ILQ 最適サーボ理論による船舶の操縦運動制御に関する研究

正員 小川原 陽 一* 正員 新 宅 英 司**

A study on the Automatic Manoeuvring System of a ship based on ILQ Optimal Servo Theory

by Yoichi Ogawara, *Member* Eiji Shintaku, *Member*

Summary

In the application of the linear quadratic (LQ) optimal regulator theory to the control system design, it is difficult to find suitable weighting matrices Q , R in the performance function. That is, the designer must resort to trial and error iteration to find them. And so it is rather difficult to design the optimal control systems.

On the other hand, the inverse linear quadratic (ILQ) optimal servo theory was recently proposed. This design theory is developed from the practical view point by applying some results on the inverse problem of LQ regulator. In this method there is a close relationship between the characteristic of the transient response of the control system and the design parameters. And when the design condition is fulfilled, it is able to construct a control system which has no interaction between the controlled variables, and it is also able to express the optimal feedback gain in terms of the system matrices and the design parameters.

In this paper, we tried to apply ILQ optimal servo theory to the design of a control system for manoeuvring motion of a ship. It is shown that by ILQ design method the control system for manoeuvring motion of a ship can be designed very easily compared with usual LQ design method. Response characteristics can be selected with design parameters. A control system can be constructed not to interact between the control variables. And as the gain is expressed in terms of the system matrices and the design parameters, it is able to construct a control system which is adaptable to the change of the characteristic of the controlled object.

1. 緒 論

今日、制御の高度化、複雑化にともない、船舶の操縦運動制御においても舵のみによる制御ではなく、サイドスラスタなどを用いた多変数制御が必要となっている。このため、1入力1出力系を対象とした古典制御理論では制御系の設計が難しいため、多変数制御理論が用いられるようになり、その中でも代表的な最適レギュレータ理論が広く使用されている。

最適レギュレータは、評価関数の重みによらずフィードバックループを含めたシステムの閉ループ系は安定で、し

かも、システムの特性変動に対して強く、低感度であるなどの長所を持つ。しかし、設計パラメータである評価関数の重みと制御対象の閉ループ応答との関連が明確でなく、1つの制御量の応答を決定するために複数の重みを調整する必要がある、かつ各制御量間に相互干渉が存在するという理由から、実際に制御系を設計する際には、評価関数の重みを試行錯誤で決定しなくてはならず、設計作業は複雑で容易ではない。

一方、最近、

(1) 制御系の複数の制御量の過渡応答特性を個別に指定できる。

(2) 制御系のフィードバックゲインがシステムの係数行列と設計パラメータから直接解析的に計算できる。

といった特徴を持つ、ILQ (Inverse Linear Quadratic) 最

* 九州大学工学部

** 九州大学大学院工学研究科

適サーボ系設計法が藤井により提案されている^{1),2)}。

本設計法は、最適レギュレータ理論のように評価関数の重みについて最適な制御則を求めるのではなく、逆に、制御量の応答波形を目的とするものに選定して、評価関数の何らかの重みに関して制御入力を最適化する方法である。それゆえ、本設計法では、設計パラメータで制御対象の閉ループ応答を直接決定でき、従来の最適レギュレータ理論による制御システムの設計に比べて設計が容易となる。

そこで、ILQ 制御理論 (ILQ 最適サーボ系設計法) を船舶の操縦運動の制御システムの設計に応用し、その適用性や、特性を明らかにし、さらに、最適レギュレータ理論による設計法 (LQ 設計法) と比較し、ILQ 最適サーボ系設計法の、船舶の操縦運動制御システムの設計に対する有効性を考察した。

2. ILQ 制御理論

2.1 システムの定式化

システムの状態変数を n 個、入力数と出力数を m とするとき、システムの状態方程式は次のように表現される。

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}, \quad \mathbf{A}: (n \times n) \quad \mathbf{B}: (n \times m) \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x}, \quad \mathbf{C}: (m \times n) \end{aligned} \quad (1)$$

