

TUMSAT-OACIS Repository - Tokyo

University of Marine Science and Technology

(東京海洋大学)

船体運動の統計的解析と制御—
40年の研究のまとめと展望—

メタデータ	言語: jpn 出版者: 公開日: 2008-04-14 キーワード (Ja): キーワード (En): 作成者: 大津, 皓平 メールアドレス: 所属:
URL	https://oacis.repo.nii.ac.jp/records/271

船体運動の統計的解析と制御 — 40年の研究のまとめと展望 —

大津 皓平*

(Accepted November 29, 2007)

Statistical Analysis and Control of Ship's Motion -Review and Prospect of the Studies for 40 Years-

Kohei OHTSU

Abstract: This paper represents the review and prospect on the author's research works during 40 years since 1967 when the author started his researching life at the Tokyo University of Mercantile Marine. The fields which the author has taken strong interests in, are mainly the time series analysis and stochastic control of ship's behavior at irregular sea, the tracking problem and the minimum time berthing problem of ships. In this paper, those researching works are shown using the actual experimental results.

Key words: Ship's Motion at Sea, Time Series Analysis, Bi-Spectrum, AIC, Auto Regressive Model, Ship's Autopilot, Rudder-Roll Control, Ship's Marine Governor, Ship's Variable Gain Control, Ship's Tracking, Minimum Time Maneuvering Control System.

1 まえがき

本論文は著者の東京商船大学奉職以来、今日に至るまでの研究内容について内容別にまとめたものである。研究動機、解決法、成果とともに今後の課題を述べ後進の研究者の参考に供したい。

2 船舶の運動の統計的解析と制御

2.1 研究の動機

Kinsman の大著 [1] にあるように、1950 年前後、海洋波を確率過程として捉え、海洋波の統計的構造を周波数領域で明らかにする先駆的な論文が多数発表された。そしてこの理論は、St.Denis and Pierson[2] によって、波からの線形重ね合わせ理論を仮定して、ただちに海洋波中の船の統計的性質を表わす理論に発展した。我が国においても、山内 [3] が Blackman and Tukey[4] や Akaike[5] 等の構築した Window 関数を使って船舶の不規則波中の運動の統計的性質を解析するスペクトラム推定法を確立した。また、水槽試験などに多用される周波数応答関数の計算法の精度を高める方法も Akaike and Yamanouchi[6] により確立された。著者が研究生活に入った時期は丁度このような不規則波中船体運動の周波数領域における統計的取り扱い法が確立した時期にあっている。

船舶の不規則波中の運動を確率過程として捉える方法の次に進むべき方向としては、周波数領域において

1. 高次スペクトラムを導入し非線形横揺れなどの船舶の非線形性を表現する方法の開発
 2. 不規則運動の時間領域での取り扱い法の確立
- があった。丁度時期を同じくして電子計算機が驚異的に高速化されたこともあり、この2つの問題に取り組むこととした。

2.2 非線形横揺れと高次スペクトラム

Hasselmann[7] は海洋波の非線形、非ガウス性を周波数領域で明らかにするため通常使われる 1 次元 2 次スペクトラム (パワースペクトラム) より 1 次元高次のバイスペクトラム Bi-Spectrum(Bis) を導入し、海洋波の周波数間の依存性を明らかにした。ここでバイスペクトラムは、時系列過程 $x(t)$ の 3 次の相関関数 $R_{xxx}(\tau_1, \tau_2)$ のフーリエ変換として

$$B(\omega_1, \omega_2) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} R_{xxx}(\tau_1, \tau_2) e^{-j(\omega_1\tau_1 + \omega_2\tau_2)} d\tau_1 d\tau_2 \quad (1)$$

によって与えられる。ここで、 τ_1, τ_2 は時間ラグ数である。著者は非線形大角度横揺れ方程式

$$\ddot{\phi}(t) + 2\alpha\dot{\phi}(t) + \beta\phi(t)|\dot{\phi}(t)| + \omega_0^2\phi(t) + \varkappa_3\phi^3(t) = n(t) \quad (2)$$

の解析のため、バイスペクトラムを Tukey が発見した高速

* Course of Applied Marine Environmental Studies, the Graduate School of Marine Science Technology, Tokyo University of Marine Science and Technology, 2-1-6 Etchujima, Koto-ku, Tokyo 135-8533, Japan (東京海洋大学大学院・海洋科学技術研究科 応用環境システム学専攻)

フーリエ変換法を用いて計算した。ここで、 $\phi(t)$ は横揺れ過程である。Fig. 1 はその周波数間の依存性を表し (山内, 大津 [8]), 2つの周波数間の和あるいは差の周波数が誘起される強さを表わす。

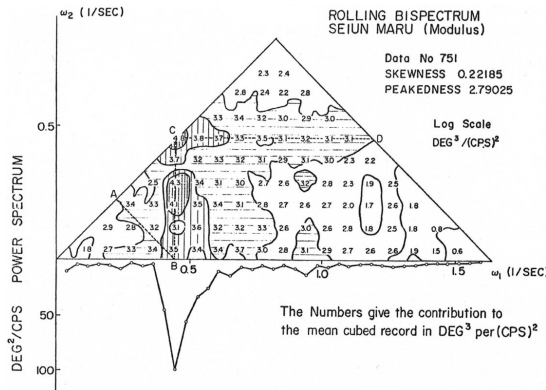


Fig.1 Bi-spectrum of Ship's Rolling (Modulus)

バイスペクトラムはその解釈が難しく、海洋の垂直方向の水温分布の解析に、あるいは自動車のサスペンションの解析等に用いた例が報告されていたが、今日では、脳科学、音声学など広範囲の領域で用いられている。山内, 大津 [8] では、式 (2) の時間領域でのシミュレーションはアナログ計算機で行っているが、計算機が高速化された今日において、計算機内で式 (2) 内の非線形パラメータを系統的に変化させたデジタルシミュレーションを行うことも可能となってきた。しかし非線形現象が非常に微妙なタイミングで起きることを考えれば、アナログシミュレーションによる方法の方が現象の再現性があると考えられる。今後、このようなハイブリッド計算機によってどの周波数間に依存性が強いかを、パラメトリックに位相関係も含めて検討する必要がある。また 2次元データに対するクロスバイスペクトラム (Cross Bispectrum) や、さらに高次のスペクトラムの解析も行う必要がある。

2.3 赤池情報量規準 (AIC) との出会い

周波数解析が主であった時系列解析に対して、Box-Jenkins[9] は与えられた時系列の実現値 $\{x(n), n = 1, 2, \dots, N\}$ に対して時間領域で自己回帰モデル (Auto Regressive Model) $x(n) = a(1)x(n-1) + a(2)x(n-2) + \dots + a(M)x(n-M) + \varepsilon(n)$ (3) などの時系列モデルを構築し、2, 3 次の低次数モデルによって経済時系列などの解析を行っていた。ここで、 $x(n)$ は時刻 n における変数 x の実現値、 $\varepsilon(n)$ はガウス性の白色雑音である。与えられた時系列にモデル (3) を当てはめる際に最大の難関は次数 M の決定法であった。Box-Jenkins 法では残差の 2 乗和の減衰状態などで決めていたが、赤池 [10] は 1972 年にセメントキルンの多変数制御に当たって多変数自己回帰モデルを採用し、このモデルの良さを最終予測誤差 (Final Prediction Error; FPE) と呼ばれる予測分布に基づく予測誤差が最小となる次数をモデルの次数として採用する

ことを提唱した。大津等 [13] は、このモデル同定法を船舶の自動操舵系に応用し実船実験を行った。この成果はセメントキルンに次ぐ赤池の方法の成功例であった。以後間もなくして九州電力の発電ボイラの制御などに応用され画期的な成果を上げた。FPE はさらに拡張され今日、赤池情報量規準 (Akaike's Information Criterion; AIC) として知られる量が従来の最尤法に代わって提案され (Akaike[11]), 統計学の革新をもたらした。AIC は、従来の最尤法を適用するため平均最大対数尤度をモデルの尤度として用いる場合、モデルのパラメータ数だけ偏りがあることからその量を修正し、モデルの良さの測度として、一般に

$$AIC = -2 \log(\text{Maximum Likelihood}) + 2(\text{Number of Free Parameters}) \quad (4)$$

