自航バージの定点保持のための制御系の設計について

正員 貴島 勝郎* 正員 村田 航**
正員 古川 芳孝*

Design of Dynamic Positioning System for Self-propulsive Barge under External Disturbances

by Katsuro Kijima, *Member* Koh Murata, *Member*
Yoshitaka Furukawa, *Member*

Summary

When a ship is required to keep the specified position with high accuracy under influence of external disturbances, dynamic positioning system (DPS) is often used in order to keep its position. It will be able to construct a control system which has no interaction among the controlled variables by using the inverse linear quadratic (ILQ) optimal servo theory. It will be also able to express the optimal feedback gain in terms of the system matrices and the design parameters. In ILQ optimal servo theory, time constant T_i as the design parameters have much influence on the performance of the control system, and the suitable values of T_i should be selected as small as possible corresponding to external disturbances. However, it is troublesome to select suitable T_i because we have to carry out numerical simulations repeatedly.

In this paper, we applied the ILQ optimal servo theory to design the control system of DPS for a self-propulsive barge. About time constant T_i , we designed the system with T_i defined automatically in response to the dimensions of controlled variables. Applying this method, it is possible to adjust the suitable values of T_i automatically. From the numerical simulations, it is found that design process taking the system with T_i defined automatically would be more useful and easier than taking usual ILQ optimal servo theory.

1. 緒 言

今日では人や物の移動が増大かつスピードアップしつつあり、その結果、船の航路となっている海峡や河口において多くの橋が建設されており、長いスパンと十分な橋桁下高さを確保するために吊橋が多く採用されている。

吊橋を建設する工法の中でも、直下吊り工法と呼ばれる方法では、ケーブルに取り付けられたケーブルクレーンを用いて海上のバージに搭載された橋桁ブロックを直接吊り上げるため、バージは潮流や風、波等の外乱下において精度良い定点保持能力を有していなければならない¹⁾。

このような定点保持制御に関して、著者らは以前、時定数によって制御対象の応答を指定することが可能な ILQ (Inverse Linear Quadratic) 制御理論²⁾³⁾を適用して制御系の設計を行った⁴⁾。そして、設計パラメータである時定数の変化が制御系の定点保持性能に与える影響について検討を行った。その結果、外乱の大きさに応じて時定数を小さくすることにより、所定の範囲内において定点保持することが可能であることが分かった。しかし、時定数の値は設計者が試行錯誤により選定しなければならなかった。

そこで、本研究では、時定数の値を試行錯誤の計算結果をもとに選定するのではなく、定点保持制御を行いながら、状態変数に応じて時定数の値を変化させることにより、最適な値を自動的に設定できるような制御系の設計を行った。さらに、時定数の値を一定としてシミュレーション計算を行った結果と、設計された時定数を自動的に設定する制御系を用いて計算を行った結果を比較し、その制御性能について検討を行った。

* 九州大学工学部

** 九州大学大学院工学研究科

2. バージの運動方程式

バージの定点保持制御を考える際には、水平面内における目標位置からの変位をなるべく小さくすることが特に重要であると考えられるので、surge, sway, yaw の水平面内の運動のみを考える。外乱としては、潮流および風を考える。Fig. 1 に示す座標系において、 $O_0-x_0y_0$ を空間固定座標系、 $o-xy$ を船体固定座標系としてバージの重心まわりの運動方程式を次式のように表す。

$$\left. \begin{aligned} (m+m_x)\dot{u}-(m+m_y)vr-(m_x-m_y)V_Cr\sin(\psi-a) &= X \\ (m+m_y)\dot{v}+(m+m_x)ur-(m_y-m_x)V_Cr\cos(\psi-a) &= Y \\ (I_{zz}+i_{zz})\dot{r} &= N \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

u, v, r : バージの速度の x, y 軸方向成分および重心まわりの回頭角速度

ψ : バージの回頭角

m, m_x, m_y : バージの質量および x, y 軸方向の付加質量

I_{zz}, i_{zz} : バージの z 軸まわりの慣性モーメントおよび付加慣性モーメント

X, Y, N : バージに作用する流体力の x, y 軸方向成分および z 軸まわりのモーメント

a : x_0 軸に対する潮流の流向

(1) 式の右辺における流体力については、バージに作用する外力とスラスタが発生する制御力に分ける。 τ_x は x 軸方向の制御力、 τ_y は y 軸方向の制御力、 τ_z は z 軸まわりの制御力モーメントを表している。外力については、さらに潮流力および風圧力の各成分に分け、それぞれ添字の C, W で表す。