制御量をステップ状の目標値変化に追従させるサーボ系においては、システムの特性格変動や、一定外乱に対処するために積分補償を行い、状態変数 $\mathbf{x}$ に入力 $\mathbf{u}$ を加えて、新たに、 $\mathbf{v} (= \dot{\mathbf{u}})$ を入力とし、制御量の目標値を $\mathbf{r}$ としたときの制御誤差 $\mathbf{e} (= \mathbf{r} - \mathbf{y})$ を出力とする拡大系を考える³⁾。そして、定常状態におけるシステムの状態変数を $\mathbf{x}_\infty$ 、入力を $\mathbf{u}_\infty$ とし、定常値からの状態変数と入力の偏差を、

$$\tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_\infty, \quad \tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_\infty \quad (2)$$

とすると、このシステムの拡大系は、

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}_e = \mathbf{A}_e \tilde{\mathbf{x}}_e + \mathbf{B}_e \mathbf{v} \quad (3)$$

$$\mathbf{e} = -\mathbf{C}_e \tilde{\mathbf{x}}_e$$

$$\tilde{\mathbf{x}}_e = [\tilde{\mathbf{x}}^T \quad \tilde{\mathbf{u}}^T]^T, \quad \mathbf{v} = \dot{\mathbf{u}}$$

$$\mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_e = [\mathbf{C} \quad \mathbf{0}]$$

$\mathbf{I}$: 単位行列

となり、最適サーボ系は、評価関数

$$J = \int_{t=0}^{t=\infty} (\tilde{\mathbf{x}}_e^T \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{x}}_e + \mathbf{v}^T \mathbf{R} \mathbf{v}) dt \quad (4)$$

$$\mathbf{Q}: ((n+m) \times (n+m)), \quad \mathbf{R}: (m \times m)$$

を最小化することにより、最適制御入力 $\mathbf{v}$ が次のように与えられる。

$$\mathbf{v} = -\mathbf{K}_e \tilde{\mathbf{x}}_e \quad (5)$$

このとき、入力 $\mathbf{u}$ は、(6)式のように与えられる。

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= -\mathbf{K}_F(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \mathbf{K}_I(\mathbf{w} - \mathbf{w}_0) + \mathbf{u}_0 \\ [\mathbf{K}_F \quad \mathbf{K}_I] &= \mathbf{K}_e \mathbf{\Gamma}^{-1}, \end{aligned} \quad (6)$$

$$\mathbf{\Gamma} = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{w} = \int_0^t \mathbf{e} dt$$

2.2 ILQ 制御理論

ILQ 制御理論は、評価関数の何らかの重み $\mathbf{Q} > \mathbf{0}, \mathbf{R} \geq \mathbf{0}$ について評価関数 J を最小化する状態フィードバック (5) を求めよ、という最適レギュレータの逆問題の結果を用いている。この逆問題の結果から、最適な制御則 $\mathbf{K}_e$ は適当な正則行列 $\mathbf{V}$ と正定対角行列 $\mathbf{\Sigma} \equiv \text{diag}(\sigma_1 \cdots \sigma_m)$ によって (7) 式のように表現される^{1),4)}。

$$\mathbf{K}_e \mathbf{B}_e = \mathbf{V}^{-1} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V} \quad (7)$$

システム (3) の係数行列が、 $\mathbf{B}_e = [\mathbf{0} \quad \mathbf{I}]^T$ となることから、適当な行列 $\mathbf{F}$ を用いて制御則 $\mathbf{K}_e$ は、

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{V}^{-1} \mathbf{\Sigma} \mathbf{V} [\mathbf{F} \quad \mathbf{I}] \quad (8)$$

と表される。この結果を (3) (5) 式に適用し、フィードバックループを含めた閉ループ系の応答が好ましいものとなるように、行列 $\mathbf{F}, \mathbf{V}, \mathbf{\Sigma}$ を選定する。

ここでは、その結果のみを記す^{1),2)}。

(1) 正則行列 $\mathbf{V}$ は簡単化のために、 $\mathbf{V} = \mathbf{I}$ とする。従って (8) 式は次のように書き換えられる。

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{\Sigma} [\mathbf{F} \quad \mathbf{I}] \quad (9)$$