によって与えられる。実際には、対象とするモデル空間の中で AIC が最小となるモデルが最良とされる。例えば、上記の 1 次元 M 次自己回帰モデルの場合、

$$AIC(M) = N(\log 2\pi\hat{\sigma}_M^2) + 2(M+1) \quad (5)$$

となる。ここで、 N はデータ個数、 $\hat{\sigma}_M^2$ は残差の分散の推定値である。

このような最小 AIC 推定法 (Minimum AIC Estimation) は時系列の統計モデルばかりでなく一般に変数間のパラメトリックなモデルの構築に際して威力を発揮することから今日伝統的な検定論に代わって統計学のあらゆる領域で使われている。赤池博士は 2007 年にこの功績によって世界の科学、文明の発展に貢献した人に贈られる京都賞を受賞した。

2.4 実船データの統計的解析

いま船体の横揺れ、縦揺れなど 6 自由度の運動やそれと連動する機関回転数などの時系列 $\{X(n), n = 1, 2, \dots, N\}$ から成る多変数 (k 次元) 状態変数 $X(n)$ が与えられたとし、この変数間に

$$X(n) = A(1)X(n-1) + A(2)X(n-2) + \dots + A(M)X(n-M) + E(n) \quad (6)$$

で与えられる時間的關係があるとする。ここで、 $A(m)$ は回帰係数行列、 $E(n)$ はガウス性の白色雑音である。このような多次元自己回帰モデルに対して、AIC は

$$AIC(M) = N(k \log 2\pi + \log |\hat{\Sigma}_M| + k) + k(k+1) + 2k^2M \quad (7)$$

で与えられる。ただし、 $\hat{\Sigma}_M$ は k 次元 M 次モデルの残差の分散・共分散行列の推定値である。パラメータは Yule-Walker 法や Levinson-Durbin 法などを使ってデータの相関関数行列から計算されるものとする。このモデルが最小 AIC 推定法で同定されると、フーリエ変換によって周波数領域に変換され、オートスペクトラム、クロススペクトラム、周波数応答関数の他、そのスペクトラムに寄与する成分を周波数領域で示す雑音寄与率 (Noise Contribution) や周波数応答関数などが新たに計算できる。この手法を使って、大津

[14]では、船体運動時系列間の関係を練習船汐路丸などの実船データから解析している。Fig. 2は船体運動要素のひとつであるYawingに対して寄与する自分も含む他変数の周波数領域での割合を示したものである。

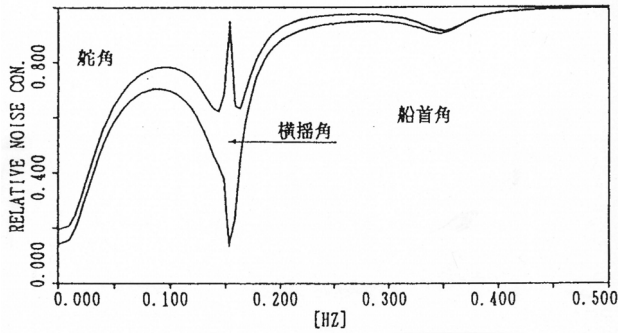


Fig.2 Noise Contribution of Rolling, Yawing and Rudder to Yawing

図からわかるように舵の長周期領域からの寄与が見てとれる。また大津、半間 [15]では、船の運動から舵への寄与を調べることにより人間や機械の操舵能力などの分析も行っている。

2.5 船舶のオートパイロットシステムの開発

船の保針制御系を、前節で述べた多変数モデルの状態変数から、舵など制御変数の部分を切り離した制御型自己帰帰モデル

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m)X(n-m) + \sum_{m=1}^M B(m)Y(n-m) + E(n) \quad (8)$$

によってオートパイロットなどの制御系をモデル表現する。ここで、 $X(n)$ は状態変数、 $Y(n)$ は舵角、スラスト翼角などの操作変数である。次にこのモデルを適切な変換によっ

て、状態空間表現 (State Space Representation)

$$\begin{aligned} Z(n) &= \Phi Z(n-1) + \Gamma Y(n-1) + U(n) \\ y(n) &= HX(n) + W(n) \end{aligned} \quad (9)$$

と表現する。この変換は一意では無いが、ここでは制御信号が高速に得られる変換法を用いることとする (詳しくは赤池、中川 [10]を参照)。

このモデルが船体の操縦運動を表わすために有効ならば、このモデルを実際の船の操縦運動とみなして、制御を行うことができる。当時、制御変数と被制御変数に関する2次形式の評価関数、

$$J_N = \sum_{n=1}^N Z^t(n)QZ(n) + Y^t(n-1)RY(n-1) \quad (10)$$

の下での最適制御理論は数学的には完成しており、最適方略 $Y^*(n)$ は、

$$Y^*(n) = GZ(n) \quad (11)$$

のようなフィードバック制御則として与えられることは分かっていた (例えば Bryson and Ho[24])。ここでGはリッカティ方程式を解くことによって得られる定常最適ゲインである。大津、北川等 [13]、大津 [14]はさらに制御のためのアクチュエータの動作速度を制限するため評価関数

$$J_N = \sum_{n=1}^N Z^t(n)QZ(n) + Y^t(n-1)RY(n-1) + (Y(n-1) - Y(n-2))^t T (Y(n-1) - Y(n-2)) \quad (12)$$

を設定し

$$Y^*(n) = G_1 Z(n) + G_2 Y(n-1) \quad (13)$$

の形の最適制御則を動的計画法によって求めた。

Fig. 3は1975年に最初に行った汐路丸2世による実船実験の結果で、制御変数を舵、被制御変数を針路偏差とした実船実験の結果である。

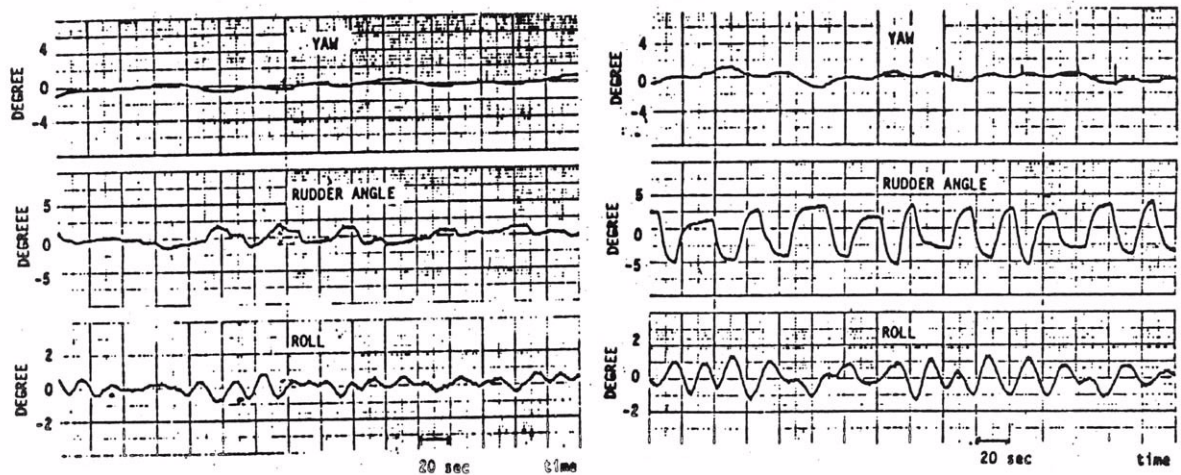


Fig.3 The First Trial of AR Type of Autopilot by Shioji-Maru II (Left side: AR type, Right side: Conventional)

