

船の保針運動の統計的制御

統計数理研究所 北 川 源 四 郎
東京商船大学 大 津 皓 平

(1975年8月 受付)

The Statistical Control of Ship's Course Keeping Motion

Genshiro Kitagawa

(Institute of Statistical Mathematics)

Kohei Otsu

(Tokyo University of Mercantile Marine)

In ocean navigation, most ships are steered by auto-pilot systems. But the present auto-pilot systems have some shortcomings such as the hydrodynamic resistance excess and the energy loss in rudder power unit due to the frequent steering motion. In this paper, we try to solve these problems by developing an optimal rudder control with the aid of a statistically identified model of the ship.

We identified the ship's dynamics by fitting AR models to real data which were obtained from a standard container ship under her course-keeping motion by either manual or auto-pilot steering in the rough North Pacific Ocean. The parameters of the AR-model were determined by the minimum AIC (Akaike's Information Criterion) procedure.

Using the state space representation of the ship's motion which were obtained directly from the AR-model, some optimal controllers were designed. It was found by digital simulations that our controllers would considerably reduce the amount of yawing with smoother rudder motion than that of the present auto-pilot system. This suggests an innovation of auto-pilot system design.

The computations were performed by the programs of TIMSAC (Time Series Analysis and Control Program Package) and some of their revisions.

1. ま え が き

船舶は、一つの港を出港し次の仕向港に入港するまでの航海において、さまざまな環境条件の下に置かれる。しかもその環境条件の多くは、波や風などのように非常に不規則であり、またその船体に及ぼす影響は非常に大きなものである。船舶は沿岸航行においても、あるいはまた大洋航行においてもこのような環境条件の中を一定時間ある針路を定めてその針路をできるだけ保持しながら航走する。このように船が一定針路上を舵を使って航走しようとする運動を保針運動 (Course-keeping motion) と名づけている。この保針運動は、制御目標を船の針路 (Course)、制御装置を操舵装置 (Rudder unit) とする適当な Feed-back 系を構成することによって実現される。この操舵装置に操舵信号を送るのは、人間 (操舵手, Quater Master) であることもあるが、最近の大型船は多くの場合、自動操舵装置 (Auto-Pilot System) を装備しておりそれに依るのが普通である。この Auto-Pilot System による制御は、若干の非線型制御を除けば、基本的には、古典制御理論でも良く知られた P. I. D. 制御である [9], [10]。この Auto-Pilot の調整は航海中経験的に行なわれており、正確な船の動特性にもとづいて設計されているものではない。したがって、現用 Auto-Pilot System には、通例としてある種の発振的な動きがあったり、人間と較べて操舵機が忙しく動きすぎたりする欠点がある。また船の動特性は荷役等によって航海ごとに異なり、また一つの航海においても燃料消費などによって時々

刻々と、変化しているので、Auto-Pilot System を設計する立場から考えると、出来る限り少ない労力で、よく動特性の変化に適応でき、しかも保針性能の秀れた自動操舵装置の開発が望まれる。したがって、明確に記述されにくい経験的調整を要する P. I. D. 制御を根底に置いた従来の設計法にかわって、ある評価関数を決め、これを最適にするような制御（最適制御）を実現するという、より客観性のある制御方式が確立されることが望ましい。

我々は、この論文において、このような最適制御の設計を非常に柔軟に行える制御用 digital 電子計算機を船内に想定し、最適操舵を行なうことの実用性を検討した。このために、実際に就航中の船から得られた data を使って保針運動の動特性を統計的に推定（同定, Identification）し、こうして推定された動特性を使って上記のような要求を満足する一つの最適制御系を理論的に設計することを試みた。すなわち保針運動系を時系列解析における多次元自己回帰 model によって表現し（Auto-Regressive Representation）、与えられた実験 data にあてはめられる多次元自己回帰 model の次数の決定には赤池によって提案された AIC (Akaike's Information Criterion) による決定法を一貫してもちいた [1], [2], [4]。また、制御系の設計には、この自己回帰表現をいわゆる状態空間表現 (State-Space Representation) に直し、良く知られた動的計画法 (Dynamic Programming) によって最適制御則を見出す方法を採用した。このとき最適制御の評価関数は、(1) 操舵によって惹き起こされる船体運動を小さくすること、(2) 操舵機を忙しく作動させないこと等を考慮して決定した。

ここで用いた船の運動の記録は、現在就航中の標準的な高速コンテナ船が、操舵手または Auto-Pilot System によって航走中に得られた多次元時系列記録である。我々の設計した制御系を実船によって試験するまでにはいまだ至っていないが、電子計算機内に発生させた擬似白色雑音を利用して、保針運動系のモデルを作動させ、設計された制御系を評価する、いわゆるシミュレーションの技法による検討を行なった。この結果によると、(1), (2) を満たすような制御系の設計が理論的に有効であることがわかった。また制御系の設計に際し、制御変数や被制御変数の効果的な選択が必要であるが、AIC を用いて合理的にこの選択を実現することができることが明らかとなった。

最近の Auto-Pilot System による保針運動の評価方法の方向としては、従来のように定められた針路上をどの程度正確に航走し得るかということの他に、経済性をも重視する方向にある。すなわち操舵をすることによる流体抵抗の増加や、それに伴い、プロペラに回転力を与える Marine Engine の燃料消費の増加を出来るかぎり少くし、経済性の向上をはかりたいとする要求が強い [9]。我々はこの論文において、適切な評価方式の導入によって最適保針操舵を従来の Auto-Pilot System より少ない舵の動きで実現可能であることを明らかにした。この方法は上

述した経済性の実現にも役立つであろうことが予想される。また、ここで示す統計的同定と最適制御理論を使う制御方式は動特性の変化や環境の変化等に適応できる制御を行なうためにも適していると考えられる。なお、実際に船舶へ最適制御系を導入するにあたっての技術的な問題等は別の機会に発表することにした。

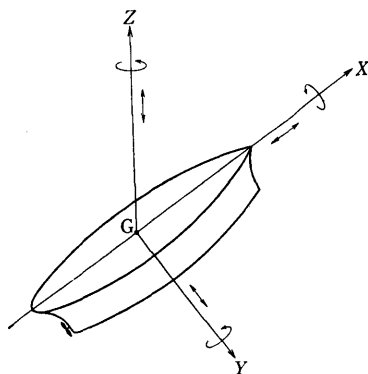


図1 座標系

2. 保針運動の feed-back 系としての解析

2-1. 船体運動の座標系

船体運動は、一般に図1のように6自由度の運動をしている。ここで取り扱う制御問題は、船体運動の船体内部からの制御に関する問題であるから、船舶運動

表 1

	並進運動	回転運動
X 軸	Surging	Rolling
Y 軸	Swaying	Pitching
Z 軸	Heaving	Yawing

表 2

運 動	測 定 場 所	測 定 結 果	確 率 変 数
Pitching	ブリッジ	ジャイロ式動揺計	x_1
Rolling	ブリッジ	ジャイロ式動揺計	x_2
Yawing	ブリッジ	ジャイロレビータ	x_3
Yacc	船 首	加 速 度 計	x_4
Rudder Angle	船尾舵頭機	ポテンシオメータ	x_5
Zacc	ブリッジ	加 速 度 計	x_6

力学でよく使われる船体重心 G を中心とする動座標系 (Axis fixed in the ship) を採用する。(図 1) 各軸に沿っての並進運動, 回転運動には, それぞれ表 1 のような船舶独特の名称がつけられている。表 2 に我々が以後問題とする運動とその測定場所およびそれ等を確率変数として表現するときの記号などを示す。ここで Yacc は横加速度 (Lateral Acceleration) を表わし, 船首部 (Fore Peak, F.P.) における y 軸方向の変位加速度である。また, Zacc は船橋で測定した z 軸上下方向の変位加速度である。

2-2. 保針運動系の同定と Power spectrum

保針運動はいうまでもなく典型的な feed-back 系で, model 化すると図 2 のように表現することができる。ここで制御装置としては人間が操舵する場合 (Manual Steering) と Auto-Pilot 操舵による場合 (Auto-Pilot Steering) が考えられる。系に入ってくる外乱 U, V としては風, 波や機械的雑音が考えられるが, 直接測定は不可能である。図 2 で二重線は, vector を示している。これは Yawing だけを

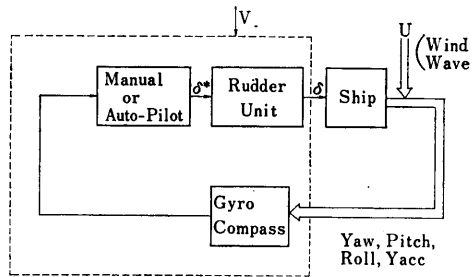


図 2

出力 (被制御変数) とするのではなく, $x_1 \sim x_4$ の信号すべてを出力と考えることを表わしている。これに対して入力 (制御変数) は, 指令舵角 δ^* ではなく実際に舵とり機でとられた実舵角 $\delta = x_5$ のみである。このように被制御変数を多くとった理由は, 舵の動きが必ずしも Yawing ばかりでなく, 他の船体運動にも影響を与えたり, またその影響を受けたりしているのではないかと考えたからである。

2-3. 保針運動系の自己回帰表現

保針運動中の制御系を確率過程としてとらえて同定を試みたいいくつかの論文の中で Åström の解析 [6] が良く知られているが, ここでは最近, 赤池によって提唱され有益な成果を上げつつある AIC (Akaike's Information Criterion) を利用して, 自己回帰表現 (Auto-Regressive Representation) による保針運動系の同定と解析を試みる [2], [4]。

ここで我々が考える制御系の model は次の様なものである。

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m) X(n-m) + U(n) \quad (2-3-1)$$

ただし $X(n)$ は時刻 n における Yawing, Rudder angle 等を表わす k 次元の vector, $U(n)$ はこれらの変数に加わる $X(n), \dots, X(n-M)$ と無相関な外乱で図3の U, V に対応する k 次元 vector, $A(m)$ は $k \times k$ 行列である. M は一般には無限大とすべきものであるが, 有限個の data から係数行列 $A(m)$ を推定しようとするときには有限の値を想定しなくては意味のある結果が得られない. 赤池はこの M の決定法として AIC と呼ばれる評価基準

$$\text{AIC}(M:k) = N \log \|d_M\| + 2k^2M \quad (2-3-2)$$

を次数 M を上げながら逐次計算し, この評価基準を最小とする M を model の次数として採用する方法を提唱している. ここで k は制御系の次元, N は標本数であり, d_M は noise (innovation) 項の共分散行列のある推定値, $\|d_M\|$ はその行列式の値である. このときの係数行列 $A(m)$ は Yule-Walker の関係式の解として与えられる.