$$\left. \begin{aligned} X &= X_c + X_w + \tau_x \\ Y &= Y_c + Y_w + \tau_y \\ N &= N_c + N_w + \tau_z \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここで、潮流力については次式のように表した。

$$\left. \begin{aligned} X_c &= \frac{1}{2}\rho A_{cx} V_c^{*2} C_{cx} \\ Y_c &= \frac{1}{2}\rho A_{cy} V_c^{*2} C_{cy} \\ N_c &= L_{cn} \sqrt{X_c^2 + Y_c^2} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここで、

ρ : 海水の密度

A_{cx}, A_{cy} : バージの水面下における正面および側面の投影面積

C_{cx}, C_{cy} はバージの潮流力係数であり、 L_{cn} は重心から潮流力の着点までの距離である。また、 $V_c^*(u_c^*, v_c^*)$ は対水速度であり、それぞれ次式のように表す。

$$\left. \begin{aligned} V_c^* &= \sqrt{u_c^{*2} + v_c^{*2}} \\ v_c^* &= u + V_c \cos(\psi - a) \\ v_c^* &= v - V_c \sin(\psi - a) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

風による外力は次式のように表した。

$$\left. \begin{aligned} X_w &= \frac{1}{2}\rho_a A_{wx} V_w^{*2} C_{wx} \\ Y_w &= \frac{1}{2}\rho_a A_{wy} V_w^{*2} C_{wy} \\ N_w &= L_{wn} \sqrt{X_w^2 + Y_w^2} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

ここで、

ρ_a : 空気密度

A_{wx}, A_{wy} : バージの水面上における正面および側面の投影面積

C_{wx}, C_{wy} はバージの風圧力係数であり、 L_{wn} は重心から風圧力の着点までの距離である。また、 γ は x_0 軸に対する風向、 $V_w^*(u_w^*, v_w^*)$ は相対風速であり、それぞれ次式のように表す。

$$\left. \begin{aligned} V_w^* &= \sqrt{u_w^{*2} + v_w^{*2}} \\ u_w^* &= u + V_w \cos(\psi - \gamma) \\ v_w^* &= v - V_w \sin(\psi - \gamma) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

さらに、空間固定座標系と船体固定座標系との間には次の関係が成り立つ。

$$\left. \begin{aligned} \dot{x}_0 &= u \cos \psi - v \sin \psi \\ \dot{y}_0 &= v \cos \psi + u \sin \psi \\ \dot{\psi} &= r \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

(1) 式および (7) 式から得られる連立一次微分方程式を解くことにより、バージの運動を求めることができる。

3. 制御系の設計

3.1 ILQ 設計法

定点保持制御を行う際には制御対象を目標入力に追従させる制御を行うこととなるため、対象とするシステムは次の状態方程式で表される。

Fig. 1 Coordinate systems

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \\ \mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \end{cases}, \quad \mathbf{A}(n \times n), \mathbf{B}(n \times m), \mathbf{C}(m \times n) \quad (8)$$

ここで、状態ベクトル $\mathbf{x}$ および制御入力ベクトル $\mathbf{u}$ は次式のように表す。

$$\begin{cases} \mathbf{x} = (u, v, r, x_0, y_0, \phi)^T \\ \mathbf{u} = (\tau_x, \tau_y, \tau_z)^T \\ \mathbf{y} = (x_0, y_0, \phi)^T \end{cases} \quad (9)$$

今、出力ベクトル $\mathbf{y}$ の目標値ベクトルを $\mathbf{r}$ とし、 $t \rightarrow \infty$ の時の定常状態における状態ベクトルを $\mathbf{x}_\infty$ 、入力ベクトルを $\mathbf{u}_\infty$ とすると、定常状態における状態ベクトルと入力ベクトルとの偏差は次式のように表せる。

$$\begin{cases} \tilde{\mathbf{x}} = \mathbf{x} - \mathbf{x}_\infty \\ \tilde{\mathbf{u}} = \mathbf{u} - \mathbf{u}_\infty \end{cases} \quad (10)$$