図から分かるように従来のオートパイロットに比べ少ない舵角量で制御していることが分かる。

さらに重要なことは、舵角量が少ないことにより舵によって誘起される横揺れが少ないことである。当時ここで取り扱った最適制御理論は理論的には美しいが実例は少なく、この結果はautomaticaにOhtsu, Horigome and Kitagawa[16]として発表された。

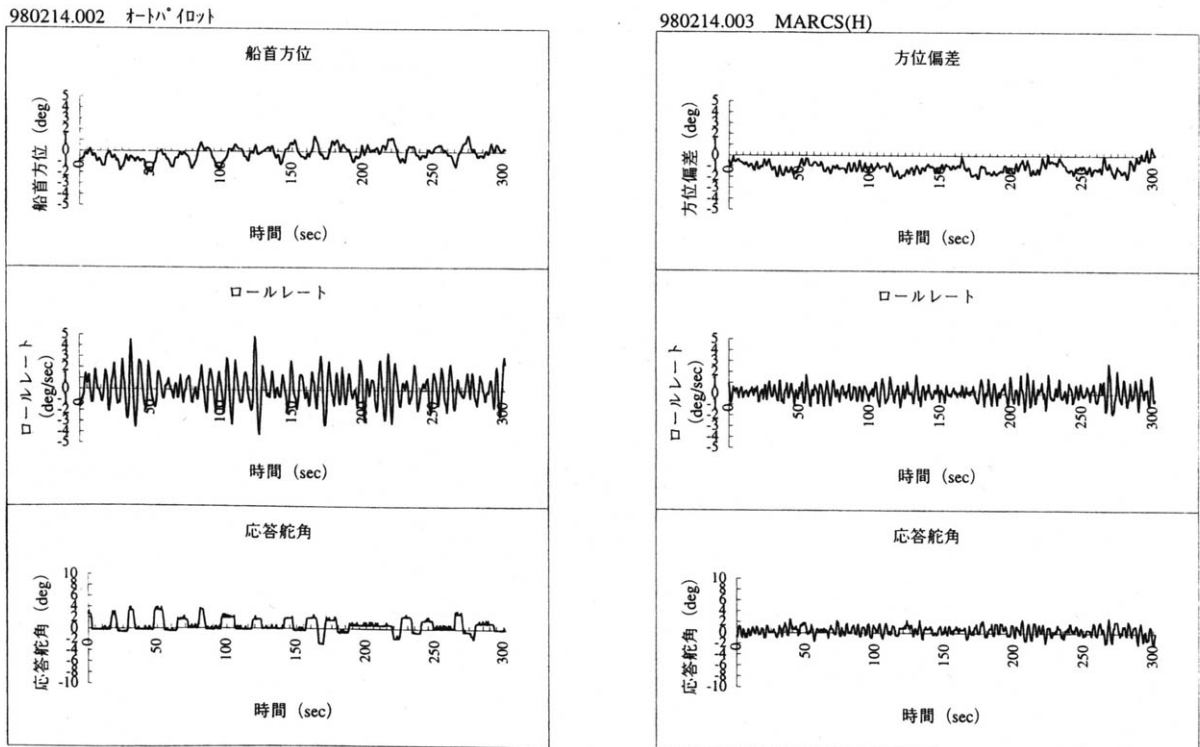


Fig.4 Rudder-Roll Reduced Type of AR Autopilot

2.7 外乱適応型オートパイロットの開発

Fig. 5は、海洋波中を航行する船舶の1時間毎のスペクトラムを示したものである。図からわかるように船の運動は突発的に変化するものではなくゆっくりと変化する。

このようにゆっくりと変化する局所定常システムに対して適応的に適切な制御を実施することが望まれる。Ozaki-Tong[21]は、局所定常過程に対する自己回帰モデルへのあてはめに対して最小AIC推定法を利用するFig.6のような方法を提案した。この方法は定められたバッチ区間の自己回帰モデルに対してAICを比較してAICの小さい方のモデルを採用する方法である。すなわちFig.6において2つのバッチ区間のそれぞれのARモデル AIC_1, AIC_2 のAICの和(独立モデルと仮定している)、2つの区間を併合した場合のモデル(併合モデル)の AIC_0 を比較し

$$AIC_1 + AIC_2 < AIC_0$$

のときはモデルを新たなモデルに変更する方式である。

大津, 北川等 [22], Park, Ohtsu and Kitagawa[23]は、この

2.6 舵減揺型オートパイロットシステムの開発

前節で述べた舵を適切に取ることで、船首揺れが制御できるばかりでなく横揺れ軽減効果が期待できる。このアイデアを利用して織田, 大津等 [17], Oda and Ohtsu 等 [18]は被制御変数 $X(n)$ として、針路偏差に加え横揺角速度を考慮し、舵のみで実船実験を行った。Fig.4はその結果で、針路偏差の軽減とともに横揺角速度の軽減が見られる。本システムは三井造船昭島研究所からMARCSの商品名で生産されている。

方法を制御問題に適用して局所的に変化するシステムに適応させるNoise Adaptive Autopilot Systemと呼ばれるオートパイロットを提案している。Fig.7は200秒毎に上で述べた手続きを繰り返し、新しいモデルに対する最適制御則を動的計画法で導出しながら切り替えて航海させた結果である。ここで、バッチ区間でのパラメータ推定にはHouseholder変換を用いる最小2乗法を用いている。図からコントローラは新しい状況にゆっくりと追隨していることがわかる。

2.8 主機関ガバナーの開発

船舶のオートパイロットと並んで船用主機関のプロペラ回転数を制御するガバナーは、重要な制御システムである。ワットは巧妙な仕掛けによる機械式ガバナーを開発した。現在は電子ガバナーが主流であるが、その制御方式はガバナーにおけるラック変位を入力、プロペラ回転数変動を出力とする1入力1出力系のフィードバック系である。中谷, 大津 [19]は、多くのデータを用いて船舶の運動とプロペラ

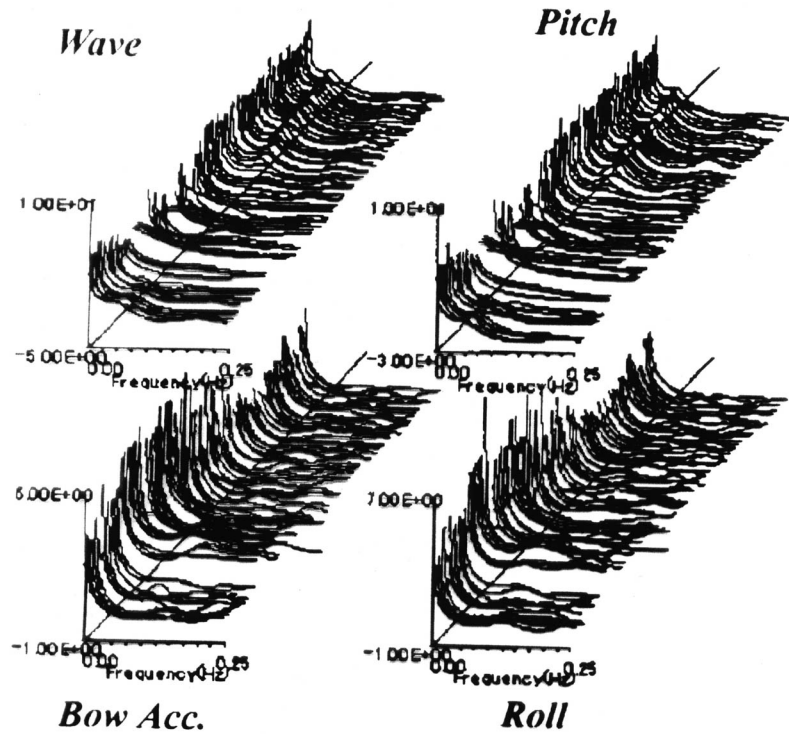


Fig.5 The Change in Spectra of Wave, Pitch, Bow Acceleration and Roll for Long Time (every 10 minutes per hour)