時間領域でこの様に時系列の予測式が求められれば, これによって決定される共分散関数の Fourier 変換として power spectrum が得られる. すなわち noise の共分散行列を S とするとき, spectral density matrix $P(f) = (p_{ij}(f))$ は,

$$P(f) = A(f)^{-1} S A(f)^{* -1} \quad (2-3-3)$$

によって与えられる. ただし $A(f) = \sum_{m=0}^M A(m) \exp(-i2\pi fm)$, $A(0) = -I$ であり, A^* は A の共役転置行列を表わす. $P_{ij}(f)$ は $X(n)$ の第 i 成分と第 j 成分の間の cross spectral density である.

Cross-spectrum を利用する周波数 応答関数の推定や3章で利用する雑音寄与率の計算の様な解析は入力 $X(n)$ と雑音 $U(n)$ の無相関性が基本的な条件であるので, Auto-Pilot によって制御される場合の様な feed-back system では $U(n)$ が white noise でないかぎり直接意味のある結果は得られない. しかし各変数の雑音 $U_i(n), U_j(n) (i \neq j)$ が無相関と見なせる場合には雑音 $U(n)$ の白色化によって解析が可能となる[1].

Feed-back system のひとつの表現

$$x_i(n) = \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^{\infty} a_{ij}(m) x_j(n-m) + u_i(n) \quad (i = 1, \dots, k) \quad (2-3-4)$$

を考える. $\{a_{ij}(m)\}$ は入力 $x_j(n)$ に対する $x_i(n)$ の impulse 応答関数であり, $x_i(n)$ の変動のうち他の変数 $x_j(n) (j \neq i)$ からの影響として表現できない部分が $u_i(n)$ として表現されているものとする. したがって以下では $a_{ii}(m) = 0$ と仮定する. また各変数に加わる noise の無相関性 $E u_i u_j = 0 (i \neq j)$ が基本的な仮定となる.

この feed-back system から得られた data に対して前述の方法によって多次元自己回帰 model

$$x_i(n) = \sum_{j=1}^k \sum_{m=1}^M A_{ij}(m) x_j(n-m) + \varepsilon_i(n) \quad (2-3-5)$$

があてはめられたとする. ただしこの場合には $\varepsilon_i(n)$ は $E \varepsilon_i \varepsilon_j = 0 (i \neq j)$ をみたす white noise である. この時, 次の様にして system の特性と雑音源の特性を同時に確定できる. すなわち

$$u_i(n) = \sum_{m=1}^M A_{ii}(m) u_i(n-m) + \varepsilon_i(m) \quad (2-3-6)$$

によって雑音 $U_i(n)$ の自己回帰表現が得られ, また $A_{ij} = 0 (m > M)$ と定義するとき

$$a_{ij}(1) = A_{ij}(1)$$

$$a_{ij}(m) = A_{ij}(m) + \sum_{l=1}^{m-1} A_{ii}(l) a_{ij}(m-l) \quad (m = 2, 3, \dots) \quad (2-3-7)$$

によって impulse 応答関数の推定値が求まる。したがって u_i の power spectral density function および x_j から x_i への周波数応答関数はそれぞれ

$$p_{u_i}(f) = \frac{d_i^2}{|1 - \sum A_{ii}(m) \exp(2\pi imf)|^2} \quad (2-3-8)$$

$$a_{ij}(f) = \sum_{m=1}^M a_{ij}(m) \exp(-i2\pi fm)$$

で与えられる。ただし d_i^2 は $\varepsilon_i(u)$ の二乗平均値の推定値である。

x_i から x_j への閉 loop の周波数応答関数を $b_{ij}(f)$ とすると

$$p_{ij}(f) = \sum_{j=1}^k |b_{ij}(f)|^2 p_{u_j}(f) \quad (2-3-9)$$

となる。ただし $b_{ij}(f)$ は $B(f) = (b_{ij}(f))$, $A(f) = (a_{ij}(f))$ とするとき

$$B(f) = (I - A(f))^{-1} \quad (2-3-10)$$

として与えられる。したがって

$$q_{ij}(f) = |b_{ij}(f)|^2 p_{u_j}(f) \quad (2-3-11)$$

とおくと

$$r_{ij}(f) = \frac{q_{ij}(f)}{p_{ij}(f)} \quad (2-3-12)$$

は周波数 f において x_i の power spectrum の中で占める雑音 u_j からの寄与を表わす。この雑音寄与率 (Noise Contribution) を使った feed-back system の解析の一例が [5] の 4 章に見られる。

3. 実船記録の解析

Spectrum 解析の実用的方法が確立されるに期を同じくして、造船学においても、実船実験による船体運動の解析などに、統計的方法が用いられるようになった。ここでは 2 章の同定法を用いて得られる行列 A を使用し、実船実験 data から船体の主として横運動の spectrum, 雑音寄与率などを求めた結果を示す。供試船は、現在の標準的コンテナ船で、大阪商船三井船舶の北米航路就航中のアメリカ丸であり、その主要寸法は表 3 の通りである。北太平洋で行なわれた実船実験の中から、実験番号 6 (T.No. 6), 実験番号 10 (T.No. 10) を選び、解析を行なった。T.No. 6 は人間が操舵している場合 (Manual Steering), T.No. 10 は Auto-Pilot によって操舵している場合 (Auto-Pilot Steering) であり当時の気象、海象を表 4 に示す。sampling 周期は、いずれも 1 秒、標本数は 896 点である。表 2 の測定項目の中から Pitch,

表 3 Principal Dimension of America Maru

Displacement	16404. 77 tons
Length	175m
Breadth	25m
Draft (Full)	9. 5m

表 4

	T. No. 6	T. No. 10	
Wind Force	8	6	
Wave Scale	8	6	
Swell Scale	6	5	
Direction	-Wind	W	SW
	-Wave	S	SW
	-Swell	S	SSW
Rel. Direction	Stb'd Quat.	Stb'd Fore	
Ship's Speed	10 Kt	21 Kt	
Course	130 Deg.	70 Deg.	

Roll, Yaw, Rudder を確率変数として採用した。したがってこの場合 4 次元自己回帰 model を適用したことになる。表 5 には T. No. 6a, 表 6 には T. No. 10 の AIC の変化を示しており、これらの表から、T. No. 6 では次数として 9 を、T. No. 10 では 12 を採用すべきことがわかる。この程度の data 数に対して、他の解析においても 5~15 位の次数が得られている。

図 3 に T. No. 6 の auto-spectrum を、また図 4 には T. No. 10 の auto-spectrum を Roll,

表 5 T. No. 6 の AIC の変化

Order	AIC	Order	AIC
0	0.66787 D04	11	-0.39192 D04
1	-0.45941 D03	12	-0.39155 D04
2	-0.33955 D04	13	-0.39002 D04
3	-0.36839 D04	14	-0.38799 D04
4	-0.37211 D04	15	-0.38658 D04
5	-0.38493 D04	16	-0.38630 D04
6	-0.39130 D04	17	-0.38517 D04
7	-0.39168 D04	18	-0.38383 D04
8	-0.39184 D04	19	-0.38333 D04
9	-0.39250 D04	20	-0.38173 D04
10	-0.39239 D04		

表 6 T. No. 10 の AIC の変化

Order	AIC	Order	AIC
0	0.28122 D04	11	-0.36438 D04
1	-0.25614 D04	12	-0.36597 D04
2	-0.30925 D04	13	-0.36589 D04
3	-0.33946 D04	14	-0.36584 D04
4	-0.35454 D04	15	-0.36556 D04
5	-0.36033 D04	16	-0.36349 D04
6	-0.35984 D04	17	-0.36337 D04
7	-0.36004 D04	18	-0.36282 D04
8	-0.36378 D04	19	-0.36125 D04
9	-0.36311 D04	20	-0.36047 D04
10	-0.36456 D04		

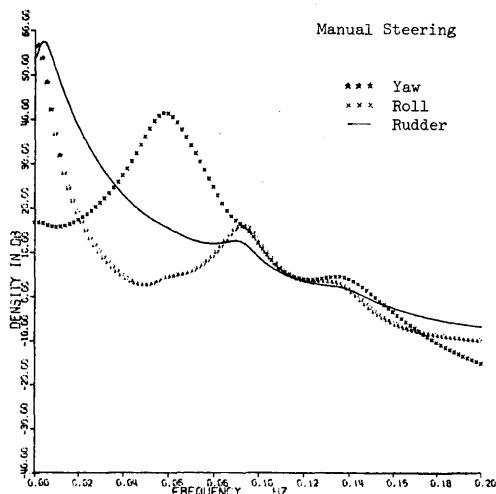


図3 Power Spectrum (AMERICA MARU T.No.6...Manual Steering)

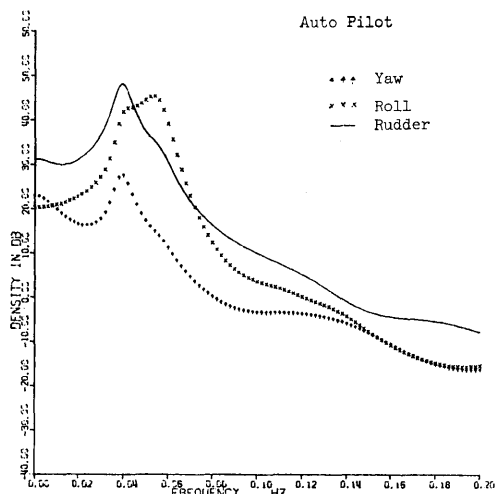


図4 Power Spectrum (AMERICA MARU T.No.10...Auto-Pilot)

Yaw, Rudder について示す。(Power spectrum はすべて decibel 単位である。) 両図を比較すると, Roll については peak を示す周波数は大体同じであり, この周波数は Roll の強い固有周波数と考えられるが, T.No.10 にはその他に, 0.04~0.05Hz に鞍部が見られる。その位置は丁度 Yaw や Rudder の Peak の位置とも合っている。このことは後の雑音寄与率の所で検討する。

次に Yaw, Rudder の動きについて, 手動の場合と Auto-Pilot の場合を比較すると, Yaw, Rudder が手動の場合, 長周期側に peak をもっていることが特徴的である。逆に Auto-Pilot は, 長周期の操舵もあるが, より高周波 (0.04Hz 付近) の所にその主な peak を持っている。このことが現用の Auto-Pilot の動きの忙しさを如実に表わしている。

以下の議論では各変数のノイズが無相関であることが基本的な仮定であるが, これらの相関が比較的小さいと見なせることから, 雑音寄与率は有効な情報を与えるものと考えられる。図5-(A), 図5-(B)には T.No.6 について Yaw (図5-(A)), Rudder (図5-(B)) への他の運動からの雑音寄与率が, また図6-(A), 図6-(B)には, T.No.10 について同じ組み合わせで示されている。図5-(A)と図6-(A)の舵から Yaw への寄与をみると, 手動操舵のように舵は長周期でとった方が効果的であることがわかる。