一定外乱がある場合に、定常状態における偏差を零にするため制御対象の前に積分器を配置し、状態変数ベクトル $\tilde{\mathbf{x}}$ に入力ベクトル $\tilde{\mathbf{u}}$ を加えて新たに状態変数ベクトル $\tilde{\mathbf{x}}_e$ とし、入力ベクトル $\mathbf{u}$ を時間に関して一階微分したものを新たに入力ベクトル $\mathbf{v}$ とする。また、目標値ベクトル $\mathbf{r}$ と出力ベクトル $\mathbf{y}$ との制御偏差ベクトル $\mathbf{e}$ をとり、新たに入力ベクトルとする。このように構成された、システムの拡大系を状態方程式で表すと次式ようになる。

$$\begin{cases} \dot{\tilde{\mathbf{x}}}_e = \mathbf{A}_e \tilde{\mathbf{x}}_e + \mathbf{B}_e \mathbf{v} \\ \mathbf{e} = -\mathbf{C}_e \tilde{\mathbf{x}}_e \end{cases} \quad (11)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{x}}_e &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{x}} \\ \tilde{\mathbf{u}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{v} = \dot{\mathbf{u}}, \quad \mathbf{A}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B}_e = \begin{bmatrix} \mathbf{0} \\ \mathbf{I} \end{bmatrix}, \\ \mathbf{C}_e &= [\mathbf{C} \quad \mathbf{0}] \end{aligned}$$

(11)式で表されるシステムに対して、評価関数は(8)式で表されるシステムの場合と同じように次式で与える。

$$J = \int_{t=0}^{t=\infty} (\tilde{\mathbf{x}}_e^T \mathbf{Q} \tilde{\mathbf{x}}_e + \mathbf{v}^T \mathbf{R} \mathbf{v}) dt, \quad \mathbf{Q} > \mathbf{0}, \mathbf{R} > \mathbf{0} \quad (12)$$

ここで、 $\mathbf{Q}$, $\mathbf{R}$ は重み行列である。(12)式の評価関数 J を最小化するような最適制御入力 $\mathbf{v}$ が次式のように求められる。

$$\mathbf{v} = -\mathbf{K}_e \tilde{\mathbf{x}}_e \quad (13)$$

この時、入力ベクトル $\mathbf{u}$ は、フィードバックゲイン行列 $\mathbf{K}_e$ を用いて次式のように表される。

$$\mathbf{u} = -\mathbf{K}_F(\mathbf{x} - \mathbf{x}_0) + \mathbf{K}_I(\mathbf{w} - \mathbf{w}_0) + \mathbf{u}_0 \quad (14)$$

ここで、

$$\mathbf{w} = \int_0^t \mathbf{e} dt, \quad [\mathbf{K}_F \quad \mathbf{K}_I] = \mathbf{K}_e \begin{bmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{B} \\ \mathbf{C} & \mathbf{0} \end{bmatrix}^{-1}$$

ここで、 $\mathbf{x}_0$, $\mathbf{w}_0$, $\mathbf{u}_0$ は、それぞれ $\mathbf{x}$, $\mathbf{w}$, $\mathbf{u}$ の初期値とする。 $\mathbf{K}_e$ は適当な正則行列 $\mathbf{V}$ と正定対角行列 Σ を用いて次式のように表される。

$$\mathbf{K}_e = \mathbf{V}^{-1} \Sigma \mathbf{V} [\mathbf{F} \quad \mathbf{I}] \quad (15)$$

藤井氏らによって提案された ILQ 設計法²⁾³⁾は、最適レギュレータの逆問題の結果を利用しており、基本的に(15)式の

行列 $\mathbf{F}$, $\mathbf{V}$, Σ を決定する設計法である。行列 $\mathbf{V}$ については、本設計法では簡単のため単位行列を選ぶものとする。また、行列 $\mathbf{F}$ については、各制御量が最も適切な応答になるような極配置によって決定される。設計パラメータとして行列 $\mathbf{A}$ の固有値 ($=\lambda(\mathbf{A})$) とは異なるように n 個の安定な閉ループ系の指定極 s_i と m 次元実数ベクトル $\mathbf{G}$ を選定した時、行列 $\mathbf{F}$ は指定極 s_i に対応する閉ループ系の固有ベクトル $\mathbf{T}$ を用いて次式で表される。

$$\begin{cases} \mathbf{F} = -\mathbf{G}\mathbf{T}^{-1} \\ \mathbf{G} = [\mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_n] \\ \mathbf{T} = [\mathbf{t}_1, \dots, \mathbf{t}_n] \\ \mathbf{t}_i = (s_i \mathbf{I} - \mathbf{A})^{-1} \mathbf{B} \mathbf{g}_i, \quad 1 \leq i \leq n \end{cases} \quad (16)$$