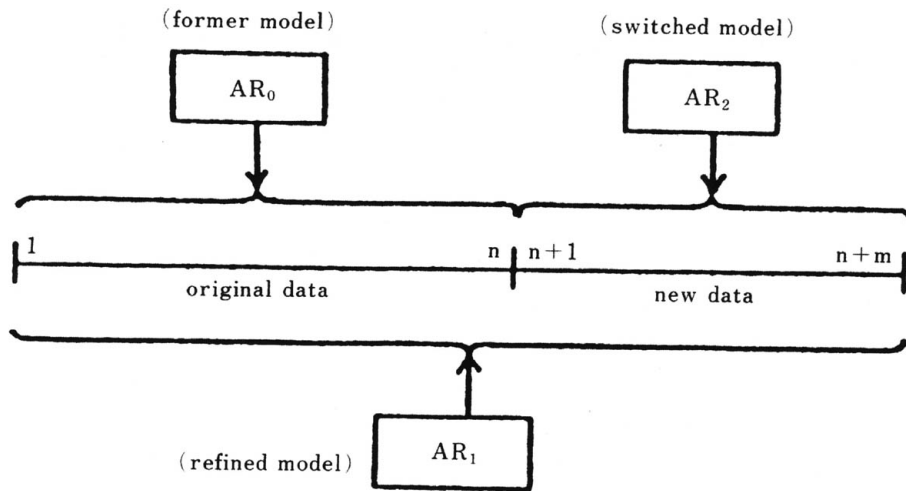


Fig.6 Ozaki-Tong Algorithm of Locally Stationary Process

回転数変動の関係を統計的に解析し、回転数変動の主因は上下揺れ、縦揺れであることを明らかにした。Fig. 8は雑音寄与率を使って回転数スペクトラムに寄与する船体運動成分を実船データ（汐路丸3世）から調べたもので、明らかに船の縦揺れと上下揺れからの寄与が見られる。石塚、大津 [20]は、ラック変位量の変動に対するプロペラ回転数の周波数応答関数を実船データのモデル化によって求めた。Fig. 9はこの結果を示す。実船によるこのような結果は類例が無く、Fossen[12]はこの結果を引用している。また大津

[20]は、プロペラ回転数変動の予測精度を向上させるため、上記の解析で得られた2つの船体運動要素すなわち上下揺れ、縦揺れを考慮した制御型自己回帰モデルを構成し、プロペラ回転数の最適制御の実船実験を行った。Fig.10はその結果で従来型に比べ少ないラック変位量でプロペラ回転数を抑制している。省エネ運航が焦眉の急となった今日、新たにプロペラ変動に寄与する船体運動を取り込んだ新しいガバナーシステムの実用化が望まれる。

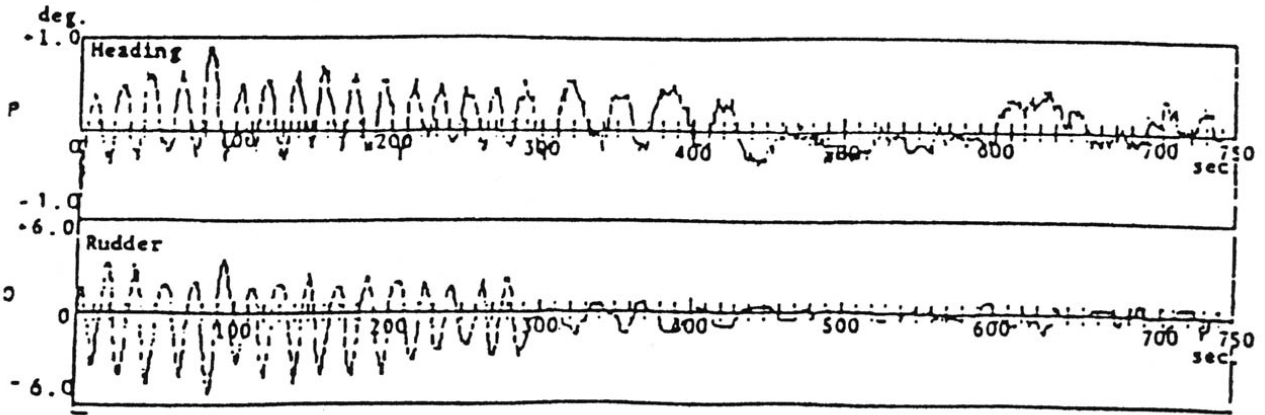


Fig.7 The Result of the Actual Test of the Noise Adaptive Autopilot (Yuge Maru)

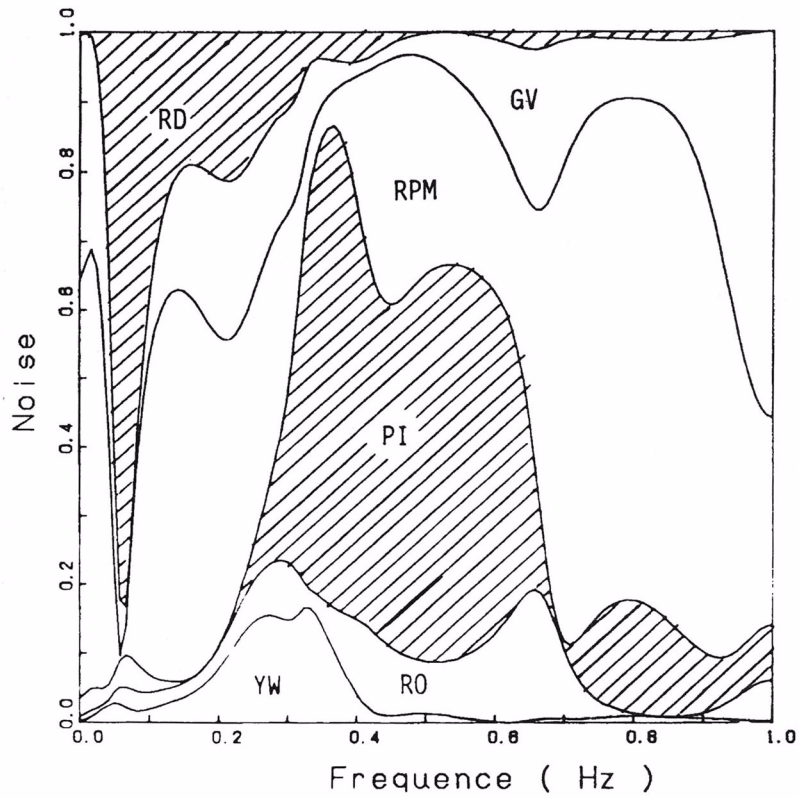


Fig.8 The Noise Contribution of Yaw(YW), Roll(RO), Pitch(PI), Propeller rpm(RPM), Governor(GV) and Rudder(RD) to Propeller rpm

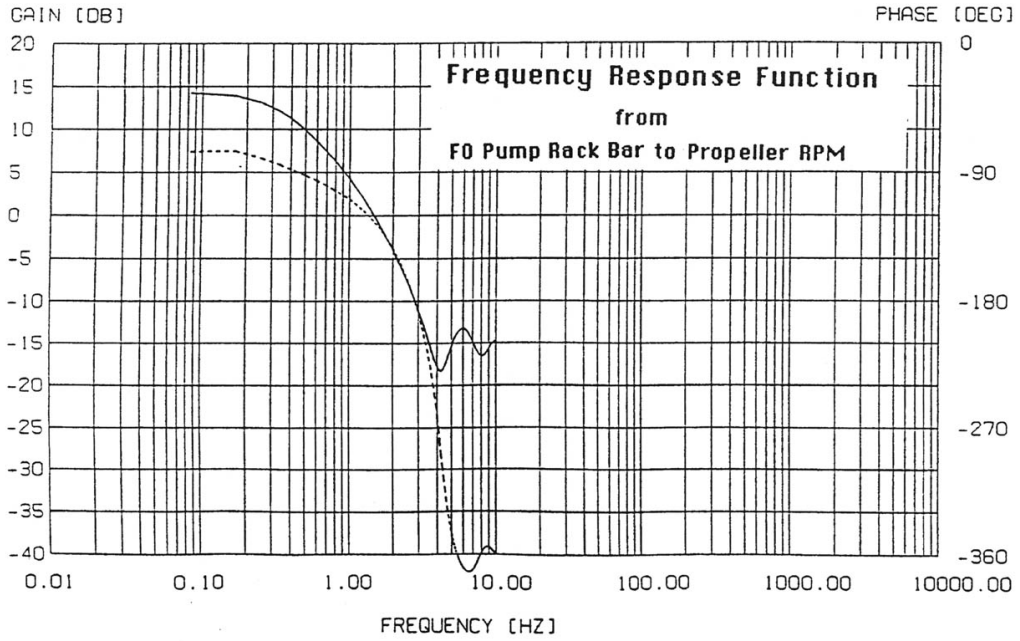


Fig.9 The Frequency Response Function from Pump Rack Bar(Governor) to Propeller RPM in an Actual Ship
(Rigid line: amplitude gain, dotted line: pahase)

