最適自動操舵装置*

瀬野尾 彰**・伊藤 雅則**
有江 龍夫**・高橋 信彦***

An Adaptive Automatic Steering Control System

By Akira Senoo, Masanori Itoh, Tatsuo Arie, Nobuhiko Takahashi

This paper describes an Adaptive Automatic Steering Control System which has recently been developed by Nippon Kokan K.K. in cooperation with Yokogawa Hokushin Electric Corporation.

The purpose of the system is to optimize both the course-keeping and course-changing ability of ship's autopilots under diverse operational and environmental conditions.

The control systems for course-keeping and course-changing are distinctly different:

(1) Course-Keeping Control

An on-line parameter optimization procedure, based on the Hill-Climbing Method, is used in order to minimize the propulsion losses due to steering.

(2) Course-Changing Control

Model Reference Adaptive Control (MRAC) is used in order to improve the transient characteristics during course changes, which makes it possible to assign the desired characteristics by a reference model.

Full-scale sea trials have been carried out with this system, which show a great advantage for both economical steering ability and improved maneuverability.

1. 緒 言

オートパイロットは、船の針路を一定に保持したり、変更したりすることを目的とした(保針と変針)、自動操舵装置である。

通常のPID形オートパイロットの場合、常に目的とする高い制御性能を維持するためには、載貨重量・船速などの運航条件による船の動特性変化、および波・潮流・風などの外乱の性質変化に対し、そのつど制御パラメータを調整することが必要である。しかしこの運航中の制御パラメータ調整は、非常におおまかに行われているのが実状で、その結果、保針時には、針路偏差は十分小さく抑えられているものの、不要な操舵によって推進抵抗が増加するという問題、また保針時とは異なった操舵特性が要求される変針時には、操舵者の希望する安定した過渡特性が得られない、などの問題も生じる。

このような現用オートパイロットの問題に対処し、その性能向上を図ることを目的として、筆者らは、保針制御には直接探索法によるパラメータ最適化手法を、また変針制御にはモデル規範形適応制御(Model Reference Adaptive Control)を応用したオートパイロットを開発し実船実験を行った。実験結果は良好で、保針時の経済操舵、変針時の操舵性改善というそれぞれの目的において非常に有効であることを確認した。

以下、保針制御と変針制御それぞれについて、制御系の構成法と実船実験の結果について述べる。

2. 保針制御¹⁾

2.1 問題の設定と制御系の構成 保針制御には、直接探索法によるパラメータ最適化手法を応用する。図1は保針制御に関する制御系の構成を示したもので、図中の y , y_r , e , u_0 , u は、それぞれ船首方位、設定方位、針路偏差、指令舵角、実舵角である。従来形オートパイロットとの相異点は、コントローラのパラメータ調整器を有している点にある。指令舵角 u_0 から船首方位 y に到るブロックは、一般的な操舵系の特性である。船の動特性(y/u)は、未知で時間的に変化するものと考

* 原稿受付 昭和59年12月3日

昭和59年秋季学術講演(昭和59年10月25日)

** 正会員 日本鋼管(株)システム技術研究所(川崎市川崎区南渡田町1-1)

*** 横河北辰電機(株)(武蔵野市中町2-9-32)

図1 保針制御系の構成

える。

コントローラの基本構造は、従来形オートパイロットとほぼ同様で、(1)式に示すPID形のものを採用しパラメータ調整の規準として、(2)式に示す針路偏差と実舵角に関する2次形式評価関数²⁾を導入する。

$$u_0(k) = \left[\frac{(k_p + k_i + k_d) - (k_p + 2k_d)z^{-1} - k_d z^{-2}}{1 - z^{-1}} \right] e(k) \quad (1)$$

$$J = \left[\sum_{k=1}^n (e(k)^2 + \lambda u(k)^2) \right] \frac{1}{n} \quad (2)$$

ここで k_p , k_i , k_d は、それぞれコントローラの比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲインである。 λ は評価関数の重み係数で、一般にタンカなど肥大した船形を有し、保針性の悪い船ほど小さな値を与える。

制御目的は、運航中(1)式の制御パラメータをオンライン調整し、(2)式を最小化することである。

パラメータ調整の具体的方法は、図2に示すように、可調整パラメータ(保針操舵特性を決定する上で、重要な比例ゲイン k_p と微分ゲイン k_d を可調整とし、積分ゲイン k_i は一定値とした)に、計画的な摂動を与え、パラメータが増加した区間、減少した区間、それぞれ先の評価関数値を実測し、その両者を比較して、パラメータ摂動の中心値を逐次修正するというものである。