ここで、 $\mathbf{g}_i$ はベクトル $\mathbf{G}$ の要素である。また、行列 Σ については、対角要素 σ_i が次の条件を満たすように選定する。

$$\begin{cases} \Sigma = \text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_n) \\ \sigma_i > \lambda_{\max}(\mathbf{E}), \quad 1 \leq i \leq m \end{cases} \quad (17)$$

ただし、

$$\begin{cases} \mathbf{E} = [\mathbf{G}\mathbf{S} - (\mathbf{T}^{-1}\mathbf{B})^T](-\mathbf{S} - \mathbf{S}^T)^{-1} \\ \quad \times [\mathbf{G}\mathbf{S} - (\mathbf{T}^{-1}\mathbf{B})^T]^T + (\mathbf{F}\mathbf{B}) + (\mathbf{F}\mathbf{B})^T \\ \mathbf{S} = \text{diag}(s_1, s_2, \dots, s_n) \end{cases} \quad (18)$$

であり、 $\lambda_{\max}(\mathbf{E})$ は行列 $\mathbf{E}$ の最大固有値を表し、 s_i はシステム行列 $\mathbf{A}$ の固有値と異なる値を持つ安定な極である。

また、制御系の設計を行う際に ILQ 設計法を適用するためには、次に示す条件を満足しなければならない。

- 1) システムにおいて最大個数 $(n-m)$ 個の零点をもつ。即ち、行列 $\mathbf{CB}$ が正則である。
- 2) システムの零点が全て安定である。

しかし、これらの条件のうち、1)が満たされない場合、つまり、行列 $\mathbf{CB}$ が正則でない場合には零点が最大個数より $d(\equiv n-m-N_z)$ 個少ない場合においても、次に示す行列 $\mathbf{D}$ が正則であれば ILQ 設計法を適用することが可能である。

$$\begin{cases} \mathbf{D} \equiv [(\mathbf{c}_1 \mathbf{A}^{d_1} \mathbf{B})^T, \dots, (\mathbf{c}_m \mathbf{A}^{d_m} \mathbf{B})^T]^T \\ d_i = \min\{k | \mathbf{c}_i \mathbf{A}^k \mathbf{B} \neq \mathbf{0}\} \end{cases} \quad (19)$$

ここで、 $\mathbf{c}_i$ は行列 $\mathbf{C}$ の i 番目の列ベクトルである。この条件が満足される場合、システムは非干渉化され、各出力の過渡応答を個別に指定することが可能となる。ここで、添え字の集合 K_i を次のように表す。

$$\begin{cases} K_i = \{p_i, p_i+1, \dots, p_i+d_i\} \quad 1 \leq i \leq m \\ p_1=1, \quad p_{i+1}=p_i+d_i+1 \end{cases} \quad (20)$$

今回検討の対象とした自航バージの場合は $d_i \geq 1$ となる。従って、 s_i については出力 $y_i(t)$ の漸近応答が時定数 T_i の高次遅れの伝達関数 $G_i(s)$ のステップ応答となるように選定を行うことができる。

$$\begin{cases} s_i = -\frac{1}{T_i} \\ G_i(s) = \left(\frac{1}{1+T_i s} \right)^{d_i+1} \end{cases} \quad (21)$$

この極指定に基づき、(18)式における行列 S の表現を次のように拡張する。

$$S = \text{block} \cdot \text{diag}(S_1, \dots, S_m, S_z) \quad (22)$$

$$S_i = \begin{bmatrix} s_i & \kappa_i & 0 \\ & \ddots & \vdots \\ 0 & & \kappa_i \\ & & & s_i \end{bmatrix} : (d_i+1) \times (d_i+1) \quad 1 \leq i \leq m \quad (23)$$

$$S_z = \text{diag}(s_{m+d+1}, \dots, s_n) \quad (24)$$

ここで、 κ_i はジョルダンパラメータであり、次式を満たすように選ばばよい。

$$|\kappa_i| \leq |s_i| \quad (25)$$

このジョルダンパラメータ κ_i は、なるべく σ_i が小さくなるように適当に選ぶ。さらに、極 s_i の選定の修正にともない、(16)式も次の漸化式で表される。

$$\left. \begin{aligned} g_k &= g_{p_i} + \kappa_i L_i t_{k-1}, \quad k \in K_i, \quad 1 \leq i \leq m \\ t_k &= R_i g_k - \kappa_i M_i t_{k-1}, \quad k \in K_i, \quad 1 \leq i \leq m \end{aligned} \right\} \quad (26)$$