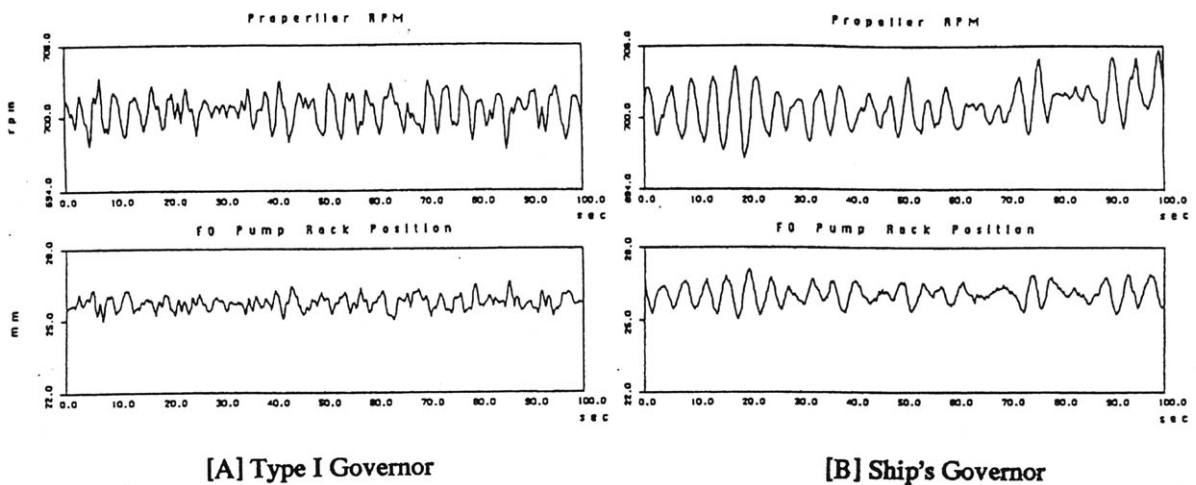


Fig.10 The Comparison of AR type of Governor (Left) and the Conventional One (Right) in an Actual Test

3 線形可変ゲイン型船用システム

3.1 研究動機

これまで述べてきたコントローラは自己帰帰型の確率モデルであった。このシステムのメリットは操縦運動の同定に際して実船データ以外何も必要としないことであった。しかし今日では、物理モデルである船舶の操縦運動モデルのデータベース化が進み、船の主要寸法が与えられればある程度の精度でモデルの微係数パラメータは推定できるようになり、MMG モデル (Mathematical Modeling Group) として結実している。

一方において、制御理論の中には発表された当時理論的には可能であるが、計算機が遅いため実行不可能な理論で使われた例の無いものがある。そのひとつが Bryson-Ho のテキスト [24] の中にある可変ゲイン線形制御理論であり、Bryson は Y.C.Ho の退職記念論文 [25] の中でこの方法の応用を薦めている。以下に述べる大津, Kvam 等 [26], 福田, 大津 [27], 榎野, 大津 [28] は、この方法を船舶の航路追従システムトなどに応用した例である。

3.2 可変ゲイン型線形制御航路追従システムの開発

船舶の航路追従システムはオートパイロットと異なり、船舶の位置を予め定めた航路に追従 (Tracking) させるシステムである。そこで、この追従系を線形理論によって構成するため船舶の操縦系を表す線形化操縦運動モデル

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (14)$$

を考える。ここで、 u は、船首角速度、船首揺れおよび船舶の位置を表す経度、緯度情報から成る状態変数である。また、 u は操作変数で、ここでは舵角量である。この系に対してコスト関数

$$J = \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} \begin{bmatrix} x^t & u^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q & 0 \\ 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ u \end{bmatrix} dt \quad (15)$$

の下でこの関数を最小にする最適則は、リッカチ方程式

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & BR^{-1}B^t \\ -Q & -A^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \lambda \end{bmatrix} \quad (16)$$

の解として、

$$u = -R^{-1}B^t \lambda \quad (17)$$

によって与えられる。ここで λ はラグランジュ変数である。このような最適制御則は現代の高速計算機では瞬時に求まることから、その解を使って時々刻々と制御則を得ることが可能である。

Fig. 11 は汐路丸においてこの方法を曲線航路追跡問題に適用した例 (榎野, 大津 [28]) で、1 船幅以内の追従性能があることが示されている。位置測定装置としては DGPS (Differential Global Positioning System) を使っている。

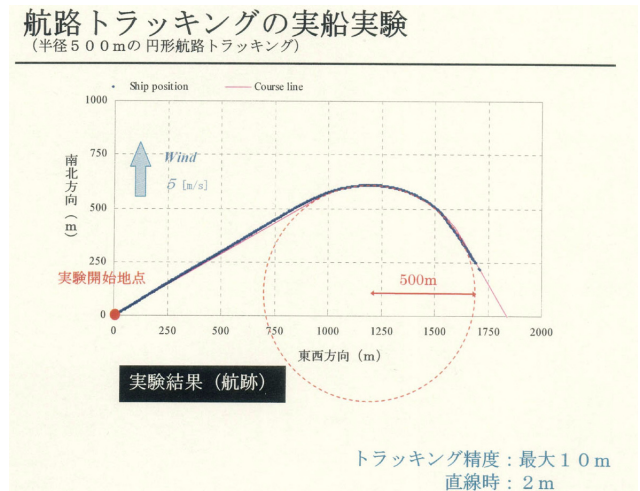


Fig.11 Ship's Tracking Tests (along the circle with 500m in radius, Shioji Maru)

4 カルマンフィルタの航海への応用

4.1 カルマンフィルタ

カルマン (R.E.Kalman) が与えたシステムの状態空間表現とカルマンフィルタ理論 (Kalman[29]) は現代制御理論の発展の原動力となった。

最近, Kitagawa[31] が自己帰帰モデルなどの時系列モデルを状態空間モデルに変換し、カルマンフィルタにより状態推定を行っている。この方法はさまざまなモデルに対して柔軟に適用可能で、今後とも地球科学や海洋学の分野において活かされるであろう。

カルマンフィルタは、システムの状態変数 $x(n)$ が状態空間表現

$$\begin{aligned} x(n+1) &= FX(n) + GW(n) \\ y(n) &= Hx(n) + V(n) \end{aligned} \quad (18)$$

で与えられるシステムの状態変数の最良推定問題の解として、観測値 $y(n)$ から、逐次推定 [Time Update]

$$\begin{aligned} x(n+1/n) &= Fx(n-1/n-1) \\ V(n/n-1) &= FV(n-1/n-1)F^t + GQG^t \\ K(n) &= V(n/n-1)H^t(HV(n/n-1)H^t + R)^{-1} \end{aligned} \quad (19)$$

[Measurement Update]

$$\begin{aligned} x(n/n) &= x(n/n-1) + K(n)(y(n) - Hx(n/n-1)) \\ V(n/n) &= (I - K(n)H)V(n/n-1) \end{aligned} \quad (20)$$