(2) 行列 $\mathbf{F}$ は、各制御量が好ましい応答になるように、極配置によって決定される。設計パラメータとしての $\mathbf{A}$ の固有値とは異なる n 個の安定な指定極 $\{s_i\}$ と m 次元ベクトル $\{\mathbf{g}_i\}$ を選定して、行列 $\mathbf{F}$ は、次のように定式化される。

$$\begin{aligned} \mathbf{F} &= -[\mathbf{g}_1, \cdots, \mathbf{g}_n][t_1, \cdots, t_n]^{-1} \equiv -\mathbf{G}\mathbf{T}^{-1} \\ t_i &= (s_i \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \mathbf{g}_i \quad 1 \leq i \leq n \end{aligned} \quad (10)$$

(3) 正定対角行列 $\mathbf{\Sigma}$ は、制御則 $\mathbf{K}_e$ が評価関数を何らかの重みに関して最小化するように決定する。そして、同時に行列 $\mathbf{\Sigma}$ は、制御量の過渡応答と、操作量の大きさを調整する機能を持つ。その結果をまとめると、

$$\sigma_i > \sigma = \lambda_{\max}(\mathbf{E}) \quad 1 \leq i \leq m \quad (11)$$

が成立すれば良い。(最適化条件) ただし、

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= [\mathbf{G}\mathbf{S} - (\mathbf{T}^{-1}\mathbf{B})^T][-(\mathbf{S} - \mathbf{S}^T)]^{-1}[\mathbf{G}\mathbf{S} - (\mathbf{T}^{-1}\mathbf{B})^T]^T \\ &\quad + (\mathbf{F}\mathbf{B}) + (\mathbf{F}\mathbf{B})^T \end{aligned} \quad (12)$$

$$\mathbf{S} = \text{diag}(s_1, \cdots, s_n)$$

であり、 $\lambda_{\max}(\mathbf{E})$ は行列 $\mathbf{E}$ の最大固有値を表す。

以上が ILQ 設計法の基本的な考え方であり、ILQ 設計法によるシステムのブロック図は、Fig.1 のようになる。ただし、基準フィードバックゲイン $\mathbf{K}_0$ を次のように定義する。

$$\mathbf{K}_0 \equiv [\mathbf{K}_F^0 \quad \mathbf{K}_I^0] = [\mathbf{F} \quad \mathbf{I}]\mathbf{\Gamma}^{-1} \quad (13)$$

Fig.1 General configuration of the ILQ optimal servo system

2.3 ILQ 設計法の設計可能条件と極指定法

実際に制御系を設計する際には、システムの閉ループ極 $\{s_i\}$ とベクトル $\{g_i\}$ をどのように選定するかが問題となる。藤井はこの点について、設計を省力化するために、 i 番目の出力 $y_i(t)$ の応答が、なるべく少ない設計パラメータで決定できるように、制御対象を非干渉化して、極 $\{s_i\}$ を決定する方法を提案している²⁾。

制御対象が次の条件を満たすとき非干渉化可能で、ILQ 最適サーボ系設計法の適用が可能となる。

(設計可能条件) 「制御対象が $(n-m-d)$ 個の零点をもち、その全ての零点が安定であること。そのためには、(14) 式で定義する行列 D が正則で、制御対象が最小位相推移系であれば良い。

$$d = d_1 + \dots + d_m$$

$$d_i = \min\{k | c_i A^k B \neq 0\}, 1 \leq i \leq m \quad (14)$$

$$D \equiv [(c_1 A^{d_1} B)^T \dots (c_m A^{d_m} B)^T]^T$$

c_i : システム行列 C の i 番目の行ベクトル」

そして、ILQ 最適サーボ系の漸近出力特性に基づいて、各出力 $y_i(t)$ に対して (d_i+1) 個の極 $\{s_i\}$ を指定する。

例えば、 $d_i=0$ のときは、出力 $y_i(t)$ の漸近応答が、時定数 T_i の 1 次遅れの伝達関数 $G_i(s)$

$$G_i(s) = 1/(1 + T_i s)$$

のステップ応答となるように、極 s_i を

$$s_i = -1/T_i \quad (15)$$

と指定する。そして、ベクトル $\{g_i\}$ は、自然基底 e_i を用いて、

$$g_i = W(s_i)^{-1} e_i \quad (16)$$

$$W(s) = C(sI - A)^{-1} B$$

とする。 m 個の出力に対する残りの $(n-m-d)$ 個の極及びベクトルは、それぞれ、零点、零点ベクトルを選ぶ。

$d_i=1$ のときには、出力 $y_i(t)$ の応答が、2 次遅れの伝達関数のステップ応答となるように、非減衰固有角周波数 ω_n 、減衰係数 ζ を選定して、複素極 s_i, s_{i+1} を、