ただし、

$$\left. \begin{aligned} M_i &= (s_i I - A)^{-1}, \quad R_i = M_i B, \quad W_i = [C R_i]^{-1} \\ L_i &= W_i C M_i, \quad g_{p_i} = W_i e_i, \quad t_{p_i-1} = 0 \end{aligned} \right\} \quad (27)$$

ここで、 e_i は自然基底である。また、 g_i は e_i を用いて次式のように表せる。

$$g_i = W(s)^{-1} e_i, \quad W(s) = C(sI - A)^{-1} B \quad (28)$$

最終的に基準フィードバックゲイン行列 K_0 は、次式のように定義できる。

$$K_0 = [K_F^0 \quad K_I^0] = [F \quad I] \Gamma^{-1}, \quad \Gamma = \begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \quad (29)$$

本研究において、以上に示したような ILQ 制御理論を適用して制御系を設計し、シミュレーション計算を行う手順を Fig. 2 に示す。

3.2 時定数の設定法

本研究では、状態変数の大きさに応じて(21)式における時定数 T_i の値を変化させるものとした。本節では、その設定法について述べる。まず、 x_0 軸、 y_0 軸方向および z 軸まわりの状態変数に対する時定数をそれぞれ T_x 、 T_y および T_z とする。前に著者らが行った研究⁴⁾では、試行錯誤を繰り返すことにより外乱の大きさに応じた最適な時定数を求めているが、本研究では制御系を設計する際に、試行錯誤を行うことなく最適な時定数を設定することが可能となるように、状態変数である目標点からの距離、速度および加速度をパラメータとして、定点保持制御を行いながら時定数を自動的に設定する方法について検討を行った。ここでは、その1例として T_x の値を状態変数の大きさに応じて設定するまでの手順を Fig. 3 に示す。ここで、 a_{x0} は検出する x_0 軸方向の加速度の最小値であり、 v_x 、 a_x および x_d は、それぞれ次式で求められる。

$$v_x = \dot{x}_0 \quad (30)$$

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

$$a_x = \ddot{x}_0 \quad (31)$$

$$x_d = \frac{x_0}{x_m} \quad (32)$$

x_d は目標点から自航バージまでの x_0 軸方向の距離を表すパラメータであり、 x_d を求める際に用いる x_m は目標点からの許容範囲の大きさとする。すなわち x_d が 1.0 より小さければ自航バージは許容範囲内にあり、大きければ許容範囲内において定点保持できていないことを表している。 a_r および β_r は、設計者が設定する時定数の値の変化率である。時定数は設計段階で初期値 T_{x0} を与え、制御開始後は 1 秒ごとに位置、速度、加速度の大きさおよび向きに応じて時定数の値を変化させる。その流れとしては、

- (1) 加速度の大きさが小さい場合には、時定数の値は変化しないものとする。従って、 x_0 軸方向の加速度 a_x の大きさが、検出する加速度の最小値 a_{x0} より小さければ時定数の値は $T_x = T_{x0}$ とする。
- (2) 位置が目標点を中心に仮定した許容範囲内にない場合に関しては、加速度の向きが目標点から離れる方向である場合には $T_x = T_{x0}/a_r$ とし、加速度の向きが目標点に近づく方向である場合には $T_x = T_{x0}$ とする。
- (3) 位置が許容範囲内にある場合に関しては、速度の向きが目標点から離れる方向である場合には $T_x = T_{x0}/\beta_r$ とし、また、速度、加速度ともに目標点に近づく方向である場合には $T_x = T_{x0} \times \beta_r$ とする。それ以外の場合は、 $T_x = T_{x0}$ とする。