によって与えられる (Kalman[29])。ここで、 Q はシステム誤差 $W(t)$ の分散共分散行列、 R は観測誤差 $V(t)$ の分散共分散行列である。

大津, 北川 [30] は、カルマンフィルタを動揺の連続型自己帰帰モデルのパラメータの最尤法計算に使う方法を試み

た。すなわち式(2)から非線形項を除いた線形横揺方程式のパラメータ同定問題を観測値から最尤法で同定する場合に、同定されるパラメータを含む状態空間表現を作りその離散化モデルからDFP法によって数値的にパラメータをQ,Rも含め推定する際にカルマンフィルタを使用した。この問題は最近再びモンテカルロフィルタを使った方法に発展している。

4.2 船体運動の予測と船用人工水平台の開発

船体運動が自己回帰モデルで推定できるとすれば、その適切な状態空間表現によってKalman Filterを使い時系列の平滑(smoothing), ろ波(filtering), 予測(prediction)が行える。

Fig. 12は横揺運動の予測を行った例で、予測を始める時点までの550点のデータ(上図)から自己回帰モデルを最小AIC推定法で決定しその状態空間表現からカルマンフィルタによって50step(25秒)先までの予測(下図)を試みたものである。船の運動でも減衰係数の小さい横揺れの予測精度は最も高い。

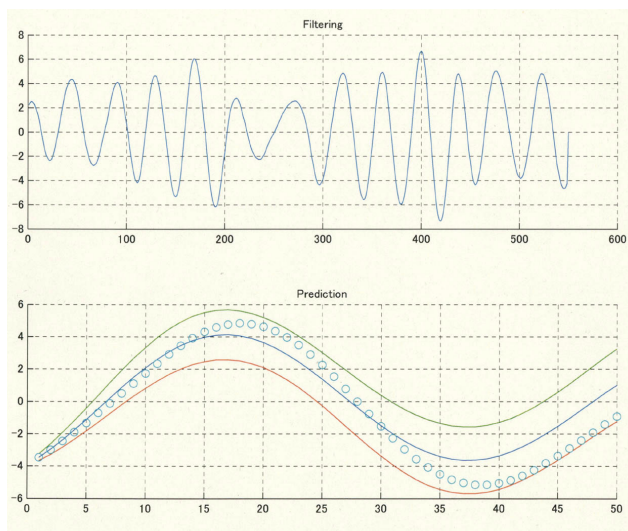


Fig.12 Prediction of Ship's Motions (Rolling)

このことを利用して最近、船体の横揺れの安定度を示す指標であるGMを航海中に推定するGMメータの開発が進んでいる。さらに横揺、縦揺、船首揺の予測をこの方法で行い、それらの信号をフィードフォワードして、動揺する船上で人工的に水平プラットフォームを作り出すFig.13のような人工水平台を開発した。このシステムはこれら3軸の角運動に対して0.2度以内の安定度が要求される衛星アンテナシステムの安定装置などに应用されている(鈴木, 大津 [32])。Fig.14はその追従性能を表す。この技術は従来のフィードバック制御に比して遅れが無い安定システムとして将来期待できよう。

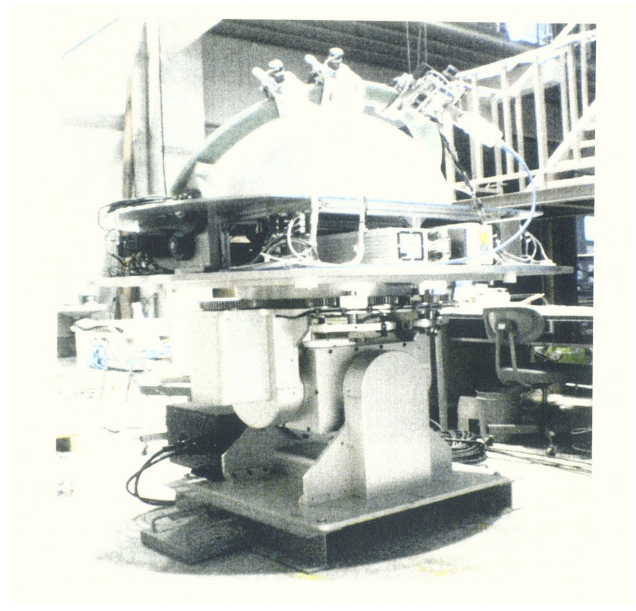


Fig.13 Ship's Satellite Tracking Antenna on the Artificial Horizontal Plate

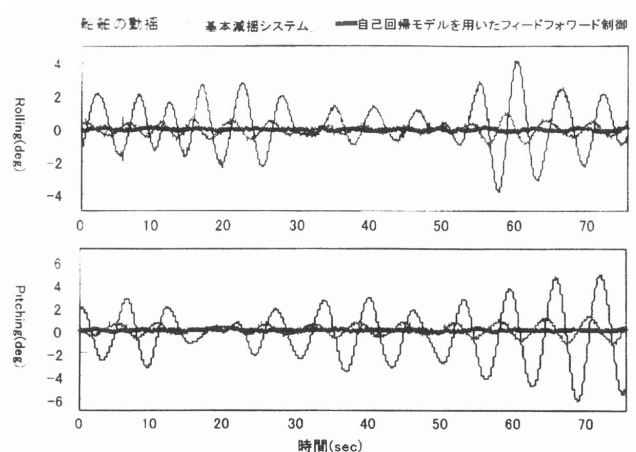


Fig.14 Performance of Cancellation of Ship's Rolling and Pitching in Actual Test

4.3 船位・定常外乱の推定

カルマンフィルタはシステム誤差や観測誤差の分散を仮定しなければならないという欠点があった、赤池AIC推定法でこの点を克服できたことにより、遷移行列を柔軟に選べばトレンドモデル、季節変動モデルなど色々なモデルを構築することができるようになった。福田, 大津等 [33]は、船位推定に通常よく使われるカルマンフィルタによる位置推定方式を改良し、海流などによってゆっくりと変動する外乱による位置の変位量をトレンドモデルでモデル化する潮流推定フィルタを提案した。Fig. 15は、汐路丸による推定結果を示す。カルマンフィルタの航海への応用は今後、避航問題、シーマージン推定問題などの解決にこれからも有効な手段となることが期待される。

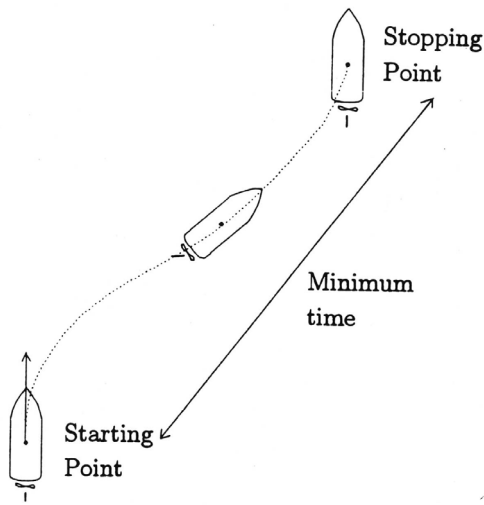


Fig.15 Concept of Ship's Minimum Time Maneuvering Problem

5 最短時間操船問題の数値解法と実船実験

5.1 研究の動機

今日我が国の造船学の1分野である操縦性に関する研究は進み、MMGモデルとして定着し、少なくとも1軸船についてはその操縦性が対象船の主要寸法を与えれば精度良く推定できるようになってきた。この結果、船舶を港内で操縦し、船舶を定点で停止させる着棧操船など極めて高度な操船問題は、これまで経験則が優先される分野であったが、数値的に「うまい操船法とは何か」を追求できるようになった。著者は、着棧問題などの操船問題を数学的に2点を最短時間で結ぶ変分法の問題として定式化し、このような最短時間制御を数値的に求める研究を1990年頃から始めた。この種の研究は航空機の制御分野では行われていたが、船舶制御の場合は非線形性が強く、実際に数値計算コードを書き実行して見ると一筋縄ではいかない問題で、「先駆者の論文に書かれてあるとおりにしないことが成功する鍵である」という逆説的教訓を得た手強い問題であった。

