

曳航体「FLYING FISH」の H_∞ コントローラーによる 深度制御

横引, 貴史

九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

山口, 悟

九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

小寺山, 亘

九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

中村, 昌彦

九州大学大学院総合理工学研究科大気海洋環境システム学専攻

<https://doi.org/10.15017/16607>

出版情報 : 九州大学大学院総合理工学報告. 22 (3), pp.323-333, 2000-12. 九州大学大学院総合理工学府

バージョン :

権利関係 :

曳航体「FLYING FISH」の H_{∞} コントローラーによる深度制御

横引貴史*・山口悟**
小寺山亘**・中村昌彦**

(2000年8月17日 受理)

Depth Control of Towed Vehicle "FLYING FISH" by H_{∞} Controller

Takashi YOKOBIKI*, Satoru YAMAGUCHI**, Wataru KOTERAYAMA**
and Masahiko NAKAMURA**

A high speed towed vehicle "FLYING FISH" is being developed to measure chemical and physical properties of the ocean. The depth, pitch and roll of FLYING FISH are controlled by a main wing and horizontal tail wings. The roll control is based on the PID control method and the depth and pitch control are based on the LQI (linear quadratic with integral) control method. The LQI controller was designed in consideration of the mathematical model of the towing cable. The experimental results controlled by the LQI controller were successful around the near equilibrium point but it seems that the performance is reduced at far field. The reason is that towing tension is drastically changing with the submerged depth of the vehicle and the linear mathematical model of the towing cable changes from that of equilibrium point.

In this paper, the H_{∞} controller is designed in consideration of the change of the towing tension at the towing point versus submerged depth in order to improve the performance of the depth and pitch control. Some successful experimental results and simulated ones are shown.

1. 緒言

曳航体の潜航深度及び姿勢の制御を行う場合、運動に対する曳航ケーブルの影響が非常に大きく、曳航体と曳航ケーブルのダイナミクスを同時に考慮したコントローラーの設計が望ましいと考えられる。このため、ランプドマス法による曳航ケーブルの運動方程式を含んだ曳航体システムの非線型運動方程式を平衡点(常用曳航状態)回りに線形化し、LQI (linear quadratic with integral) コントローラーの設計を行ない、使用してきた²⁾⁻⁴⁾。ところが、曳航体の場合、平衡状態から潜航深度を大幅に変更すると、曳航ケーブルの形状が大きく変化し、深度変更後のケーブルの線形モデルは平衡状態において線形化した物と非常に異なった物になってしまうことが考えられる。そこで、適当な深度間隔でそれぞれの深度に対応した線形モデルを使ったLQIコントローラーを設計し、潜航深度に応じてコントローラーを順次切り替える方法を提案し、ある程度の成果を得た⁵⁾。しかしながら、この方法では、コントローラーを切り替える際のオブザーバー出力・積分動作の引き継ぎ方法、系の安定性保証等の問題があり、コントローラーの次数もランプドマスの数

に応じて非常に大きな物になってしまう。

本研究では曳航張力の潜航深度に対する変化に注目し、深度に応じて曳航点における曳航張力の水平・垂直方向成分の変化率が変化すると、 H_{∞} 制御による深度コントローラーの設計を行った。これにより大きな深度変更時の安定性が保証され、コントローラーの次数も大きく減少させることが出来る。本手法を曳航体「FLYING FISH」に適用し、実海域実験を行った結果、性能の改善が見られたので結果を報告する。

また、従来のLQIコントローラー⁴⁾では深度センサーノイズに水平尾翼が激しく反応してしまい、一応姿勢制御は可能であったものの、長時間の運行には機械系の負荷を考えると不安があった。さらに、曳航速度を増加させると運動が発散してしまう現象が見られた。そこで本研究ではこれらの改善を同時に試みた。

2. 曳航体「FLYING FISH」の概略

FLYING FISHについてはすでに詳しく報告²⁾³⁾されているので、ここでは概略を述べる。

FLYING FISHは海洋中の流速・水温・塩分・溶存炭素・溶存酸素・濁度・クロロフィル・PHを同時に、実時間で、かつ空間連続的に計測する高速曳航式海洋物理・化学観測ロボットである。これらのいずれの計測項目も鉛直方向のプロファイルが海洋学上重要であり、

*大気海洋環境システム学専攻博士課程

**大気海洋環境システム学専攻

Table 1 Principal features of “Flying Fish”

Operating depth	0~200
Dimensions (L×B×H)	3.84 × 2.26 × 1.40
Weight in air	1300kg
Weight in water	-20kg
Instrumentation	ADCP, CO ₂ , CTD, DO, Turbidity, PH, Chlorophyll
Towing speed	0~120knot
Motion control	Heave, Pitch, Roll