Fig. 3 Flow chart of the design procedure of T_x

T_y および T_z も T_x と同様の手順で変化させるものとする。

4. 計算結果及び考察

検討の対象とした自航バージの主要目を Table 1 に示す。計算を行う際の初期条件として、自航バージは目標点である空間固定座標の原点において x_0 軸の正の方向を向いており、外乱を受けると同時に制御を開始するものとした。本研究では位置に関する許容範囲として、変位を目標点を中心に半径 1.25(m) の円内に、回頭角を ± 3 (deg.) 以内で収めるものと仮定し、制御装置として船体下部に 1 基当たりの最大推力 5.0 (ton) の任意の方向に推力を発生できる首振り式スラスターを 4 基装備しているものとした。スラスターが稼動し始めてから必要な推力を発揮するまでの、単位時間あたりの推力の増減率は 1.0(ton/sec.)、首振り角速度は 3.0(deg./sec.) とした。外乱については、風速は $V_w=7.0$ (m/sec) で常に一定とし、潮流速 V_c を種々変化させるものとした。外乱が作用する方向としては、 x_0 軸の正の方向に対して 45 (deg.) の方向から与えるものとした。また、時定数を設定する際に検出する加速度の最小値

は、値を種々変化させて検討を行った結果、 a_{x0} および a_{y0} は共に 0.007 (m/sec.)、 a_{n0} は 0.001 (deg./sec.) とし、時定数の値の変化の割合 α_T および β_T は、それぞれ 1.025 および 1.005 とした。

4.1 時定数の設定法の違いによる影響

時定数を一定とした場合と、状態変数の大きさに応じて時定数を変化させた場合について比較、検討を行った結果を Fig. 4 および Fig. 5 に示す。Fig. 4 は T_x , T_y および T_z すべて 50(sec.) で一定とした場合、Fig. 5 は初期時定数 $T_0=50$ (sec.) とし、時定数を状態変数に応じて変化させた場合の結果を示している。ここでは、潮流速 $V_c=3.0$ (knot) とし計算を行った。これらの図を比較すると、Fig. 5 では、加速度の変動がほとんどないために時定数はほぼ 50(sec.) のままで安定しており、Fig. 4 と Fig. 5 とではほとんど違いは見られない。同様に、潮流速を $V_c=4.0$ (knot) とし計算を行った結果を、Fig. 6 および Fig. 7 に示す。Fig. 6 は T_x , T_y および T_z をすべて 50(sec.) で一定とした場合、Fig. 7 は $T_0=50$ (sec.) とし、時定数を状態変数の大きさに応じて変化させた場合の結果を示している。これらの図を比較すると、Fig. 7 では T_x , T_y を約 30(sec.) 程度まで自動的に小さくすることにより、ほぼ滑らかに目標点に収束しているのに対して、Fig. 6 では目標点で安定して定点保持することができず、Fig. 7 の場合に比べて速度、加速度および制御力の変動も大きい。つまり、Fig. 6 に示したように時定数が 50(sec.) で一定のままだと、バージの運動にスラスターの応答がうまく追従できないために、安定した定点保持ができないものと思われる。

Table 1 Principal particulars of the barge

Length	50.0 (m)
Breadth	18.0 (m)
Depth	3.5 (m)
Draft	1.2 (m)
Thrusters	4 × 500 (ps)

Fig. 4 Time histories and trajectory of the barge calculated with fixed T_i

Fig. 5 Time histories and trajectory of the barge calculated with T_i defined automatically

 Fig. 6 Time histories and trajectory of the barge calculated with fixed T_i

 Fig. 7 Time histories and trajectory of the barge calculated with T_i defined automatically

従って、外乱が大きくなると、時定数を一定とした場合では目標点において定点保持するために、設計者が最初から外乱の大きさに応じた最適な時定数の値を与える必要があるのに対して、状態変数の大きさに応じて時定数を変化させた場合には、設計者が設定した初期時定数が最適な値ではない場合でも、自動的に時定数を変化させることにより、効率よく定点保持を行うことができる。

Fig. 7は、時定数を状態変数の大きさに応じて変化させる場合の初期時定数の値を $T_0=50$ (sec.) とした場合の結果であったが、次に、 T_0 の値の違いによる制御性能への影響について検討を行うために、 $T_0=70$ (sec.) および $T_0=90$ (sec.) とした場合の結果をそれぞれ Fig. 8 および Fig. 9 に示す。Fig. 8を見ると、時定数の値が安定するまでは状態変数および制御力の変動が大きいが、約250秒以降は時定数の値が安定し、それに伴って速度、加速度の変動もほとんどなく、位置も滑らかに目標点に収束している。それに対して Fig. 9を見ると、 T_0 が大きすぎるために、状態変数の変動に応じて時定数の値を適切に変化させることができず、目標点において安定して定点保持を行うことができない。従って T_0 の値をあまり大きくとりすぎると、目標点において定点保持するまでに時間がかかったり、時定数の値を状態変数の変動に応じて適切な値に設定することができないために、目標点において定点保持できなくなってしまうものと考えられる。