パラメータ調整には、たとえば次式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} k_{pb}(n+1) &= k_{pb}(n) \\ &\quad + G_p \{ (J_3(n) + J_4(n)) - (J_1(n) + J_2(n)) \} \\ k_{db}(n+1) &= k_{db}(n) \\ &\quad + G_d \{ (J_2(n) + J_4(n)) - (J_1(n) + J_3(n)) \} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで k_{pb} , k_{db} は、それぞれ比例ゲイン、微分ゲインの摂動の中心値で、 J_i は図2の各区間における評価関数の実測値である。また G_p , G_d は正数のゲインで、 n は n 回目の試行であることを示す。

図2 パラメータ調整法概念図(保針制御)

2.2 実験結果(保針)

本装置の性能試験は、 $L=230$ m, $B=38$ m, $D=20$ m, 載貨重量 86,000 DWt のばら積み船を対象とし、日本一豪州、日本一北米の両航路における実航海時に、従来形オートパイロットと性能を比較した。図3は従来形オートパイロットの右側面に取り付けられた本装置の外観を示したものである。本装置のハードウェアは16ビットのマイクロコンピュータによって構成され、後に述べる変針制御アルゴリズムも、ハード的には同一システムとなっている。

実船試験においては、4時間ごとに本装置と従来形オートパイロットを交互に使用し、その間オートパイロットの性能を評価する上で重要となる、針路偏差、舵角、船速、主機軸馬力及び波・風に関するデータを収集した。

図4は(2)式の評価関数に関する本装置と従来形の違いを示したもので、本装置の場合、時間の経過とともに評価関数値が減少しており、パラメータ調整が適切に行われていることがわかる。また評価関数値レベルも従来

図3 従来形オートパイロットスタンド側面に取り付けられた本装置外観

図4 評価関数値の経時変化(従来形との対比)

図5 針路偏差と舵角(従来形との対比)

図6 船速と軸馬力の関係(従来形との対比, 満船)

図7 船速と軸馬力の関係(従来形との対比, 空船)

形に比して約65%と低くなっている。

図5は針路偏差と実舵角に関する本装置と従来形の違いを示した一例で、本装置の場合、従来形に比してやや針路偏差が大きくなっているが、操舵量・操舵回数が非常に少なく、これが操舵抵抗軽減の大きな要因になっているものと考えられる。

保針時の運航経済性がいかに改善されたかを、定量的に評価するには、運航中の船速と主機軸馬力の関係を調べればよい。本試験では、主機軸馬力 P が船速 V の3乗に比例するという(4)式の関係を用いて、その比例定数 C について、本装置と従来形の比較を行った。

$$P = CV^3 \quad (4)$$

図6は長期間の航海によって得られたデータをもとに満船時の船速 V と軸馬力 P の関係に関する本装置と従来形の違いを示したものである(本装置○、従来形×)。図中の各点は、20分間平均値をプロットしたもので、試験中の気象・海象の変動に関しては、同時に測定した風波のデータを用いて、主機軸馬力 P を補正し、平水中の条件に換算した。図からわかるように、本装置の場合、(4)式の比例定数 C の平均値は、従来形に比して約3.5%小さくなっており、結果は非常に良好である。図7は同様の試験を空船時に行った結果を示したもので、満船時と比較してやや効果は減少するが、約1.0%の省エネルギー効果が認められる。

3. 変針制御³⁾

3.1 問題の設定と制御系の構成 変針制御にはモデル規範形適応制御を応用する。図8はその制御系で、コントローラ、適応機構及び規範モデルによって構成される。

モデル規範形適応制御を応用する場合、制御対象を線形モデルで記述して取り扱う。ここでは、図8の指令舵角 u_0 から船首方位 y に到る操舵系の特性を、外乱も含め(5)式で近似的に表現する。

$$\left. \begin{aligned} A(z^{-1})y(k) &= z^{-d}B(z^{-1})u_0(k) + u_d + v(k) \\ A(z^{-1}) &= 1 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n} \\ B(z^{-1}) &= b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_mz^{-m} \quad (b_0 \neq 0) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで $u_d + v(k)$ は波・潮流・風などの外乱を示し、 u_d はその定値成分(一定の旋回モーメント)である。 d は操舵系のむだ時間である。パラメータ a_i 、 b_i 及び外乱 u_d 、 $v(k)$ は未知である。また(5)式に関し以下の仮定を設

ける。

- (Ⅰ) $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ は互いに既約である。
- (Ⅱ) $A(z^{-1})$ 、 $B(z^{-1})$ の次数 n 、 m 及びむだ時間 d は既知である。
- (Ⅲ) $B(z^{-1})$ は漸近安定である(すなわち零点が z 平面の単位円内に存在する最小位相系)。