それに引き換え, T.No.10 のように周期の速い操舵は, ほとんど効果が表われていない。そうすると, T.No.10 における 0.04Hz 付近の Yaw と Rudder の Peak の一致は, 少なくとも Rudder によって直接引き起こされたと考えべきではない。そこで Rudder に対する雑音寄与率 (図6-(B)) を調べてみると, T.No.10 において, Yaw から長周期側でも影響を受けているが, 0.04Hz 付近にもう一つ peak があり, Rudder は Yaw の 0.04Hz 付近の周波数をもった運動を忠実に追っていることとなる。この Yaw の運動は, 選択された変数が上述した4つに限るとすれば, 自分自身からの寄与, すなわち独立性の強い運動と云える。そして, その動きに対して, いわゆる比例操舵などを行っていると考えられる。逆に図5-(B)を見ると人間による操舵法は非常に長周期な Yaw に対する応答であることがわかる。

図7には, T.No.10 における Yaw から Roll への雑音寄与率を示している。この図から見るように 0.04Hz~0.05Hz 付近に山が存在し, Yaw が Roll を伴っていることを示している。

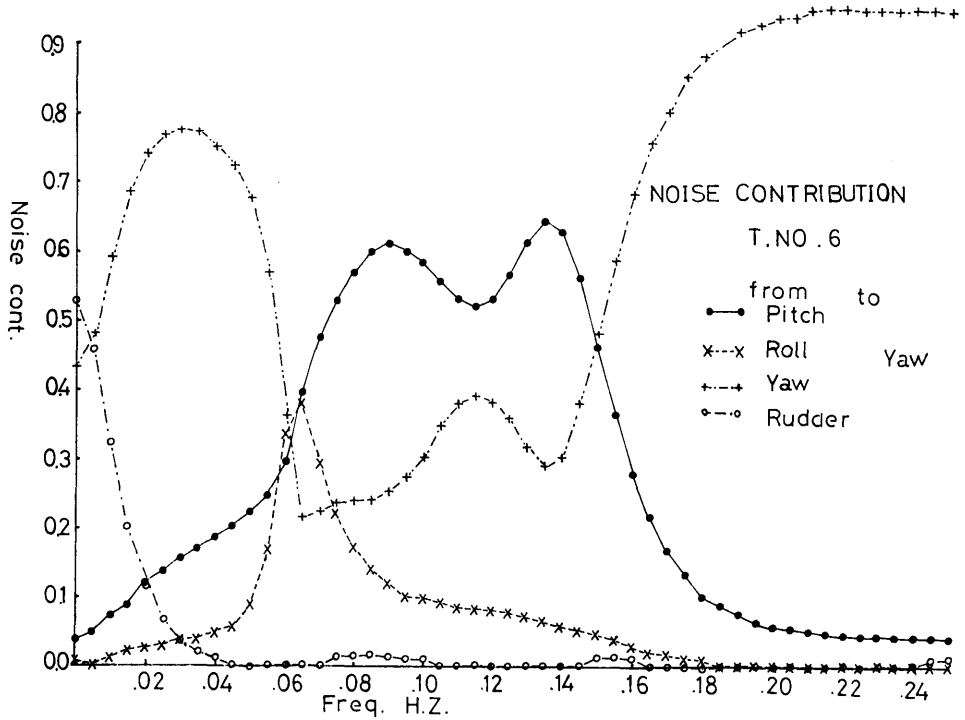


図 5-(A)

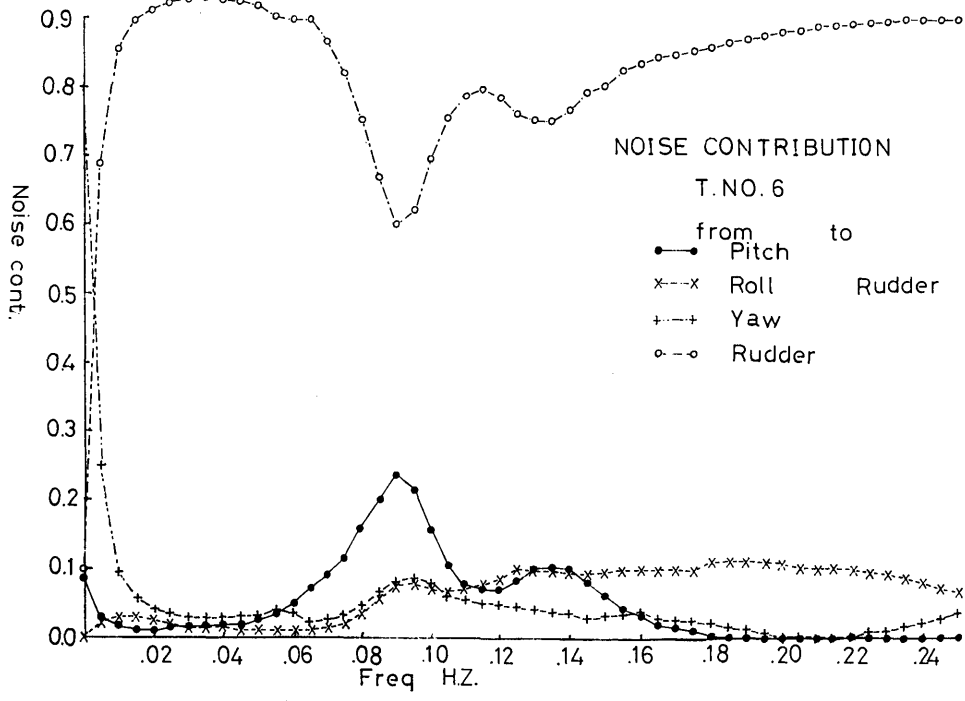


図 5-(B)

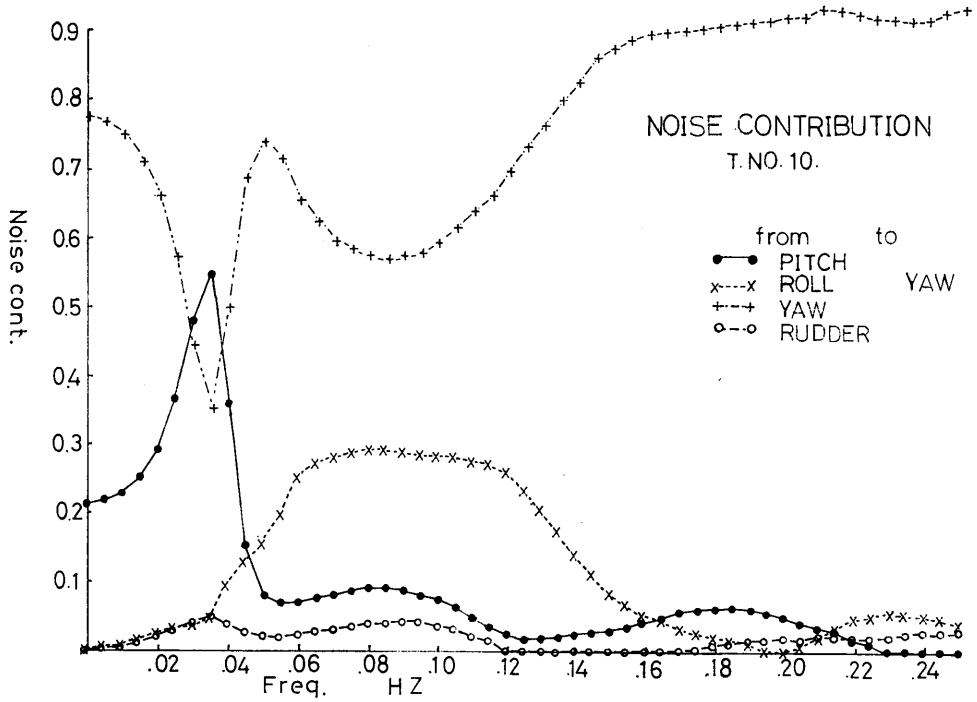


図 6-(A)

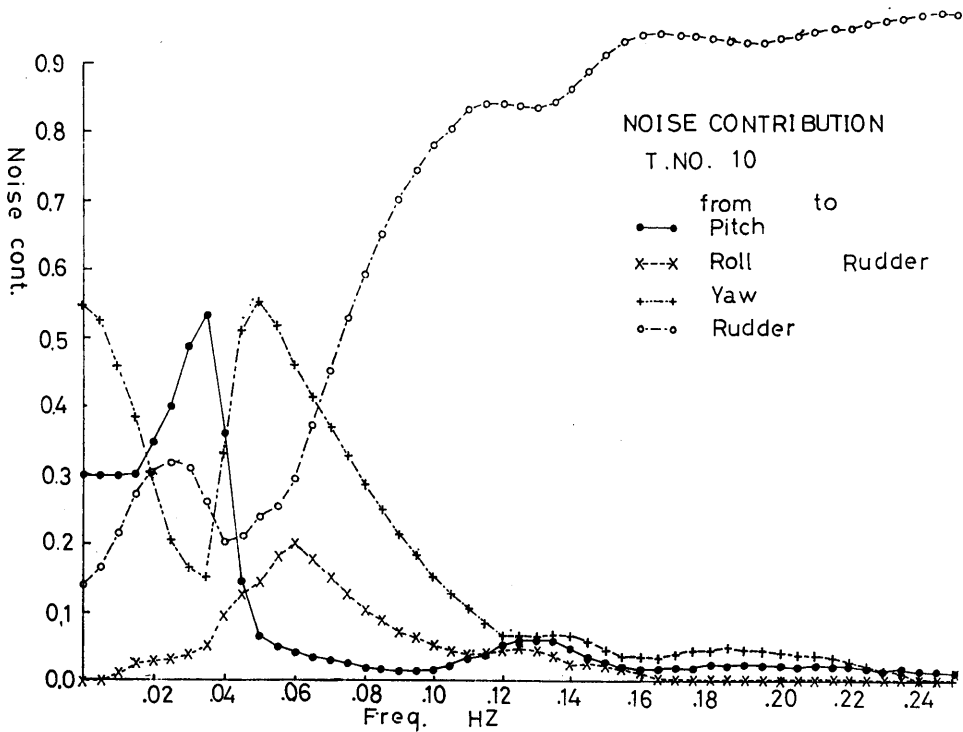


図 6-(B)

NOISE CONTRIBUTION

T.NO.10

from Yaw to Roll

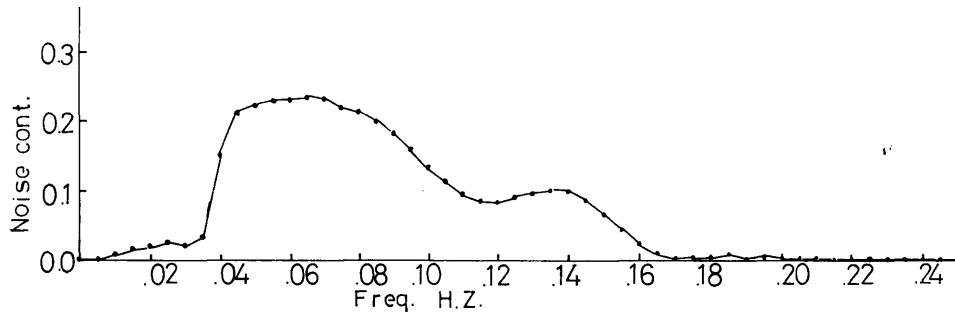


図 7

前述した spectrum 上の T.No.10 の Roll の鞍部は、このように Yaw に伴って起こる動揺から生ずる考えられる。操舵をすれば、それに伴う抵抗増加 (Resistance excess) が生ずる。現用 Auto-pilot は以上述べたようになりにかなりひんぱんに舵を取り、このことが舵取機に負荷をかけたりますと共に、操舵による流体抵抗を増加させている。以上のことを取り除くには、現用 Auto-pilot に考慮されていない最小の労力による保針運動の実現という考え方が必要であり、次章以下においては、その可能性を検討することとする。