5.2 最短時間操船問題の定式化

うまい操船法を「ある点からある点に操縦運動モデルに従って運動する船を最短時間で遷移させること」と定義し、その操船法を次のように定式化する。

1. 評価関数：操船開始から操船終了までかかる時間の長さで評価すなわち、(0:1)区間に正規化し、

$$I = \int_{t_0}^{t_f} f(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \tau, t) = \int_0^1 \tau dt = \tau_f$$

とする

2. 微分拘束条件

$$\dot{\mathbf{x}} - \phi(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \tau, t) = 0$$

を付加し、最新のMMG型非線形操縦方程式を用いる。ここで、 \mathbf{x} は船舶の姿勢運動と位置を表す状態変数、 \mathbf{u} は舵、プロペラ、からなる操作変数である。

3. その他、終端値、初期値拘束条件、幾何学的拘束条件を加える。

このとき問題は、評価関数 I を最小とする最適制御 \mathbf{u} を求めることに帰着する。この問題は数学的には古来、変分法における2点境界値問題(Fig.15)として有名な問題のひとつである。

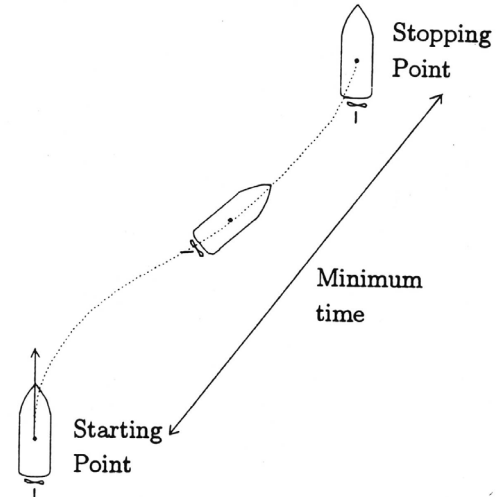


Fig.15 Concept of Ship's Minimum Time Maneuvering Problem

5.3 変分法による数値解法

正司, 大津 [35], 岡崎, 大津 [36], 大津等 [37] は、この種の問題を数値的に解く場合に最強力と言われた Wu and Miele[34]による方法(Sequential Conjugate Gradient Restoration Method)を用いて、種々の操船問題を解いている。Fig.16はその解の一つで、出発点から終端点まで、終端点を色々変えて最短時間ルートを数値的に探索した例である。Fig.17はそのうちひとつのケースを汐路丸で実験した結果である。

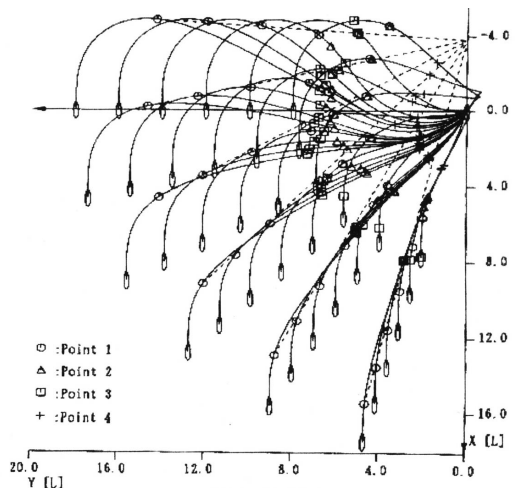


Fig.16 Numerical Results of Minimum Time Berthing Problems

6 あとがき

本論では著者の40年間の研究のあらましと展望について原論文に沿って述べた。ここで取り扱った問題を他の分野への応用のひとつとして述べたものとしては、参考文献山内監修 [38], Akaike and Kitagawa[39], 赤池, 北川 [41], 日野編 [42] に所収されているものがある。これらの文献には著者が応用した理論の, 他の分野への応用が多数含まれており参考にならう。

7 謝辞

筆者は, これまで述べてきた研究を遂行するに当たり多くの人たちのお世話になった。それらの人々とりわけ東京商船大学名誉教授故谷初蔵先生, 同岩井聡先生, 元船舶技術研究所所長山内保文博士, 元統計数理研究所所長赤池弘次博士, 同北川源四郎現所長, ルンド大学教授 K.J.Astrom博士, その他共著者として共に研究をしてくれた多くの学生諸君, 共同研究者, また多くの実船実験を行った汐路丸2世, 3世の船長はじめ乗組員の方々, そして長年著者の秘書を勤めてくれた織田美千子さんにお礼を申し上げる。

本論文で使用した図面は発表当時の論文から複写したものが多く, 必ずしも鮮明でないことをお詫びする。最後に本論文を丁寧に見ていただいた査読者にお礼を申し上げます。

参考文献

- [1] B.Kinsman: *Wind Waves*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1965.
- [2] St.Denis, M.J.Pierson, Jr.: *On the Motion of Ships in Confused Sea*, T.SNAME, Vol.61, pp.280-357, 1953.
- [3] 山内保文: 船の波浪中動揺応答の解析法について (その1), 造船協会論文集, 第109号, pp.160-183, 1961.
- [4] R.B.Blackman and J.W.Tukey: *The Measurement of Power Spectra from the Point of View of Communication Engineering*, Dover, New York, 1958.
- [5] H.Akaike: *On the Design of Lag Window for the Estimation of Spectra*, Ann.Inst.Stat.Math.Vol.14, 1962.
- [6] H.Akaike and Y.Yamanouchi: *On the Statistical Estimation of Frequency Response Function*, Ann.Inst.Stat.Math.Vol.14, pp.23-56, 1962.
- [7] K.Hasselmann, W.Munk and G.McDonalder: *Bispectra of Ocean Waves*, Proceed. of the Symposium on Time Series Analysis, John Wiley, 1963.
- [8] 山内保文, 大津皓平: 船の応答の非線形性と高次元スペクトラム, パイスpekトラムの応用, 日本造船学会論文集, 第131号, pp.115-137, 1972.
- [9] G.P.Box and G.M. Jenkins: *Time Series Analysis*, Forecasting and Control, Wiley.
- [10] 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.
- [11] H.Akaike: *A New Look at the Statistical Model Identification*, IEEE, AC.19, pp.716-723, 1974.
- [12] T.I.Fossen: *Guidance and Control of Ocean Vehicles*, John Wiley and Sons, 1994.

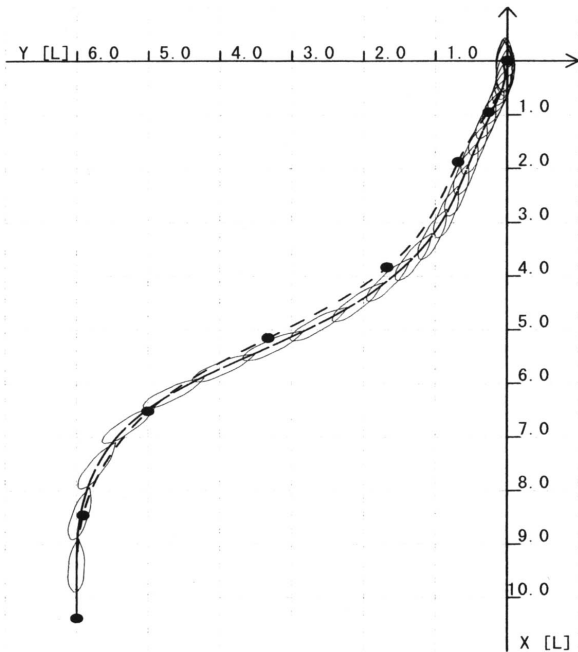


Fig.17 Actual Ship's Test for the Minimum Time Berthing

5.4 数理計画法による解法

上記の問題は変分法の問題として定式化しているが, 実は数理計画法としても定式化できる。大津 [38] では数理計画法を使ってこの問題を数値的に解いている。Fig. 18 は船舶を最短時間で元の点に180度反転して戻す場合 (いわゆる Captain Williamson's Turn) の例である。