以上の仮定のもとに、制御目的を(6)式によって定義する(外乱の不規則成分 $v(k)$ は白色雑音として無視する)。

$$y^*(k+d) - y(k+d) = 0 \quad (6)$$

すなわち、目的は変針時の各瞬間における船首方位 y を理想的な特性を持つ規範モデルの出力 y^* に追従させることにある。(6)式において $y^*(k+d)$ は時刻 $(k+d)$ における目標値で、操舵系のむだ時間 d だけ事前に入手できるものとする。

以上の目的は、(7)式の形で示される制御則によって達成される。

$$\left. \begin{aligned} u_0(k) &= (y^*(k+d) - P_0^T \phi_0(k)) / b_0 \\ \phi_0^T(k) &= (u_0(k-1), \dots, u_0(k-m-d+1), \\ &\quad y(k), \dots, y(k-n+1), 1) \\ P_0^T &= (\beta_1, \dots, \beta_{m+d-1}, \alpha_1, \dots, \alpha_n, r) \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

なお、実際には(7)式のパラメータ P_0 及び b_0 は未知であるので、これらを推定値 $\hat{P}_0(k)$ 、 $\hat{b}_0(k)$ に置き換えた(8)式を用いる。

$$\left. \begin{aligned} u_0(k) &= (y^*(k+d) - \hat{P}_0^T(k) \phi_0(k)) / \hat{b}_0(k) \\ \hat{P}_0^T(k) &= (\hat{\beta}_1(k), \dots, \hat{\beta}_{m+d-1}(k), \hat{\alpha}_1(k), \\ &\quad \dots, \hat{\alpha}_n(k), \hat{r}(k)) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$\hat{P}_0(k)$ 、 $\hat{b}_0(k)$ の推定には、たとえば(9)式に示すパラメータ調整則(適応則)を用いる。

$$\left. \begin{aligned} \hat{P}(k) &= \hat{P}(k-1) \\ &\quad + \frac{F(k-1)\phi(k-d)\{y(k) - \hat{P}^T(k-1)\phi(k-d)\}}{1 + \phi^T(k-d)F(k-1)\phi(k-d)} \\ \hat{P}^T(k) &= (\hat{b}_0(k); \hat{P}_0^T(k)) \\ \phi^T(k) &= (u_0(k); \phi_0^T(k)) \\ F(k) &= \frac{1}{\lambda_1} \left[F(k-1) \right. \\ &\quad \left. - \frac{\lambda_2 F(k-1)\phi(k-d)\phi^T(k-d)F(k-1)}{\lambda_1 + \lambda_2 \phi^T(k-d)F(k-1)\phi(k-d)} \right] \\ &\quad (0 < \lambda_1 \leq 1, 0 \leq \lambda_2 < 2, F_{(0)} > 0) \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

図8 変針制御系の構成

ここで $\hat{P}(k)$ は推定パラメータベクトル, $\phi(k)$ は入出力信号ベクトル, $F(k)$ は適応ゲインマトリクスである.

3.2 実験結果(変針) 以上に述べた制御手法を実船に適用する場合, 操舵系のモデル構造, すなわち(5)式の次数 n , m 及びむだ時間 d を決定する必要がある. これに関して事前に行ったシミュレーションテストによれば, 操舵系モデルに ARMA モデルを用いた場合, 対象によっては推定されるプラントが非最小位相系(前節の仮定(Ⅲ)が成立しないプラント)になることもあるため, “むだ時間+AR モデル”⁴⁾を採用し, モデル次数を $n=3, m=0$ とした. また実験に用いた制御用コンピュータの演算速度が, サンプル周期に比して無視できないことを考慮し⁵⁾, モデルの分子多項式の次数を修正し $n=3, m=1$ とした実験もあわせて行った. むだ時間 d については, シミュレーションテスト及び船のステップ応答等をもとに, $d=5$ (サンプル周期 3 sec)と

した.

また実験においては, 舵角制限として $u_0(k)$ に対して $\pm 10 \text{ deg}$ の振幅制限を設けた⁶⁾.

実験結果を図 9, 図 10 に示す(それぞれ $(n, m, d) = (3, 0, 5), (3, 1, 5)$ とした実験結果である). 実験では, 変針中の船の旋回角速度(rate of turn)を一定に制御することを目的とし, 設定方位 y_r のステップ変化に対し, 目標値 y^* をランプ状に出力する規範モデルを用いた. 実験結果からわかるように, 図 9, 10 いずれの場合も, 第 1 回目の変針では, 目標値 y^* に対し船首方位 y にややオーバーシュート, アンダーシュートを生じているが, これはコントローラパラメータの推定が十分に進んでいないためである. しかし第 2 回目の変針においては, ほぼ旋回角速度一定の制御が実現できている. また図 9 と図 10 の結果を比較した場合, 制御用コンピュータの演算時間を考慮した後者の方が, 目標値 y^* に対する船首方位 y の追従性が良くなっていることがわかる.