4. 自己回帰表現を用いる統計的最適制御系の設計

本章では、以上で示した時系列の自己回帰表現を用いて、保針運動の最適制御問題を考察する。

一つの system に最適制御理論を適用するためには前提として

- i) 制御対象を表現する数学的 model の確立
- ii) 制御量に関する制約条件の設定
- iii) 制御の結果を判定するための評価関数の設定

が必要である。本章では、まず我々の考察している船の保針運動において、上記の三項目に対してどのような取り扱いを行ったかを示し、次にその最適制御問題に対する最適解を与える。

4-1. 制御のための Dynamic model

制御のための model を作るにあたって主要な問題点は、

- i) どの変数を我々の model に採用するか
- ii) 採用した変数に対して、どのような方法で model を作るか

の二点である。本節では、model に採用する変数が適当に選択されたものと仮定して、我々の model を作る方法を述べる。変数の選択に関しては、次章で議論する。

k 次元定常時系列 $\begin{pmatrix} x_1(n) \\ \vdots \\ x_k(n) \end{pmatrix}$ のうち、 r 次元 vector $X(n) \equiv \begin{pmatrix} x_1(n) \\ \vdots \\ x_r(n) \end{pmatrix}$ は被制御変数 (出力)、

l 次元 vector $Y(n) \equiv \begin{pmatrix} x_{r+1}(n) \\ \vdots \\ x_k(n) \end{pmatrix} \equiv \begin{pmatrix} y_1(n) \\ \vdots \\ y_l(n) \end{pmatrix}$ は操作変数 (入力) を表わすものとする. このとき時系列 $X(n)$ の自己回帰表現

$$X(n) = \sum_{m=1}^M A(m) X(n-m) + \sum_{m=1}^M B(m) Y(n-m) + U(n) \quad (4-1-1)$$

を求める. ただし $U(n)$ は $X(k)$ および $Y(k)$, ($k=n-1, n-2, \dots$) と無相関な white noise とする. この自己回帰表現の決定は AIC [4] を利用して自動的に行なうことができる. すなわち data 個数を N とするとき,

$$\text{AIC}(M; r, l) = N \log \| \hat{d}_{r, M} \| + 2r(r+l)M \quad (4-1-2)$$

を最小にする M を AR model の次数とし, 行列 $A(m)$ および $B(m)$ は最小二乗法で決定する. ただし $\hat{d}_{r, M}$ は innovation の共分散行列 d_M の左上隅の $r \times r$ 小行列である. このとき

$$Z_l(n) = \sum_{m=1}^{M-l} A(l+m) X(n-m) + \sum_{m=1}^{M-l} B(l+m) Y(n-m) \quad (4-1-3)$$

$(l = 0, 1, \dots, M-1)$

において状態変数 $Z(n)$ を

$$Z(n) \equiv \begin{pmatrix} Z_0(n) \\ \vdots \\ Z_{M-1}(n) \end{pmatrix}$$

と定義すると, 我々の求める model は次の様に表現される.

$$\begin{cases} Z(n) = \Phi Z(n-1) + \Gamma Y(n-1) + W(n) \\ X(n) = HZ(n) \end{cases} \quad (4-1-4)$$

ただし,

$$\Phi = \begin{pmatrix} A(1) & I & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ A(M-1) & 0 & \dots & I \\ A(M) & 0 & \dots & 0 \end{pmatrix} \quad \Gamma = \begin{pmatrix} B(1) \\ \vdots \\ B(M) \end{pmatrix} \quad W(n) = \begin{pmatrix} U(n) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$H = (I, 0, \dots, 0) \quad (4-1-5)$$

4-2. 評価関数の設定

本節では, 前節で与えられた制御系に対する制御結果の評価方法を与える. 我々の採用した評価関数は次の様な二次形式である.

$$J_N = E \left[\sum_{n=1}^N \{ X_n^t Q X_n + Y_{n-1}^t R Y_{n-1} + (Y_{n-1} - Y_{n-2})^t T (Y_{n-1} - Y_{n-2}) \} \right] \quad (4-2-1)$$

ここで行列 Q, R および T はそれぞれ状態, 制御量, 制御の変動量を抑えるための重み係数である. また N は我々が各時点において N steps 先までを考慮してその中で最適な制御を求めようとしている事を示す. 本稿においては, この様に制御量および制御量の差分の二次形式を評価関数に入れる事によってこれらの量を抑える様にし, 制御量に関する制約条件を explicit には表現していない. この方法の利点は数学的に容易に最適制御量を決定できる事にあるが, 同時に十分に実用的な制御となることが次章の simulation の結果によって示される. 評価関数の重み係数の選択方法についても次章で述べる.

4-3. 最適制御

前節で与えた線形二次形式の最適制御問題は D. P. (Dynamic Programming) によって解くことができる. まず, 評価関数 (4-2-1) を次の様に変形する.

$$J_N = E \left[\sum_{n=1}^N \left\{ (Z_n^t, Y_{n-1}^t) \begin{pmatrix} S & P \\ P^t & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_n \\ Y_{n-1} \end{pmatrix} + (Y_{n-1} - Y_{n-2})^t T (Y_{n-1} - Y_{n-2}) \right\} \right] \quad (4-3-1)$$

ここで S は $rM \times rM$ 行列, P は $l \times rM$ 行列であり,

$$S = \begin{array}{c} \begin{array}{|c|c|} \hline Q & 0 \\ \hline 0 & 0 \\ \hline \end{array} \\ \begin{array}{l} \left. \begin{array}{l} \uparrow \\ \downarrow \end{array} \right\} r \\ \left. \begin{array}{l} \leftarrow \\ \rightarrow \end{array} \right\} rM \\ \left. \begin{array}{l} \uparrow \\ \downarrow \end{array} \right\} rM \end{array} \end{array} \quad P = \begin{array}{c} \begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \\ \begin{array}{l} \leftarrow l \\ \left. \begin{array}{l} \uparrow \\ \downarrow \end{array} \right\} rM \end{array} \end{array}$$

とおくと (4-3-1) は (4-2-1) と同じものとなる. ここで $f_n(Z)$ ($n=1, \dots, N$) を次の様に定義する.

$$f_n(Z) = \min_{\substack{Y_{n-1}, \dots, Y_{N-1} \\ Z_{n-1}=Z}} E \left[\sum_{l=n}^N \left\{ (Z_l^t, Y_{l-1}^t) \begin{pmatrix} S & P \\ P^t & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_l \\ Y_{l-1} \end{pmatrix} + (Y_{l-1} - Y_{l-2})^t T (Y_{l-1} - Y_{l-2}) \right\} \right] \quad (4-3-2)$$

最適性の原理によれば,

$$f_n(Z) = \min_{\substack{Y_{n-1} \\ Z_{n-1}=Z}} E \left[(Z_n^t, Y_{n-1}^t) \begin{pmatrix} S & P \\ P^t & R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_n \\ Y_{n-1} \end{pmatrix} + (Y_{n-1} - Y_{n-2})^t T (Y_{n-1} - Y_{n-2}) + f_{n+1}(Z_n) \right] \quad (4-3-3)$$

が成立し, さらに次の式が成り立つことがわかる.

$$f_n(Z) = \min_{\substack{Y_{n-1} \\ Z_{n-1}=Z}} E \left[(Z_n^t, Y_{n-1}^t) \begin{pmatrix} S_n & P_n \\ P_n^t & R_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} Z_n \\ Y_{n-1} \end{pmatrix} + (Y_{n-1} - Y_{n-2})^t T (Y_{n-1} - Y_{n-2}) \right] \quad (4-3-4)$$

ただし, S_n, P_n, R_n はそれぞれ次の式で与えられるものである.

$$\begin{aligned} S_n &= Q + \Phi^t \{ S_{n+1} - (S_{n+1}^t \Gamma + P_{n+1}) (\Gamma^t S_{n+1} \Gamma + P_{n+1}^t \Gamma + \Gamma^t P_{n+1} + R_{n+1} + T)^{-1} (\Gamma^t S_{n+1} + P_{n+1}^t) \} \Phi \\ R_n &= R + T - T^t (\Gamma^t S_{n+1} \Gamma + P_{n+1}^t \Gamma + \Gamma^t P_{n+1} + R_{n+1} + T)^{-1} T \\ P_n &= P + \Phi^t (S_{n+1}^t \Gamma + P_{n+1}) (\Gamma^t S_{n+1} \Gamma + P_{n+1}^t \Gamma + \Gamma^t P_{n+1} + R_{n+1} + T)^{-1} T \\ & \quad (n = N-1, \dots, 1) \end{aligned} \quad (4-3-5)$$

$$\begin{aligned} S_N &= S \\ R_N &= R \\ P_N &= P \end{aligned}$$

結局, 最適制御 Y_n^* ($n=1, \dots, N-1$) は状態 Z_n および一時点前における制御量 Y_{n-1} の線形結合

$$Y_n^* = G_n Z_n + H_n Y_{n-1} \quad (4-3-6)$$

によって与えられる. ただし, G_n, H_n は次の式をみたすものである.

$$\begin{aligned} G_n &= -(\Gamma^t S_n \Gamma + P_n^t \Gamma + \Gamma^t P_n + R_n + T)^{-1} (\Gamma^t S_n + P_n^t) \Phi \\ H_n &= (\Gamma^t S_n \Gamma + P_n^t \Gamma + \Gamma^t P_n + R_n + T)^{-1} T \end{aligned} \quad (4-3-7)$$

以後、我々は常に $Y^* = G_1 Z + H_1 Y$ を制御として用いることにする。それは各時刻において常に N 時間先までを予測して最適な制御を行なうことを意味する。特に T を零行列とすると、普通の feedback control となるが、行列 T を適当に選択することによって、十分に滑らかな操舵によって制御をかけることができ、より実用的なものとなる。この新しい制御方式を実現するために、TIMSAC program OPTDES [5] の改良を行った。

4-4. 変数選択

アメリカ丸の最適操舵系の設計のために、手動操舵された T.No. 6 の data を利用して同定 (model の決定) を行った。また現用の Auto-pilot との比較のために Auto-pilot によって自動操舵された T.No. 10 の data を利用した。これらの data から我々の model に採用する変数を選択するにあたって、