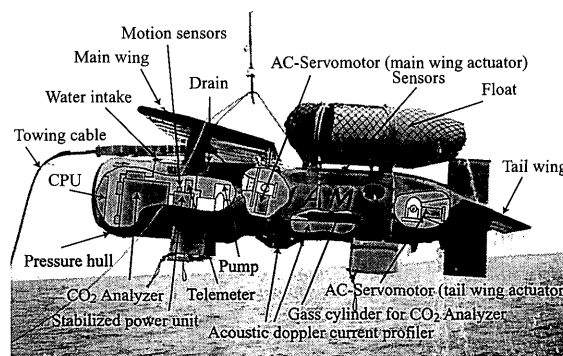


Fig. 2 Vertical view of “Flying Fish”

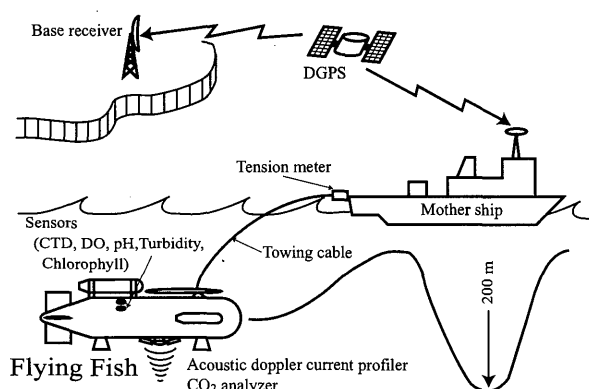


Fig. 1 Conceptual view of Flying Fish system

その為に正確な深度制御が要求される。また、流速の鉛直分布を計測する為の超音波式流速計は計測可能なビーム範囲が400mも有り、動揺によるビーム先端の振れを小さくする為に姿勢安定性が重要である。主要な計測器である溶存炭素分析計は自由表面を有する標準液・反応液の容器を内部に設置している為に、動揺が大きい場合は計測が不可能となる。これらの理由の為に FLYING FISH は高精度の深度・縦揺れ・横揺れ制御を主翼、水平尾翼を使って行う。FLYING FISH の基本性能を **Table 1** に示す。

FLYING FISH の計測概念は **Fig. 1** に示すように、最大12ノットで移動しながら、水面から200mの深度まで（長さ800mの曳航ケーブル使用時）を自由に昇降し（長さ400mの曳航ケーブル使用時は最大潜航深度は80m）、海洋混合層内の面的な計測を行う。FLYING FISH は、曳航体・曳航ケーブル・船上データ入出力装置の各サブシステムから構成される。曳航体には **Fig. 2** に示すように主翼・水平尾翼が有り、その翼角を制御することにより、任意深度を保持しさらに、横傾斜角及び縦傾斜角を常にゼロにするように制御する事ができる。各センサーで計測された量は、曳航ケーブルを介してテレメータで船上に送られ、DGPS で計測した位置と共に表示・記録される。

曳航体は胴体部、主翼、水平・垂直尾翼から成り

(**Fig. 2**)、投入・揚収の容易さを考えて正浮力を持たせている。胴体部は、耐圧部と非耐圧部から構成され、耐圧部に主翼・水平尾翼のコントロール及び収集データの管理を行うCPU、全炭酸分析計とそのための採水装置・内圧調整装置、無停電電源装置、テレメータ等が搭載されている。また、非耐圧部にはそれぞれが小さな耐圧容器に収められた主翼・水平尾翼駆動用モータ、超音波ドップラー式流向流速計（ADCP）、多成分水質計測センサー、全炭酸分析計の為にキャリアガスボンベ等が配置させている。

主翼は深度制御に使用され、水平尾翼は左右それぞれ独立して駆動可能で、左右水平尾翼を同位相で駆動することにより縦揺れを、反位相で駆動することにより横揺れを制御する。水平尾翼による縦揺れ制御と主翼による深度制御は連成が強く精度の良い制御を行う為には多入力多出力系を扱えるコントローラーの設計が不可欠である。コントローラーの実装プログラムは船上から曳航ケーブルの中の信号線を通じて曳航体に搭載されたCPUに伝送され実行される。また深度指令は船上データ入出力装置よりテレメータで曳航体に送られる。

3. 数値シミュレーション及びコントローラー設計の為に数学モデル（運動方程式）

FLYING FISH は横揺れに関しては現時点では PID 制御を用いて、深度及び縦傾斜の制御とは独立に制御している。これは深度及び縦傾斜の制御方法がまだ研究段階である為、制御に失敗し、コントローラーを OFF にした場合でも、安全の為、横揺れだけは独立して制御をかけておきたいからである。縦揺れに関しては曳航点を適切に選ぶことにより制御なしでも安定であるように機体設計がなされている。従って、ここでは縦方向の運動のみを考える。