$$s_i, s_{i+1} = \omega_n(-\zeta \pm j\sqrt{1-\zeta^2}) \quad (17)$$

とする。(非重複極指定法) また、 $d_i \geq 1$ のときは、出力 $y_i(t)$ の伝達関数が、

$$G_i(s) = (1/(1 + T_i s))^{d_i+1}$$

の高次遅れ系となるように、極 s_i を

$$s_i = -1/T_i \quad (18)$$

と指定する。(重複極指定法)

2.4 フィードバックゲインの解析表現とフィードバックループの簡略化

ILQ 設計法では、設計可能条件を満たすとき、フィードバックゲイン K_0 は、システム行列 A, B, C と指定極 s_i を用いることによって、(10) (11) 式の計算を行わずに、解析的に計算できる^{1), 2)}。

$$K_F^0 = D^{-1} N \quad (19)$$

$$K_I^0 = D^{-1} \text{diag}(\phi_1(0) \dots \phi_m(0))$$

ただし、

$$\phi_i(s) = (s - s_i)^{d_i+1}, \text{ or } \phi_i(s) = (s - s_i)(s - s_{i+1})$$

$$\phi_i(s) \equiv (\phi_i(s) - \phi_i(0))/s \quad 1 \leq i \leq m$$

$$N \equiv [(c_1 \phi_1(A))^T \dots (c_m \phi_m(A))^T]^T$$

そして、システム行列に零要素が多ければ、(19) 式の表現から基準ゲイン K_0 も零要素が多くなり、フィードバックループを簡略化できる。

2.5 設計手順

ILQ 設計法の設計手順を Fig.2 に示す。制御対象が設計可能条件を満たすときはフィードバックゲインの解析表現により、図中の点線部分に示すように、設計手順を省略できる。

3. 船舶の操縦運動方程式

3.1 基礎方程式

船舶の操縦運動を、Fig.3 に示すような座標系において考えると、無次元化した船舶の操縦運動の基礎方程式は、次のようになる。

Fig. 2 Flow Chart of the design procedure of the ILQ design method

Fig. 3 Coordinate system

$$\begin{aligned}
& (m' + m'_x) \frac{L}{U} \left(\frac{\dot{U}}{U} \cos \beta - \dot{\beta} \sin \beta \right) + (m' + m'_y) r' \sin \beta \\
& = X' \\
& - (m' + m'_y) \frac{L}{U} \left(\frac{\dot{U}}{U} \sin \beta + \dot{\beta} \cos \beta \right) \\
& + (m' + m'_x) r' \cos \beta = Y' \\
& (I_{zz} + i'_{zz}) \left(\frac{L}{U} \right)^2 \left(\frac{\dot{U}}{L} r' + \frac{U}{L} \dot{r}' \right) = N' \quad (20)
\end{aligned}$$

ただし、添え字'は無次元化を表し、 U は船速、 β は横流れ角、 r は回転角速度である。また、 m は船体の質量、 m_x, m_y は x, y 軸方向の付加質量、 I_{zz}, i'_{zz} は z 軸回りの船体の慣性モーメント、付加慣性モーメントである。さらに、 X, Y は船体に働く外力の x, y 軸方向成分、 N は船体重心回りのモーメントを表す。無次元化則は参考文献⁵⁾に従った。

また、船体に働く外力、モーメントは(21)式のように仮定する。

$$\begin{aligned}
X' &= X_H + X_R + X_B \\
Y' &= Y_H + Y_R + T_B + T_S \\
N' &= N_H + N_R + T_B \cdot x'_B + T_S \cdot x'_S \\
x'_B &= x_B/L, \quad x'_S = x_S/L
\end{aligned} \quad (21)$$