- i) model (4-1-4) において被制御変数の noise と操作変数の noise の独立性が仮定されていること。
- ii) model あてはめの際の推定精度

の二点に注意する。換言すれば、重要な被制御変数の見落としのないようにすると同時に、必要以上に多くの変数を採用して推定の精度を低下させる事のない様に留意する必要がある。一般に、この状態変数の選択は、system の理論的解析にもとづいて行なわれるべきであろうが、我々は限られた data にもとづいて system 全体としての予測誤差を最小にするように model を決定するという立場から、この相反する二つの要求を調和させるために以下に示すように AIC を利用した。FPEC を利用した同様の議論が赤池 [3] にみられる。

k 次元の変数 $\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_k \end{pmatrix}$ のうち、我々の model において $\begin{pmatrix} x_{i_1} \\ \vdots \\ x_{i_k} \end{pmatrix}$ を被制御変数、 $x_{i_{r+1}}$ を操作変数 (舵角) とし、 $\begin{pmatrix} x_{i_{r+2}} \\ \vdots \\ x_{i_k} \end{pmatrix}$ は考慮に入れないものとする。これは $\begin{pmatrix} x_{i_1} \\ \vdots \\ x_{i_{r+1}} \end{pmatrix}$ と $\begin{pmatrix} x_{i_{r+2}} \\ \vdots \\ x_{i_k} \end{pmatrix}$ が独立であると思なす事に相当し、このとき system 全体としての AIC は

$$AIC(i_1, \dots, i_r) = \min_M AIC_1(M; i_1, \dots, i_r; i_{r+1}) + \min_M AIC_2(M; i_{r+1}) + \min_M AIC_2(M; i_{r+2}, \dots, i_k) \tag{4-4-1}$$

表 7 制御系に採用する変数と AIC の値

Output	Input	AIC ₁	AIC ₂	AIC ₁ +AIC ₂
$P, R, Y, Y_{acc}, Z_{acc}$	R_u	0.32111 D5	0	0.32111 D5
P, R, Y, Y_{acc}	R_u	0.24233 D5	0.78764 D4	0.32109 D5
P, R, Y	R_u	0.19012 D5	0.13813 D5	0.32825 D5
R, Y, Y_{acc}	R_u	0.18033 D5	0.14549 D5	0.32582 D5
R, Y	R_u	0.12742 D5	0.20334 D5	0.33076 D5
Y	R_u	0.63124 D4	0.26732 D5	0.33044 D5

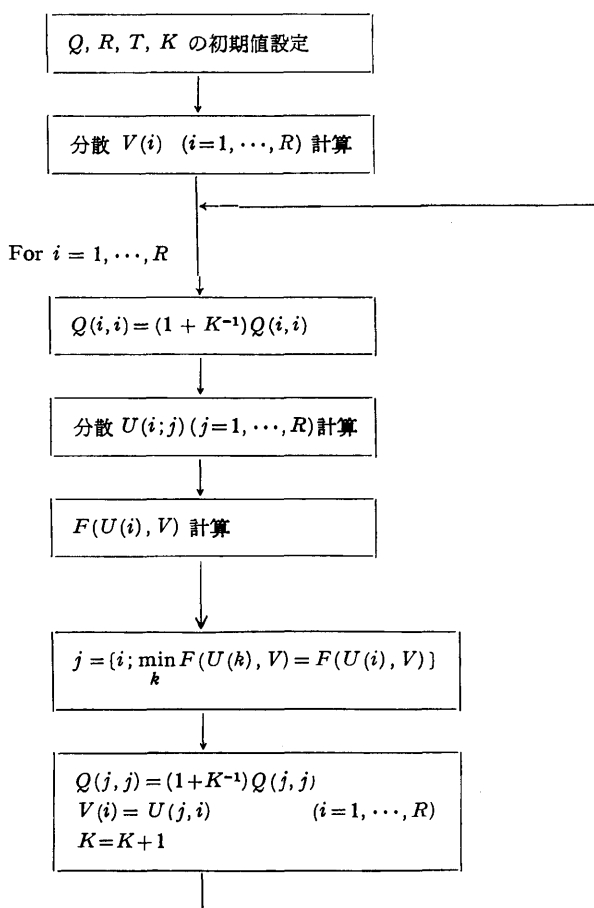
と和の形で表わされる。ただし AIC₁ は (4-1-2) で与えられた i_1, \dots, i_r を被制御変数 i_{r+1} を操作変数とするもの、AIC₂ は (2-3-2) で与えられるものである。この AIC を最小にする suffices の組 (i_1, \dots, i_r) によって我々の model に採用する被制御変数が決定される。表 7 によれば (Pitch, Roll, Yaw, Yacc) の組が最小の AIC を実現するが、これは 3 章の解析の段階において Zacc を独立な white noise に近いものと見なして除外した判断と一致する。以上の様にして選択された Pitch, Roll, Yaw, Yacc を被制御変数、Rudder を操作変数とする 4-出力、

1-入力系に対して TIMSAC program FPEC によって order 13 の AR-model が採用された。

4-5. 評価関数の重み係数の選択

評価関数の重み係数の選択にあたっては、以下に示す方法によって比較的良い結果を自動的に達成できる。簡単のために T は零行列であるとする。

- i) 行列 Q, R および整数 K の初期値を設定する。例えば、 Q として行列 $d_{r,M}$ の対角要素の逆数からなる対角行列、 R として制御量の許容限度の逆数からなる対角行列をとればよい。([5] の3章)
- ii) 行列 Q の対角成分 $Q(i, i)$ を順番に一つだけ $1+K^{-1}$ 倍し、その結果の状態変数の分散を比較し、一番効果的な方向 j を決定する。
- iii) $Q(j, j) \equiv (1+K^{-1})Q(j, j)$ と置きなおし K を適当に増加させる。(たとえば、 $K \equiv K+1$ とする。)



$F(U; V)$ の例

$$F(U(i, 1), \dots, U(i, R); V(1), \dots, V(R)) \equiv \sum_{j=1}^R f(U(i, j); V(j))$$

ただし

$$f(x; y) = \begin{cases} x^{-1}y - 1 & y \geq x \\ -xy^{-1} + 1 & y < x \end{cases}$$

以下 ii), iii) を適当な回数繰り返す。ただし各分散の計算の段階では制御量の分散 D が、条件 $C_1 \leq D \leq C_2$ を満たす様に R を適当に選択して normalize する。また C_1, C_2 は手動操舵を参考にして決定した。(図 8 を参考)

4.6. 数値列の記述

上記の方法および経験的に決定したいくつかの評価関数の組に対しての最適制御系を設計した。我々は、これらの制御系の効果を Rolling, Yawing 等の動揺をその分散値で判断することにするが、これらを求めるには理論的に期待値を計算する方法と simulation による方法の二つが考えられる。被制御変数の動揺の期待値を理論的に求めるためにはまず $E Z_n^i Z_n^i$ を求める必要がある。簡単のために $H=0$ の場合を考えることにすると、(4-1-4) および (4-3-1) から

$$\begin{aligned} Z_n &= \Phi Z_{n-1} + \Gamma Y_{n-1} + W_n \\ &= (\Phi + \Gamma G) Z_{n-1} + W_n \\ &= F Z_{n-1} + W_n \end{aligned} \tag{4-6-1}$$

したがって、

$$Z_n Z_n^i = (F Z_{n-1} + W_n) (F Z_{n-1} + W_n)^i \tag{4-6-2}$$

であるから、両辺の平均値をとると W_n と Z_{n-1} は独立であることから、

$$E Z_n Z_n^i = F (E Z_{n-1} Z_{n-1}^i) F^i + E W_n W_n^i \tag{4-6-3}$$

となる。 Z_n は定常過程であるから $E Z_n Z_n^i = P$ とおくと、

$$P = F P F^i + S \tag{4-6-4}$$

となり、この方程式の解が求める数値を与える。ただし

$$S = E W_n W_n^i = \begin{array}{|c|c|} \hline d_{r,M} & \\ \hline & 0 \\ \hline \end{array}$$

である。

表 8-1 は理論式による数値と simulation による数値の比較である。(1) は方程式 (4-6-4) の解を固有値計算に使われる QR-algorithm を利用して求めたものである。一方 (2) は TIMSAC, ÖPISIM と同様にして 1000 Steps の simulation を 10 回繰り返して得た結果である。

表 8-1 理論値と simulation による値の比較 ($Q=(2, 7, 35, 1), R=0.85$ の場合)

	Pitch	Roll	Yaw	Y_{acc}
(1) 理論値	1.755	4.509	1.624	0.0066
(2) simulation	1.726	4.575	1.709	0.0063

表 8-2 最適制御系と人間による操舵の比較 (simulation の平均, $T=0$)

Q	R	Pitch	Roll	Yaw	Y_{acc}	Rudder	Difference
(1) (2, 7, 35, 1)	0.85	1.726	4.575	1.709	0.0063	18.72	4.546
(2) (3.6, 7, 40, 1.67)	1.015	1.444	4.915	1.674	0.0062	19.12	5.052
(3) (0.6, 33, 57, 8, 0)	0.86	2.242	4.473	1.672	0.0068	18.66	4.031
(4) MANUAL (simulation)		2.718	7.082	8.261	0.0090	19.72	0.961
(5) MANUAL (data)		2.771	6.557	7.781	0.0088	17.62	0.832

表 8-3 最適制御系と人間による操舵の比較 (simulation の標準偏差)

Q	R	Pitch	Roll	Yaw	Y_{acc}	Rudder	Diff.
(1) (2, 7, 35, 1)	0.85	0.184	0.370	0.256	0.44D-3	2.517	0.385
(2) (3.6, 7, 40, 1.67)	1.015	0.158	0.412	0.259	0.41D-3	2.561	0.489
(3) (0.6, 33, 57, 8, 0)	0.86	0.245	0.352	0.226	0.51D-3	2.656	0.479
(4) MANUAL		0.358	0.847	2.737	0.42D-3	3.683	0.034