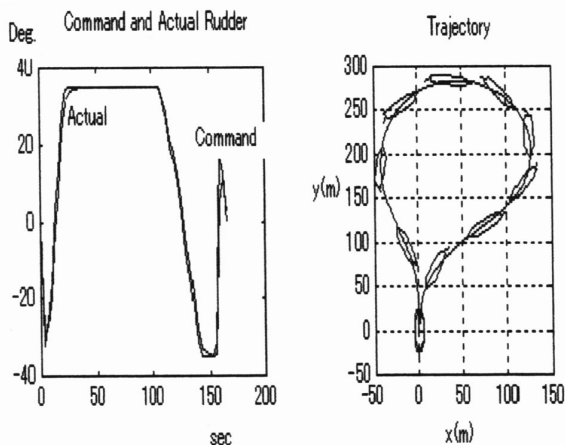


Fig.18 The Minimum Time Man over Board Maneuvering

このように2つの方法で最短時間操船解を求めたが, いずれの方法も収束計算を伴う時間のかかる方法である。それに比べベルマンの動的計画法による場合は必ず解はあるがベルマンが述べたように「次元の呪い」すなわち大容量計算を必要とする。しかし, 簡略化して探索回数を少なくできる方法によって確実に解く研究も必要である。

- [13] 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及び同(続)日本造船学会論文集, 第139号, pp.31-43, 1976, 第143号, pp.216-224.
- [14] 大津皓平: 船体運動の統計的制御に関する研究(1)及び(2), 日本造船学会論文集, 第152号, pp.216-228, 1983, 第153号, pp.19-24, 1983.
- [15] 大津皓平, 半間俊士: 自己回帰モデルによる操舵法の解析(1), 日本航海学会論文集, 第60号, pp.61-72, 1979.
- [16] K.Ohtsu, M.Horigome and G.Kitagawa: *New Ship's Autopilot Design through a Stochastic Model*, *automatica*, vol.15, No.3, pp.255-268, 1979.
- [17] 織田博行, 大津皓平他: 制御型多次元自己回帰モデルを用いた舵による横揺れ減揺制御, 関西造船協会誌, 第216号, pp.165-173, 1991.
- [18] H.Oda and K.Ohtsu: *Statistical Analysis and Design of Rudder Roll Stabilization Systems*, *Journal of Control Engineering Practice*, Vol.4.3, pp.351-358, 1996.
- [19] 中谷俊彦, 大津皓平, 堀籠教夫: 主機関の統計的解析と制御, 日本航海学会論文集, 第79号, pp.157-168, 1988.
- [20] 石塚正則, 大津皓平他: 主機関の統計的同定と最適制御に関する研究(第1報), (第2報), 日本造船学会論文集, 第170号, pp.211-220, 1991, 第171号, pp.241-250, 1992.
- [21] T.Ozaki and H.Tong: *On the Fitting of Non Stationary Autoregressive Models in Time Series Analysis*, Proc.8th Hawaii Inter.Conf. on System Science, pp. 168-178, 1978.
- [22] K.Ohtsu, M.Horigome and G.Kitagawa: *Robust Autopilot System against the Various Sea Conditions*, Symposium, ISSOA-79, pp.118-123, 1979.
- [23] J.S.Park, K.Ohtsu and G.Kitagawa: *Batch Adaptive Ship's Autopilots*, *International Journal of Adaptive Control and Signal Processings*, John Wiley and Sons, Vol.14-4, pp.427-439, 1998.
- [24] A.E.Bryson and Y.C.Ho: *Applied Optimal Control*, Hemisphere Pub.Corp, 1975.
- [25] A.E.Bryson: *Time Varying Linear Quadratic Control Theory*, *Journal of Optimization Theory and Application*, Vol.100, No.3, 1999.
- [26] 大津皓平, K.Kvam, T.I.Fossen, 福田人意: 可変ゲインによる最適操舵, 日本航海学会論文集, pp.89-94, 第104号.
- [27] 福田人意, 大津皓平: 可変ゲインによる自動着機実験に関する研究, 日本航海学会論文集, 第107号, pp.35-40, 2003.
- [28] 榎野純, 大津皓平: 可変ゲイン制御を用いた着機制御について, 関西造船協会論文集, 第240号, pp.221-225, 2003.
- [29] R.E.Kalman: *A New Approach to Linear Filtering and Prediction Problems*, *T.ASME, J.Basic Engineering, Series D*, vol.83, pp.35-45, 1961
- [30] 大津皓平, 北川源四郎: 実船データによる動揺パラメータの統計的推定 - 連続型自己回帰モデルの応用', 日本造船学会論文集, 第165号, pp.181-192, 1989.
- [31] 北川源四郎: 時系列解析入門, 岩波書店, 2005.
- [32] 鈴木雅人, 大津皓平: 動揺安定台の実用化に関する研究, 日本航海学会論文集, 第114号, pp.171-177, 2006.
- [33] 福田人意, 大津皓平他: 船位偏差推定フィルタ - ディファレンシャル GPS を用いた推定法の開発 -, 電子情報通信学会論文集 B, Vol.J84-B, No.12, pp.2220-2226, 2001.
- [34] A.K.Wu and A.Miele: *Sequential Conjugate Gradient-Restoration Algorithm for Optimal Control Problems with Non-Linear Constraints and General Boundary Conditions, Part I*, *Optimal Control Applications and Methods*, Vol.1, pp.69-88, 1980.
- [35] 正司公一, 大津皓平: 最適制御理論による操船の最適化と自動化について(第1報), (第2報), (第3報)', 日本造船学会論文集, 第172号, pp.365-374, 1992, 第173号, pp.222-229, 1993, 第174号, pp.339-344, 1993.
- [36] 岡崎忠胤, 大津皓平他: 最短時間停止操船に関する一考察, 日本造船学会論文集, 第180号, pp.223-234, 1998.
- [37] K.Ohtsu, K.Shoji and T.Okazaki: *Minimum Time Maneuvering of Ship with Wind Disturbance*, *Journal of Engineering Practice*, Vol.4.3, pp.385-392, 1996.
- [38] 大津皓平: 非線形計画法による最短時間操船の数値解法, 日本造船学会論文集, 第196号, pp.99-104, 2004.
- [39] 山内保文監修: 船舶・海洋技術者のための不規則現象論, 海文堂, 1986.
- [40] H.Akaike and G.Kitagawa ed.: *The Practice of Time Series Analysis*, Springer Verlag, 1992.
- [41] 赤池弘次, 北川源四郎監修: '時系列解析の実際1', 朝倉書店, 2004.
- [42] 日野編: スペクトラム解析ハンドブック, 第11章, 朝倉書店, 2005.

船体運動の統計的解析と制御 — 40年の研究のまとめと展望 —

大津 皓平

(東京海洋大学大学院 海洋科学技術研究科 応用環境システム学専攻)

要旨: 本論文は, 著者が1967年に東京商船大学に奉職以来の研究論文について, 年代順にその要旨を述べたものである。内容的には, 船舶の横揺れの非線形性を高次バイスペクトルで論じた論文, 船舶の操運動の自己回帰モデルを用いた統計的解析, オートパイロット制御, 舵減揺制御, 船用ガバナ制御等の確率的最適制御に関する論文, 線形可変ゲイン法を用いる船舶の最適トラッキング制御法に関する論文, 非線形最適化手法を用いる最短時間制御に関する論文などのレビューを含む。

Key words: Ship's Motion at Sea, Time Series Analysis, Bi-Spectrum, AIC, Auto Regressive Model, Ship's Autopilot, Rudder-Roll Control, Ship's Marine Governor, Ship's Variable Gain Control, Ship's Tracking, Minimum Time Maneuvering Control System.