ここで添え字の H, P, R, B, S は、それぞれ船体、プロペラ、舵、バウスラスタ、スターンスラスタを表す。 x_B, x_S は、サイドスラスタの重心からの取り付け位置を表す。各外力の表現はMMGモデルに従った⁵⁾。

また、回頭角 ϕ と、空間固定座標系における船体重心位置の x_0, y_0 座標の無次元値(x'_0, y'_0)については次の関係が成り立つ。

$$\begin{aligned}
d\phi/dt &= Ur'/L \\
dx'_0/dt &= U/L \cos(\phi - \beta) \\
dy'_0/dt &= U/L \sin(\phi - \beta)
\end{aligned} \quad (22)$$

3.2 運動方程式の状態空間表現

船舶の操縦運動方程式の線形化は、船舶が一定船速 U_0 で空間固定座標系の x_0 軸に沿って正の方向に直進運動しているときを基準にして行う。船速 U 、横流れ角 β 、回頭角速度 r' 、回頭角 ϕ 、空間固定座標系における船体重心位置 y'_0 、舵角 δ 、バウスラスタ推力 T_B 、スターンスラスタ推力 T_S について線形化基準値を、

$$\beta_0 = r'_0 = \phi_0 = (y'_0)_0 = 0, \quad \delta_0 = T_{B0} = T_{S0} = 0$$

として、線形化基準値からの微小変位を想定し、これらを運動方程式(20)を船速 U 、横流れ角 β 、回頭角速度 r' について解いた式、および(22)の ϕ, y'_0 の式に代入して、2次以上の微小項を無視する。

線形化の結果から、次の(A)、(B)のケースについて、運動方程式を(1)式のように状態空間表現すると(23)、(24)式ようになる。

(A) 舵によって回頭角 ϕ を制御する場合

$$\begin{aligned}
\mathbf{x} &= [\beta \ r' \ \phi]^T \\
\mathbf{y} &= \phi, \quad \mathbf{u} = \delta/\delta_{\max}
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{A} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} \\ b_{21} \\ 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{C} &= [0 \ 0 \ 1]
\end{aligned} \quad (23)$$

(B) バウスラスタとスターンスラスタによって回頭角 ϕ と船体重心位置の y'_0 座標を制御する場合

$$\begin{aligned}
\mathbf{x} &= [\beta \ r' \ \phi \ y'_0]^T \\
\mathbf{y} &= [\phi \ y'_0]^T, \quad \mathbf{u} = [T_B/T_{B\max} \ T_S/T_{S\max}]^T
\end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned}
\mathbf{A} &= \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & 0 \\ a_{41} & 0 & a_{43} & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \\
\mathbf{C} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

4. ILQ 制御理論による制御系の構成

ILQ 設計法を船舶の操縦運動制御システム(A)、(B)に対して適用した。

(A) 舵により回頭角を制御する場合 (case(A))

$$d_1 = 1, \quad D = \mathbf{c}_1 \mathbf{A} \mathbf{B} = a_{32} b_{12} \neq 0$$

となり、この場合は、ILQ 設計法により設計可能で、回頭角 ϕ の過渡応答は、重複極指定法または非重複極指定法によって2次遅れ系として設計できる。

また、回頭角の過渡応答に対する指定極を s_1, s_2 とすると、(19)式から、基準フィードバックゲインは次のようになる。

$$\begin{aligned}
\mathbf{K}_F^0 &= [0 \quad 1/b_{21} \quad -(s_1 + s_2)/a_{32} b_{21}] \\
\mathbf{K}_I^0 &= s_1 s_2 / a_{32} b_{21}
\end{aligned} \quad (25)$$

ただし、極を重複指定する場合には、 $s_1 = s_2$ とする。

(25)式のように、この場合は、横流れ角 β をフィードバックすることが不要となり、フィードバックループを簡略化できる。

(B) バウスラスタとスターンスラスタによって回頭角 ϕ と船体重心位置 y'_0 を制御する場合 (case(B))

$$d_1 = d_2 = 1, \quad \det |\mathbf{D}| \neq 0$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} a_{32} b_{21} & a_{32} b_{22} \\ a_{41} b_{11} & a_{41} b_{12} \end{bmatrix}$$