Simulation は高次元の場合の計算や船体運動を見る時に適当であり、理論式は正確な数値を求めたり、適当な評価関数の選択の場合に有効である。

表 8-2 および表 8-3 は人間による操舵と最適制御系による操舵を比較したものであり、いくつかの評価関数の例が示してある。

表 8-2 は 10 回の simulation の平均値であり、表 8-3 はその標準偏差である。評価関数と

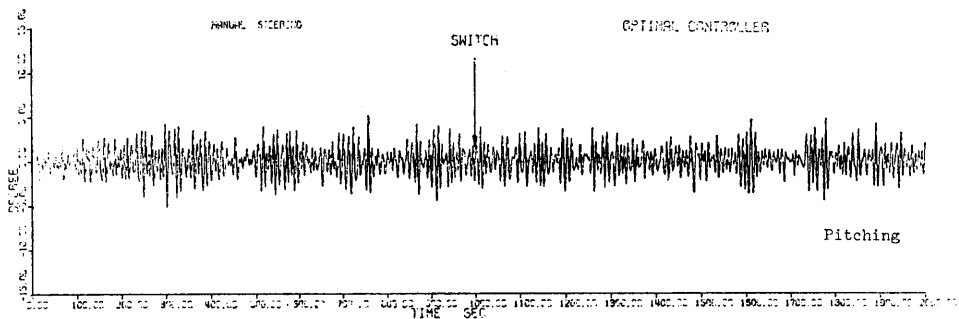


図 9-1

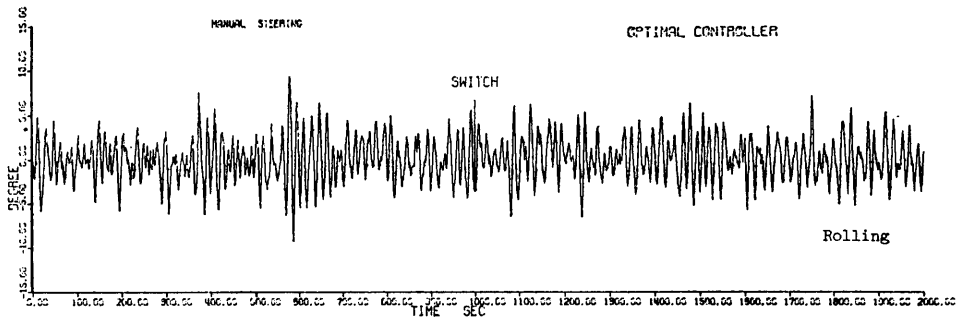


図 9-2

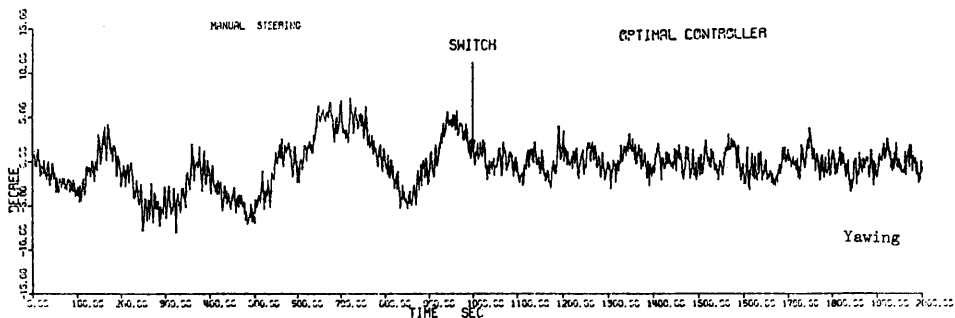


図 9-3

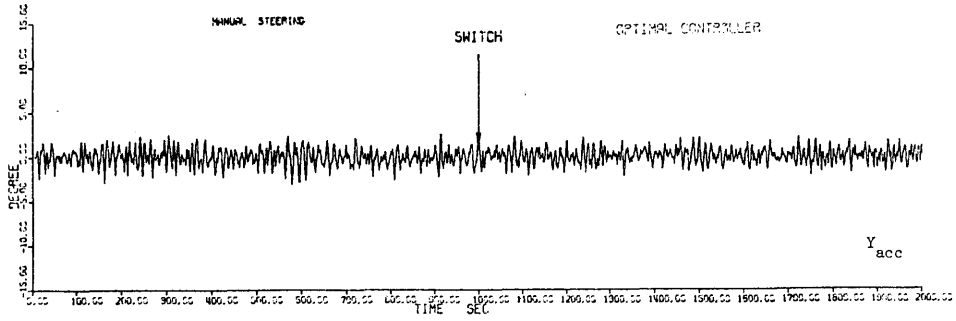


図 9-4

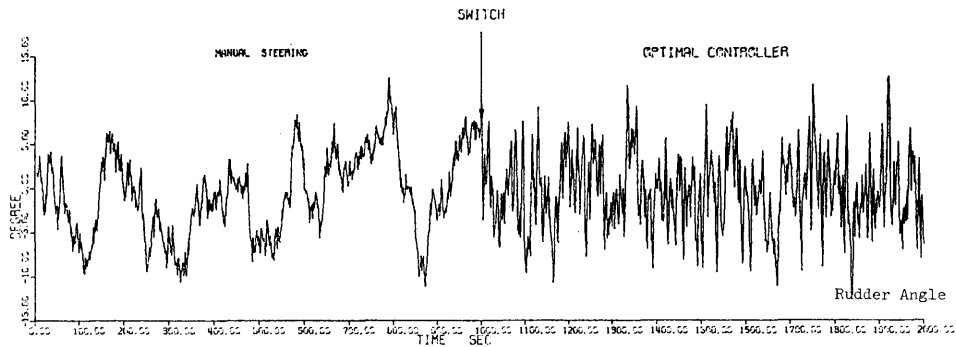


図 9-5

図 9 人間による操舵と最適制御系 ($Q=(2, 7, 35, 1)$ $R=0.85$ $T=0$) による操舵

しては $Q(i, j)=0 (i \neq j)$ の場合だけを示すので表には対角成分 $Q(i, i)$ だけを表示する。また操作変数は一次元であるので R および T は scalar となる。(1) は simulation を繰り返して経験的に選択した係数の一例である。(2) は (1) を初期値として前記の逐次近似的方法によって自動的に選択したものがある。また (3) は制御の目標を Rolling と Yawing に限定し、 $Q(1, 1)=Q(4, 4)=0$ とおいてその後自動的に決定したものである。一方 (4) は 3 章で同定した AR-model

表 9-1 操舵の平滑化とその影響 (平均値)

Q	R	T	Pitch	Roll	Yaw	Y_{acc}	Rudder	Difference
(2, 7, 35, 1)	0.85	0	1.726	4.575	1.709	0.0063	18.723	4.546
(2, 7, 35, 1)	2	2	2.087	5.126	2.050	0.0066	8.672	1.012
(2, 7, 35, 1)	5	3	2.291	5.643	2.821	0.0071	3.986	0.312
(2, 7, 35, 1)	10	10	2.447	6.002	4.342	0.0074	2.087	0.079
MANUAL			2.718	7.082	8.261	0.0090	19.715	0.961

表 9-2 操舵の平滑化とその影響 (標準偏差)

Q	R	T	Pitch	Roll	Yaw	Y_{acc}	Rudder	Diff.
(2, 7, 35, 1)	0.85	0	0.184	0.370	0.256	0.44D-3	2.517	0.385
(2, 7, 35, 1)	2	2	0.228	0.462	0.338	0.50D-3	1.508	0.095
(2, 7, 35, 1)	5	3	0.256	0.577	0.523	0.55D-3	0.756	0.030
(2, 7, 35, 1)	10	10	0.277	0.666	1.125	0.83D-3	0.550	0.008
MANUAL			0.357	0.835	2.663	0.41D-3	3.635	0.034

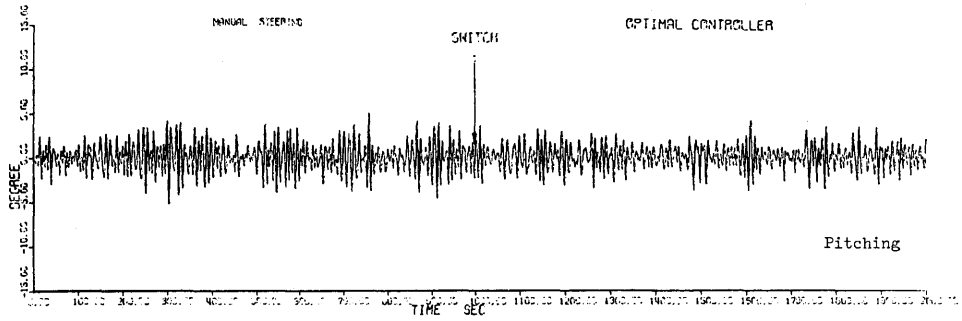


図 10-1

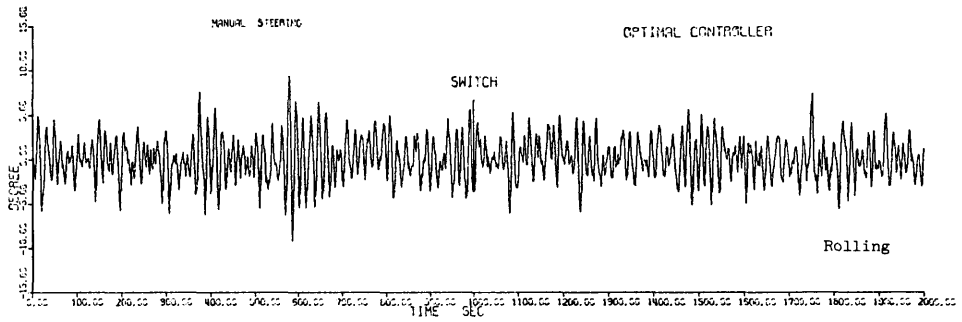


図 10-2

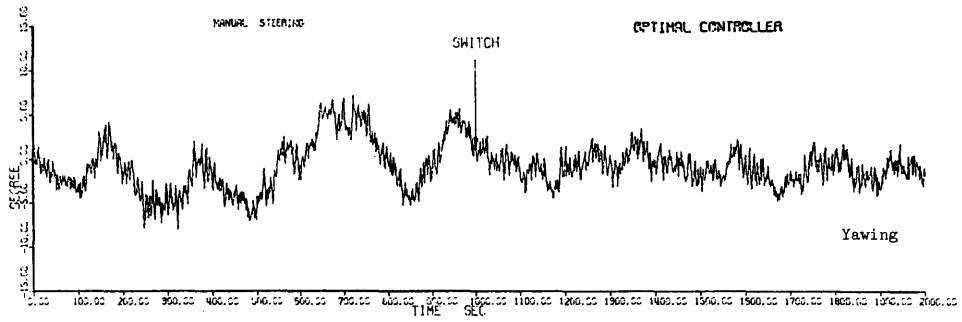


図 10-3

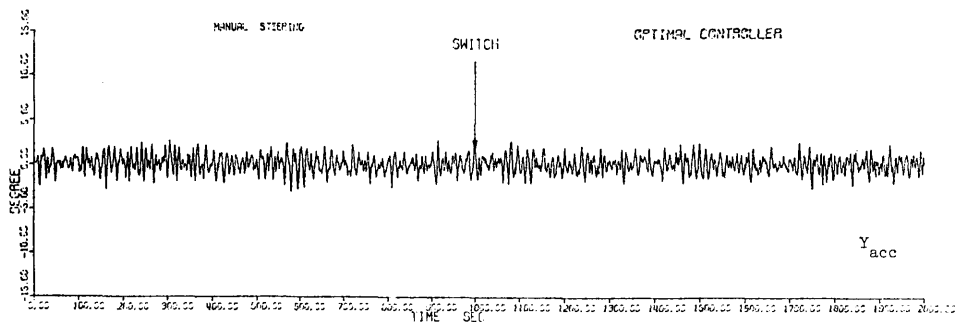


図 10-4

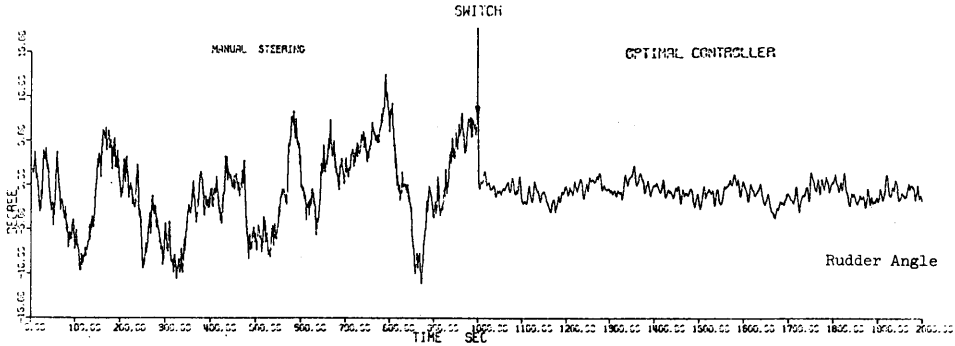


図 10 人間による操舵と最適制御系 ($Q=(2, 7, 35, 1)$, $R=5$, $T=3$) による操舵

を利用して手動操舵を simulation によって再現したものである。また (5) は, T. No. 6 の data から直接計算したものである。図 9 はこの simulation の一例を記録したもので左半分は人間によって操舵された場合, 右半分が最適制御系によって操舵された場合である。

