参考文献

- (1) 織田博行, 大津皓平, 佐々木学, 関圭之, 堀田敏行, “制御型多次元自己回帰モデルを用いた舵による舵減揺制御”, 関西造船学会誌, 216号, 1991, p. 165-174
- (2) 織田博行, 大津皓平, 堀田敏行, “操舵による横揺れ制御に関する研究”, 航海学会論文集, 第92号, 1994, p. 193-204
- (3) K. Ohtsu, et al., “A Ship's Autopilot Design Through a Stochastic Model”, Automatica, Vol. 15, No 3, 1979, p. 255-268
- (4) J. Park, et al., “Batch-adaptive Ship's Autopilots”, International Journal of Adaptive Control and Signal Processing, John Wiley & Sons, Ltd, Vol. 14, 2000, p. 427-439
- (5) H. Akaike, “Autoregressive Model Fitting for Control”, Annals of the Institute of Statistical Mathematics, Vol. 23, 1971, p. 163-180
- (6) H. Akaike, “New Look at the Statistical Model Identification”, IEEE, Transactions on Automatic Control, Vol. AC-19, 1974, p. 716-723
- (7) 赤池弘次, 中川東一郎, “ダイナミックシステムの統計的解析と制御”, サイエンス社, 1972