4.2 外乱の大きさが変化する場合における定点保持性能

実際の作業海域においては、バージが定点保持を行っている時に潮流の流速などの外乱条件が変化する可能性がある。従って、定点保持制御を行っている途中で外乱の大きさが変化する場合に関して、時定数を一定とした場合と、状態変数の大きさに応じて時定数を変化させた場合について検討を行った結果を Fig. 10 および Fig. 11 に示す。Fig. 10は T_x , T_y および T_z をすべて50(sec.) で一定とした場合、Fig. 11は $T_0=50$ (sec.) として、時定数を状態変数の大きさに応じて変化させた場合の結果を示している。ここでは、外乱として初期の潮流速は $V_{c0}=2.0$ (knot) とし、制御開始後300秒後から400秒後の100秒間に流速が仮想的に2.0 (knot) から4.0 (knot) へ変化するものとした。これらの図を比較すると、Fig. 10では、潮流速が増加した後、速度および加速度が変動し続け、位置も目標点において安定することができず、定点保持を行うことができない。これに対し、Fig. 11を見ると、潮流速が増加すると Fig. 10の場合と同様に位置や速度等が変動し始めるが、それら状態変数の変動に応じて時定数が自動的に小さくなっていき、約880秒以降は時定数が安定している。それに伴って速度および加速度もほとんどなく、位置も滑らかに目標点に収束している。また、制御力も約800秒以降はほぼ安定

して発揮されている。従って、定点保持制御を行っている途中で外乱の大きさが変化する場合、時定数が一定のままでは目標点において定点保持し続けることができなくなってしまうことがあるのに対して、時定数を状態変数に応じて変化させた場合には、外乱が大きくなることにより状態変数の変動が生じると、それに伴って自動的に時定数の値が変化し、値が安定した後は再び目標点において定点保持を続けることが可能である。

5. 結 言

本研究では、自航バージが定点保持を行うための制御系をILQ制御理論を適用して設計し、設計パラメータである時定数の設定方法について検討を行った。その結果、時定数を一定とした場合には、外乱の大きさに応じて設計者が試行錯誤を繰り返すことにより最適な時定数の値を選定しなければならないのに対して、状態変数の大きさに応じて時定数を変化させる場合には、時定数の値を自動的に変化させて最適な値を設定することができるために試行錯誤をする必要がなく、容易に制御系を設計できることが分かった。しかし、初期時定数の値をあまり大きくとりすぎると、時定数の値の変化が状態変数の変動にうまく追従できなくなってしまう、目標点において安定して定点保持を行うことができなくなってしまう。従って、初期時定数を設定する際には、スラスタの応答性能も考慮した上で小さい値をとることにより、早く効率よく定点保持を行うことができるものと思われる。

また、定点保持制御を行っている途中で外乱の大きさが変化するような場合、時定数が一定の場合には目標点において定点保持できなくなってしまう場合があるのに対して、状態変数に応じて時定数を変化させる場合には、時定数の値が変化している間は多少の変動が生じるものの、値が安定した後は目標点において定点保持を続けることが可能であることが分かった。

本研究では、時定数の値を状態変数の大きさに応じて、設計者が定めた定数との乗除により求めたため、初期時定数の値が大きい場合には、目標点において安定した定点保持を行うことができなくなってしまう。今後は、初期時定数の違いに影響されることなく、時定数の値を素早く最適な値に安定させる方法について検討を行っていく必要があるものと思われる。

参 考 文 献

- 1) 吉田 巖：橋のはなし(I), 技報堂出版, (1985).
- 2) 藤井隆雄, 水島成人：LQ設計への新しい試み, 計測自動制御学会論文集, Vol. 23, No. 2 (1987), pp. 129-135.
- 3) 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), pp. 717-726.
- 4) 貴島勝郎, 村田 航, 古川芳孝：外乱下における自

 Fig. 8 Time histories and trajectory of the barge calculated with T_i defined automatically

 Fig. 9 Time histories and trajectory of the barge calculated with T_i defined automatically

Fig. 10 Time histories and trajectory of the barge calculated with fixed T_i

Fig. 11 Time histories and trajectory of the barge calculated with T_i defined automatically

航バージの定点保持制御について, 西部造船会々報,
Vol. 92 (1996), pp. 167-179.