以上は係数 T を 0 とした場合であるが, T に適当な値を与えて操舵の滑らかさも考慮した制御を試みたものが, 表 9-1, 表 9-2 および図 10 である。図 11 は最適制御系によって操舵された場合の power spectrum である。

一方 T. No. 10 の data を利用して現用の Auto-Pilot system との比較を行ったもの

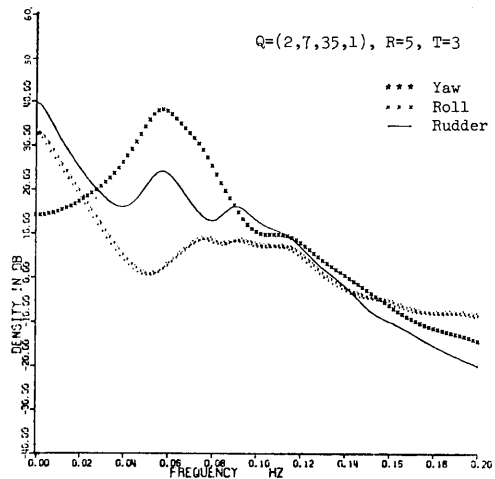


Fig. 11 Power Spectrum (T. No. 6... Optimal Controller)

表 10-1 最適制御系と Auto Pilot との比較 (simulation の平均値)

Q	R	T	Pitch	Roll	Yaw	Rudder	Difference
(2, 30, 30)	1	0	0.533	2.634	1.081	10.406	2.533
(2, 30, 30)	1	2	0.549	2.710	1.081	8.730	1.379
(2, 30, 30)	3	5	0.583	3.032	1.089	4.525	0.621
(2, 30, 30)	10	10	0.635	3.682	1.114	1.422	0.187
Auto Pilot (simulation)			1.040	9.160	1.502	10.119	1.273
Auto Pilot (data)			0.999	9.284	1.552	10.425	1.167

表 10-2 最適制御系と Auto Pilot との比較 (simulation の標準差)

Q	R	T	Pitch	Roll	Yaw	Rudder	Diff.
(2, 30, 30)	1	0	0.054	0.191	0.118	0.823	0.140
(2, 30, 30)	1	2	0.055	0.179	0.115	0.770	0.090
(2, 30, 30)	3	5	0.056	0.238	0.103	0.466	0.052
(2, 30, 30)	10	10	0.059	0.368	0.091	0.175	0.019
Auto Pilot (simulation)			0.132	0.944	0.168	1.766	0.114