であるから、(A)と同様に、ILQ 設計法により設計可能で、回頭角 ϕ 、船体重心位置 y'_0 の過渡応答は、2次遅れ系で表される。そして、基準フィードバックゲインは次のようになる。

$$\begin{aligned}
\mathbf{K}_F^0 &= \frac{1}{|\mathbf{D}|} \begin{bmatrix} -a_{32} a_{41} b_{22} & a_{32} a_{41} b_{12} \\ a_{32} a_{41} b_{21} & -a_{32} a_{41} b_{11} \\ -a_{41} b_{12} s_1 s_2 - a_{32} a_{43} b_{22} & a_{32} b_{22} s_3 s_4 \\ a_{41} b_{11} s_1 s_2 + a_{32} a_{43} b_{21} & -a_{32} b_{21} s_3 s_4 \end{bmatrix} \\
\mathbf{K}_I^0 &= \frac{1}{|\mathbf{D}|} \begin{bmatrix} a_{41} b_{12} s_1 s_2 & -a_{32} b_{22} s_3 s_4 \\ -a_{41} b_{11} s_1 s_2 & a_{32} b_{21} s_3 s_4 \end{bmatrix}
\end{aligned} \quad (26)$$

$$|D| = a_{32}a_{41}(b_{12}b_{21} - b_{11}b_{22})$$

ただし、重複極指定の場合、 $s_1 = s_2, s_3 = s_4$ となる。

5. 計算機シミュレーションによる制御性の検討

5.1 シミュレーション方法

計算機によるシミュレーションは、SR 108 コンテナ船を対象とし、condition は full load で even keel とする。主要目を Table 1 に示す。設定船速は、 $U_0 = 5$ kt, $U_0 = 10$ kt, $U_0 = 15$ kt とする。ただし、制御にサイドスラスタを使用する場合は、設定船速は 5 kt とする。流体微係数は、参考文献⁵⁾の方法を使用して求め、付加質量、付加慣性モーメントは、元良の方法⁶⁾によって求めた。

また、実際の船舶においては、舵などの操作入力の大きさには上限があり、操作速度についても物理的に制限がある。この点を考慮して、シミュレーションを行う際には、Fig. 4 のブロック線図に示すような特性を、舵、サイドスラスタなどの操作端の駆動装置の動特性として付加し、最大舵角を 35 度、サイドスラスタの最大推力を 20 ton とし、最大操作速度も、舵は、2.6 deg/sec (舵角を 65 度きるために 25 秒かかる速度)、サイドスラスタは、0.87 ton/sec (最大推力に達するために 23 秒かかる速度) とする⁷⁾。

5.2 シミュレーション結果

(1) 設計パラメータによる制御特性の指定

最初に、ILQ 設計法を船舶の回頭運動制御システムに対して適用した場合の設計パラメータの特性を調査した。

Table 1 Principal particulars of the containership SR108

Length	L (m)	175.00
Breadth	B (m)	25.00
Depth	D (m)	15.40
Draught	d (m)	9.50
Block coefficient	C_B	0.572
Propeller diameter	D_p (m)	6.50
Rudder area	A_R (m ²)	26.69
Thruster position from C.G.	x_B (m)	65.63
	x_S (m)	-61.25

Fig. 4 Characteristic of the final control element for rudder and side thruster

このため、舵により回頭角を制御するシステムを ILQ 設計法によって設計した。まず重複極指定法により制御系を設計した場合を Fig. 5 に示す。このように (18) 式によって時定数 T_1 に応じて極を指定することにより、応答波形を自由に設定することができる。

また、同じ条件で制御系を (17) 式による非重複極指定法によって、減衰係数を $\zeta = 0.7$ に固定して、固有周波数 ω_n を、 $\omega_n = 0.0119, \omega_n = 0.0095, \omega_n = 0.0071$ と変化させて設計した例を Fig. 6 に示す。

このように、ILQ 設計法では、設計パラメータによって応答波形を設定でき、制御量の応答に応じた操作量の大きさを確認することにより、制御系の限界を知る事ができるので、制御系の設計を容易に行うことができる。