実験の対象とした船は, $L=214 \text{ m}$, $B=32 \text{ m}$, $D=18 \text{ m}$, 載貨重量 64,000 DWt のばら積み船で, 実験時の載貨条件は空船, 船速は 12~13 ノットである.

なお, ここに示した結果のほかにも, 大きさの異なる船及び異なる海象における実験も行い, ほぼ同様の結果を得ている.

4. 結 言

以上, 保針制御には直接探索法にもとづいたパラメータ最適化手法を用い, また変針制御にはモデル規範形適応制御を応用したオートパイロットの設計法について述べ, 実船実験の結果によって, 保針時の運航経済性の向上及び変針時の操舵性の改善に有効であることを示した.

最後に, 本装置の開発に当たり, 適応制御の理論面における適切など指導を賜りました, 名古屋工業大学の藤井省三, 水野直樹両先生, 及び実船実験に際して多くのご協力をいただきました, 昭和海运(株)の関係者の皆様には, 心からお礼を申し上げます.

文 献

- 1) 伊藤・有江他 3 名: 第 23 回計測自動制御学会学術講演会前刷, pp. 43~44, (1984)
- 2) N. H. Norrbin: Report of Performance Committee Appendix 8 (13th ITTC), pp. 382~430, (1972)
- 3) 藤井・水野他 3 名: 第 22 回計測自動制御学会学術講演会前刷, pp. 11~12, (1983)
- 4) 藤井・水野: 計測自動制御学会論文集, Vol. 18, No. 3, pp. 238~245, (1982)
- 5) 藤井・水野・森田: 第 25 回自動制御連合講演会前刷, pp. 91~92, (1982)
- 6) 藤井・水野: 計測自動制御学会論文集, Vol. 18, No. 8, pp. 859~861, (1982)

図 9 変針実験結果($n=3, m=0, d=5$)

図 10 変針実験結果($n=3, m=1, d=5$)

〔質 疑 応 答〕

質問者 東京商船大学 堀籠教夫

〔質問〕 1. (1)式の k_i はどのように決定するのか。バラストでもフルでも k_i は一定なのかどうか。

2. モデルレファレンスにおける理想モデルはどのようなものか。さしつかえなければご教示願いたい。

〔回答〕 1. 積分ゲイン k_i の値を大きくし過ぎると、系の不安定化の原因となる。したがって、本装置における固定パラメータ k_i には、対象となる船のフルロード時におけるおおまかな K , T をもとにして、系の安定性が十分に確保できる範囲で、できるだけ大きな値を設定している(特に船の載貨条件によって、 k_i は変えていない)。またシミュレーションテストの結果によれば、系が安定であれば、 k_i の値の違いによる制御性能の違いはほとんどないといつてよい。

2. 変針制御における規範モデルとして、線形モデルを用いなければならないという制約はない。本装置では、変針時の rate of turn を一定に制御することを目的とし、設定方位 y_r のステップ変化に対し、ランプ状に応答

する規範モデルを採用している(図参照)。

なお、ランプ信号の傾斜は、操船者の希望する rate of turn に応じて、変更可能である。また rate of turn の変更によって、コントローラパラメータが変化することはない。

質問者 日本無線(株) 関根兆五

〔質問〕 アダプティブオートパイロットは従来形オートパイロットに比べヨーイングが増加する事がデータに現われていたが、乗組員の乗心地に対する反応はどうであったか。

〔回答〕 大洋航海中における省エネルギー運航という観点からすれば、設定針路に対する数度のヨーイングは、許容できるというのが操船者の一般的な見解である。

しかし、見合関係にある他船が存在するような場合には、運航経済性というよりも、むしろ安全性が重視されるべきであることは言うまでもない。本装置は従来形オートパイロットに付加する形で装備されており、上のような状況において、本装置を用いるか、保針性を重視して調整された従来形オートパイロットを用いるか、あるいは手で操舵するか、の決定は、操船者の判断に委ねられている。

質問者 日立造船(株)技術開発本部 田中凱男

〔質問〕 日本鋼管(株)と横河北辰電機(株)との共同開発であります。将来日本鋼管(株)が本機を内作される予定があるのですか？ 営業はどこがするのですか。

又成果の配分はどういう風に行われるのですか？

〔回答〕 現在、装置の製作と営業は横河北辰電機(株)が行っている。

また成果の配分は、共同開発の契約書にもとづいて行う予定である。