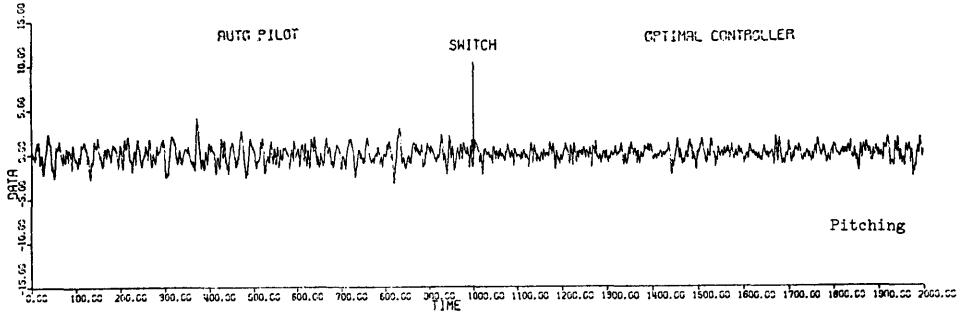


図 12-1-1

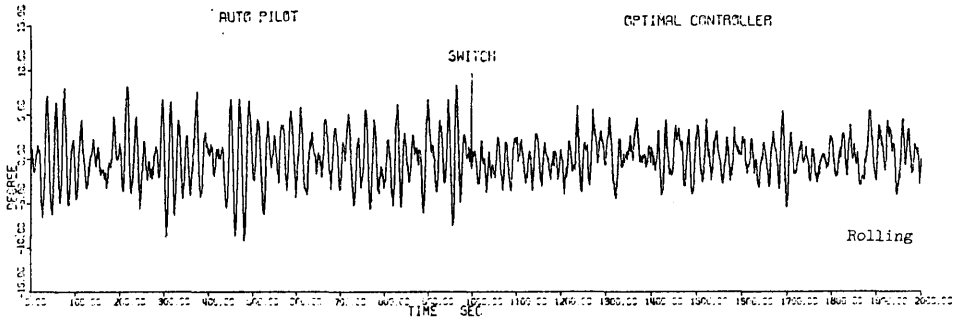


図 12-1-2

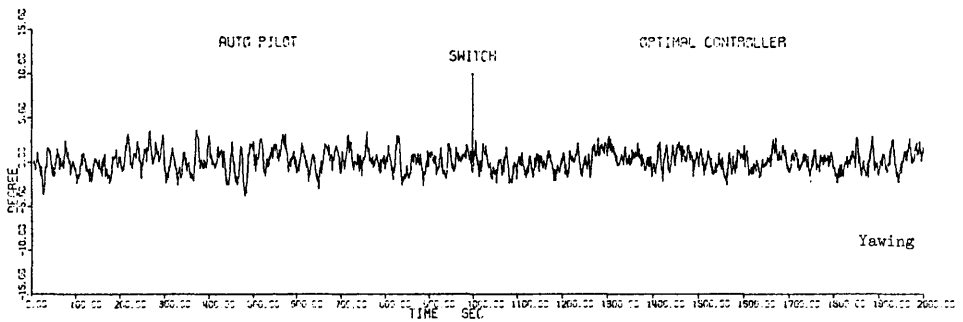


図 12-1-3

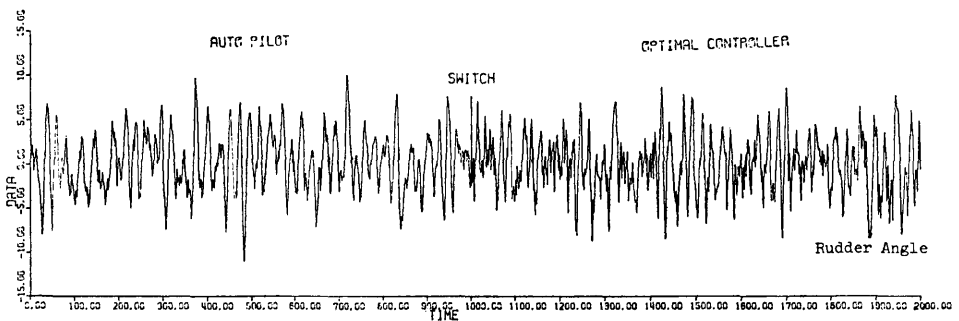


図 12-1-4

図 12-1 Auto Pilot による操舵と最適制御系 ($Q=(2, 30, 30)$, $R=1$, $T=0$) による操舵

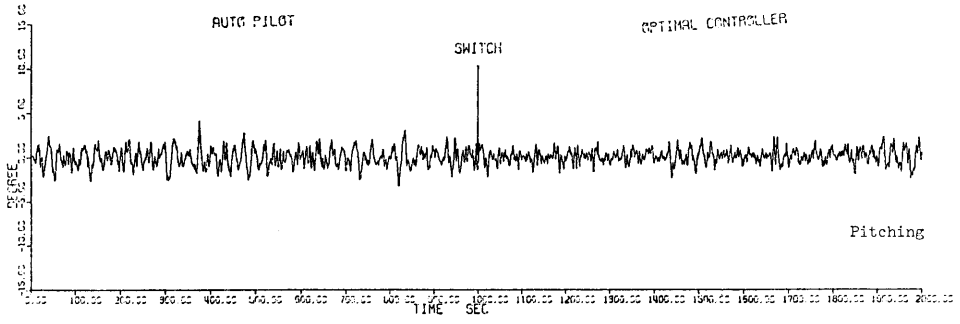


図 12-2-1

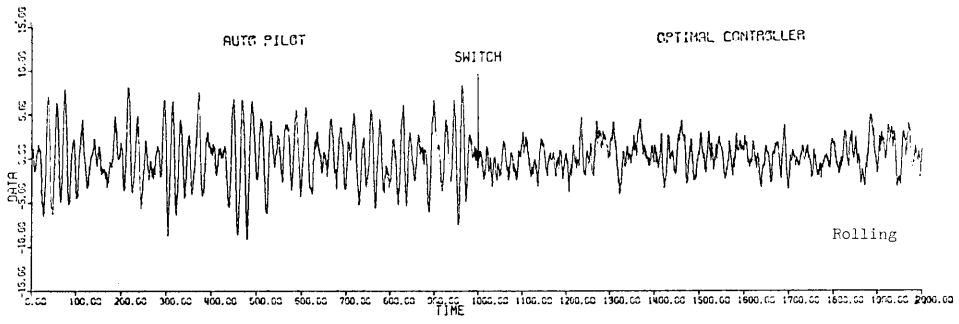


図 12-2-2

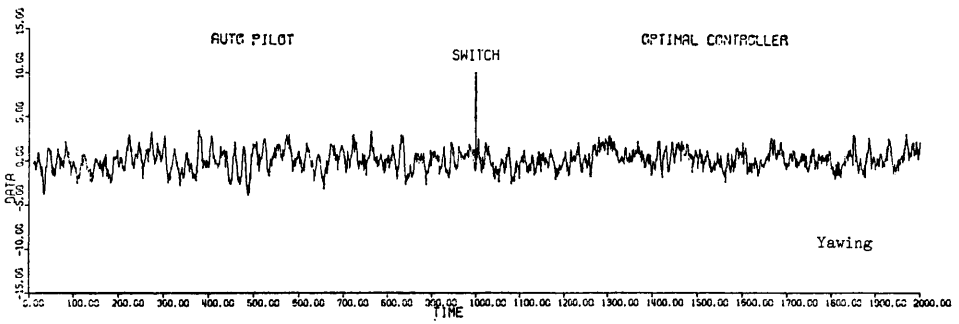


図 12-2-3

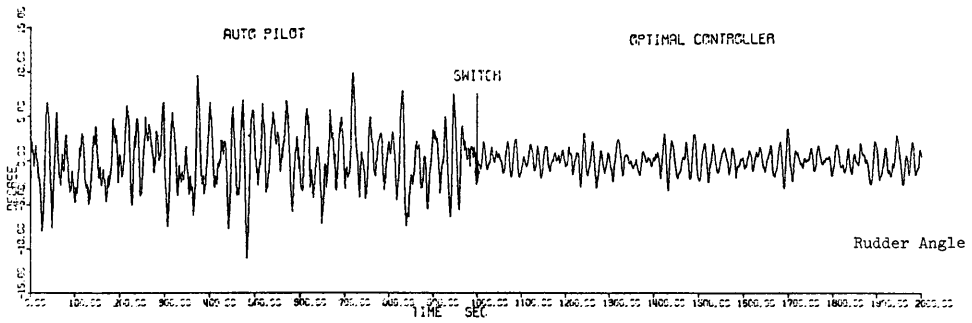


図 12-2-4

図 12-2 Auto Pilot による操舵と最適制御系 $(Q = (2, 30, 30), R = 10, T = 10)$ による操舵

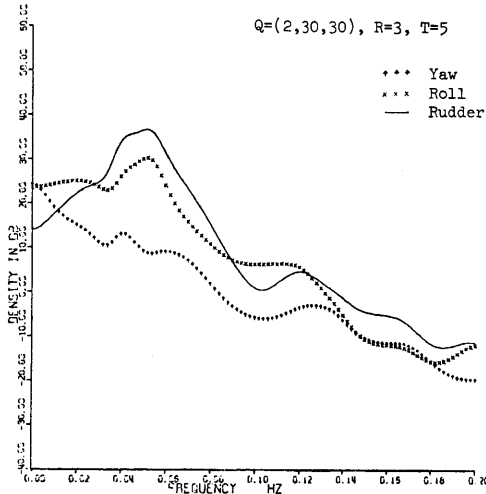


Fig. 13-1 Power Spectrum (T.No.10... Optimal Controller)

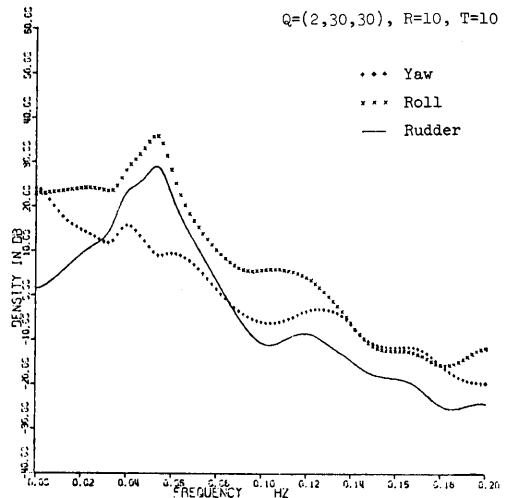


Fig. 13-2 Power Spectrum (T.No.10... Optimal Controller)

が表 10-1, 10-2, 図 12, 13 である。

4-7. 数値例の検討

まず、表 8-1 から理論式による数値と simulation によって得た数値とがかなり良く一致することがわかる。これは simulation によって得られる結果を正当づけるものである。simulation の結果によって、次の様な事が明らかとなった。

- (1) 最適制御系による操舵を行なえば、人間による操舵と比較して Yawing の量をその分散のみでみて $1/4 \sim 1/5$ 程度にできる可能性がある。(表 8-2, 図 9)
- (2) 最適操舵は Rolling および Pitching に対しても若干効果があるものと思われる。これは、現用の Auto-Pilot system が Rolling に悪影響を及ぼし、発散の傾向も見られることと対照的である。(表 10-1, 図 12)
- (3) 最適制御系によって操舵された場合の動揺の標準偏差が人間による操舵と比較して、特に Yawing において、著しく小さい。これは、我々の制御系が極めて安定した動きをする事を示すものと考えられる。(表 8-3)

現在の Auto-Pilot system の欠点の一つとして舵角を頻繁に動かしすぎる(図 12) ことを以前に指摘したが、最適制御系による操舵の場合にも同様の問題がおこる(図 9)。しかしながら、この問題は(4-2-1)の係数 T を適当に選択することによって解決することが明らかとなった。表 9, 10, 図 10, 12 は T の適当な選択によって操舵は滑らかなものとなり、しかもこの様な操舵によっても十分に制御できることを示している。我々の simulation によれば係数 T に大きな値を与えて制御を滑らかにする場合には同時に R も大きくして gain を余り大きくしない方が効果的である。

図 11 と図 3 の比較から最適制御系による操舵では Rudder, Yaw の低周波部分の power が著しく小さくなる事がわかる。

また、図 4 においては Roll の peak が二つあるがこれは図 13 においては一つとなり、図 4 の左側のものが消失していることが注目される。右側の peak (0.04Hz) は図 3 の peak と一致することからアメリカ丸固有の振動と考えられる。したがって図 4 の左側の peak (0.04Hz) は Auto-Pilot の操舵による結果を生じたもので図 13 では最適制御系による操舵によってこの

部分が消失したものと考えられる。

以上の結果によって、舵角だけでなく舵角の変動をも評価関数に入れる評価方式により、操舵による energy 損失をできるだけ少くしようとする最近の自動操舵への要求にも適合した制御ができることがわかった。

5. 結 論

船の保針運動の自己回帰表現を利用して、統計的解析および最適制御系の設計を試みた結果、次のことが明らかとなった。

(1) 舵 (Rudder) の動きに関連すると考えられる船体運動の中で Yaw, Roll, Pitch, Yacc の実船 (コンテナ船・アメリカ丸) の同時記録を, sampling time 1sec で 896 点 sampling し, 五次元自己回帰表現を行った。赤池によって提唱されている minimum AIC method によればこの程度のデータ数に対してその次数は, 5~15 程度であった。

(2) 多くの data から人間による操舵の場合と自動操舵 (Auto-Pilot) の場合を一例ずつとり上げ AR-model を利用して power-spectrum を求めた結果, 人間による操舵の場合, Auto-Pilot による操舵に比べ非常に長周期の操舵をしており Yawing もその結果, 長周期となっていることが示された。また Auto-Pilot による場合には Rolling の auto-spectrum に人間の場合には見られない peak があることが分った。

(3) 雑音寄与率の解析の結果, 舵から Yawing への影響が予想通り大きいことが立証されたが, 自動操舵の場合には Rolling から Yawing への影響もかなり強いことが明らかとなった。

(4) 制御系に採用する被制御変数の選択においても minimum AIC method を利用した。この結果, アメリカ丸の制御系として Yaw, Roll, Pitch, Yacc を被制御変数, Rudder を操作変数とする model を採用することにした。

(5) 保針効果の最適化, 他の動揺および舵角の最小化および操舵の滑らかさを考慮して, 新しい評価関数を考え, Dynamic Programming によって最適制御を求めた。simulation の結果によれば最適操舵を行うことによって, 人間による操舵と比較して Yawing の分散が, $1/4 \sim 1/5$ になることがわかった。また, 数回の異なった white noise による simulation によって, 最適操舵が人間と比較して様々な外乱に対し安定した効果を示すことがわかった。

(6) 実際の操舵機の機能の点から問題となる操舵の滑らかさ, すなわち舵の動きの忙しさの解消は (5) で求めた最適制御によって実現できることがわかった。しかも操舵を滑らかにする事によって制御結果にほとんど悪い結果を与えないことがわかった。

(7) 現用の Auto-Pilot による制御と比較して最適制御によればより少い舵の動きで制御でき, しかも Rolling への悪影響を取り除くことができることがわかった。

(8) 制御系を表現する式および最適制御則から被制御変数の分散の期待値を求めた結果, simulation から得た結果とほぼ一致した。これは, 計算時間上有利な simulation が良い結果を与えていることを示すものと考えられる。

以上の様に理論的あるいは実験的に得られた多くの結果から, 実船への適用に関する貴重な資料が得られた。今後の問題としては保針運動系と機関の制御を結びつけること, すなわち, 舵の動きと機関の運動 (プロペラ回転数) との総合的な制御を行うこと等が残されている。

6. 謝 辞

本論文作成にあたり終始懇切で暖い助言を与えられた統計数理研究所の赤池弘次博士, および日頃筆者らに暖い激励を与えつづけられている三井造船株式会社, 山内保文博士, に心から感謝の意をさげます。また原データ利用の機会を与えられた運輸省船舶技術研究所運動性能

部, 小川陽弘博士, 常に協力を得た東京商船大学機関学科助教授, 堀籠教夫氏と統計数理研究所の多田富貴子嬢に感謝します。

Reference

- [1] Akaike, H. "On the use of a linear model for the identification of feedback systems." Ann. Inst. Statist. Math., Vol. 20 (1968) pp 271-297.
- [2] Akaike, H.: "Statistical predictor identification" Ann. Inst. Statist. Math., Vol. 22 (1970) pp 203~217.
- [3] Akaike, H. "Autoregressive model fitting for control" Ann. Inst. Statistic. Math. Vol. 23 (1971) pp 163-180.
- [4] Akaike, H. "A new look at the statistical model identification" IEEE Trans. Automat. Control, AC-19 (1974) pp 716-723.
- [5] 赤池・中川 "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).
- [6] Aström, K.J. and Kõllström "Application of system identification techniques to the determination of ship dynamics".
- [7] Box, G. and Jenkins, G., "Time Series Analysis forecasting and control" Holden-Day, (1970).
- [8] 小川陽弘, 大津皓平 "コンテナ船あめりか丸による北太平洋航海性能試験 (第3報)" 船舶技術研究所報告, 第9巻 第3号, pp. 173-229.
- [9] 小山健夫 "外洋航行中の最適自動操舵系に関する研究" 日本造船学会論文集, 第122号.
- [10] Minorsky, N., "Directional Stability of Automatically Steered Bodies" Journal of American Society of Naval Engineer, 1922, Vol. 34, pp 280-309.
- [11] "Principle of Naval Architecture" The Society of Naval Architects and Marine Engineers. New York, 1967.
- [注] 本稿の計算に使われた program の多くは, TIMSAC (Time Series Analysis and Control) package としてその source list が文献 [5] の pp.123-187 にある.