(2) 最適化条件について

行列 Σ の対角要素であるゲイン調整パラメータ σ を変化させてシミュレーションした結果を Fig. 7 に示す。このとき設定船速は 10 kt で、回頭角の応答は (18) 式により、時定数が $T_1 = 100$ sec の 2 次遅れ系に設定している。この場合、最適化条件を満足する σ の下限値は $\underline{\sigma} = 0.099$ である。 $\sigma = 1.0$ と下限値の 10 倍に設定した場合、回頭角の応答は

Fig. 5 Step responses at case (A) for several values of Time constant T_1 (ILQ) ($U_0 = 10$ kt, $\psi_d = 60$ deg)

Fig. 6 Step responses at case (A) for several values of natural frequency ω_n with damping factor ζ fixed (ILQ) ($U_0 = 10$ kt, $\psi_d = 60$ deg, $\zeta = 0.7$)

Fig. 9 Step responses at case (B) when the desired heading angle ψ_d is changed from 0 deg to 5 deg at $t=500$ sec ($U_0=5$ kt, $(y_0)_d=1$)

Fig. 10 Step responses at case (B) for several ship speeds with feedback gain K_e fixed on K_{10} ($U_0=10$ kt)(ILQ)

Fig. 11 Comparison of step response at case (A) between the control system with fixed feedback gain K_{10} and the adaptable control system with the variable feed back gain (ILQ) ($U_0=5$ kt, $\psi_d=60$ deg)

性変動に対しても適応性を持たせることができ、良好な制御性が得られることが明らかになった。

6. 結 論

本論文では、船舶の操縦運動制御系をサーボ系としてモデル化し、従来の最適レギュレータ理論に代る ILQ 制御理論を適用して、その有効性を明らかにした。そして、その際的设计パラメータの設定指針を示した。得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1) ILQ 制御理論は、設計パラメータにより閉ループ

系の応答を直接指定できるので、設計作業の見通しが良く、従来の最適レギュレータによる設計法と比較して、船舶の操縦運動制御システムの設計は極めて容易となり、非常に短時間で制御系を設計者の希望する特性に設計することができる。

- (2) 船舶の操縦運動制御の場合には、複数の制御量の応答を非干渉化する条件が満たされるので、それぞれ希望する特性を独立に設定することができる。

(3) フィードバックゲインは、複雑な計算を行わずに、システム行列と設計パラメータによって表現できるため、システム行列の特性によっては、フィードバックループを簡略化できる場合がある。例えば、舵により回頭角を制御する場合に、観測が困難な横流れ角をフィードバックせずに最適制御系が構成できることが分った。

(4) 時々刻々のシステムの状態に対して最適のフィードバックゲインを設定することができ、適応性のある制御系を構築できる。

このように、ILQ 制御理論の適用により、船舶の操縦運動制御システムを設計者の希望する特性となるように容易に設計することができ、かつ制御対象の変動に適応する実用的なシステムが構築できることが明らかになった。

最後に、ILQ 制御理論について貴重な御指導をいただいた九州工業大学情報工学部藤井隆雄教授に深く感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 藤井隆雄, 水島成人: LQ 設計への新しい試み—最適サーボ系設計への応用, 計測自動制御学会論文集, Vol. 23, No. 2 (1987).
- 2) 藤井隆雄, 下村 卓: ILQ 最適サーボ系設計法の一般化, システム制御情報学会論文誌, Vol. 1, No. 6 (1988).
- 3) 池田雅夫, 須田信英: 積分型最適サーボ系の構成, 計測自動制御学会論文集, Vol. 24, No. 1 (1988).
- 4) 藤井隆雄: 最適レギュレータの逆問題, 計測と制御, Vol. 27, No. 8 (1988).
- 5) K. Kijima, T. Katsuno, Y. Nakiri and Y. Furukawa: "On the manoeuvring performance of a ship with the parameter of loading condition" Journal of The Society of Naval Architects of Japan, Vol. 168 (1990).
- 6) 元良誠三: 船体運動に対する付加質量及び付加慣性モーメントについて, (その 1. その 2. その 3), 関西造船協会論文集, 第 105 号 (1959), 第 106 号 (1959).
- 7) 広田 実: 船舶制御システム工学, 増補第 2 版, 成山堂書店, (1985), p. 183.

- 1) 藤井隆雄, 水島成人: LQ 設計への新しい試み—最
-