3.1 曳航ケーブルのランプドマス法による運動方程式

曳航ケーブルの運動方程式はコントローラーの設計

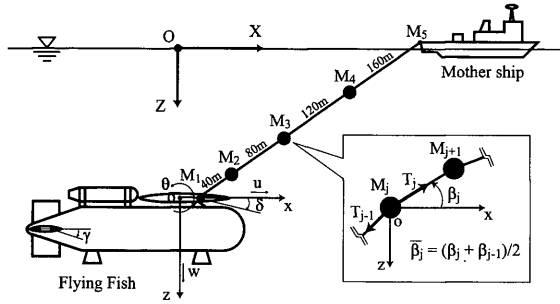


Fig. 3 Coordinate system

に直接使用するわけではないが、3.3節で述べる曳航張力変化率の計算及びシステム全体の挙動シミュレーション計算に必要となるので、簡単に説明する。

ランプドマス法においては、曳航ケーブルは複数個の質点からなり、質点間は自重がない線形バネで結ばれていると近似する。さらに、曳航ケーブルの運動による付加質量力、曳航ケーブルの運動と潮流による抗力などの流体力と重力は各質点に集中して加わると仮定する。詳細な質点の運動方程式は文献[5]にくわしので、ここでは主要な式のみを記す。曳航ケーブルをN個のランプドマスで表したとき、座標系をFig. 3のようにとると、j番目の質点の運動は次式で表せる。

$$\begin{bmatrix} m_{11j} & m_{13j} \\ m_{31j} & m_{33j} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{x}_j \\ \ddot{z}_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xj} \\ F_{zj} \end{bmatrix}$$

$$(j = 2, 3, 4, 5, \dots, N) \quad (1)$$

但し、

$$m_{11j} = M_j + \cos^2 \bar{\beta}_j A_{1j} + (1 - \cos^2 \bar{\beta}_j) A_{nj} \quad (2)$$

$$m_{13j} = m_{31j} = (A_{1j} - A_{nj}) \sin \bar{\beta}_j \cos \bar{\beta}_j \quad (3)$$

$$m_{33j} = M_j + \sin^2 \bar{\beta}_j A_{1j} + \cos^2 \bar{\beta}_j A_{nj} \quad (4)$$

$$F_{xj} = T_j \cos \beta_j - T_{j-1} \cos \beta_{j-1} + f_{dxj} \quad (5)$$

$$F_{zj} = T_j \sin \beta_j - T_{j-1} \sin \beta_{j-1} + f_{dzj} - \delta_j \quad (6)$$

M_j は質点 j の質量、 A_{1j} 、 A_{nj} は接線方向、法線方向の付加質量、 f_{dxj} 、 f_{dzj} は抗力、 δ_j は水中重量であり、 β_j の正弦、余弦は次式で得られる。

$$\sin \beta_j = (z_{j+1} - z_j) / l_j \quad (7)$$

$$\cos \beta_j = (x_{j+1} - x_j) / l_j \quad (8)$$

$$l_j = \sqrt{(x_{j+1} - x_j)^2 + (z_{j+1} - z_j)^2} \quad (9)$$

3.2 曳航体の縦方向運動方程式

座標をFig. 3のように定めると、曳航体の縦運動非線型モデル⁶⁾は次式で表される。但し、付加質量の連成項の影響は小さいとして省略した。 (o, x, z) は曳航体に固定した物体固定座標、 (O, X, Z) は空間固定座標を表している。

$$\begin{bmatrix} m + A_{11} & 0 & mz_G \\ 0 & m + A_{33} & -mx_G \\ mz_G & -mx_G & I_{yy} + A_{55} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \dot{u} \\ \dot{w} \\ \dot{q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_z \\ M_y \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} F_x = & -(m + A_{33})qw + mx_G q^2 - (m - \rho \nabla)g \sin \theta \\ & + X_{uu}'(0.5\rho LD)u^2 + X_{ww}'(0.5\rho LD)w^2 \\ & + X_{\delta\delta}'(0.5\rho u^2 LD)\delta^2 \\ & + X_{rr}'(0.5\rho u^2 LD)\gamma^2 \\ & + X_T \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} F_z = & -mz_G q^2 + (m - \rho \nabla)g \cos \theta \\ & + Z_w'(0.5\rho LD)w^2 + \{Z_q'(0.5\rho u^2 LD)\} \\ & + (m + A_{11})uq + Z_\delta'(0.5\rho u^2 LD)\delta \\ & + Z_\gamma'(0.5\rho u^2 LD)\gamma \\ & + Z_T \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} M_y = & -mz_G qw - (mz_G - \rho \nabla z_B)g \sin \theta - (mx_G - \rho \\ & \nabla x_B)g \cos \theta + M_w^*(0.5\rho u^2 LD)w \\ & + \{M_q'(0.5\rho u^2 LD) - mx_G u\}q \\ & + M_\delta'(0.5\rho u^2 LD)\delta + M_\gamma'(0.5\rho u^2 LD)\gamma \\ & + l_z X_{uu}'(0.5\rho LD)u^2 + X_{rr}'(0.5\rho u^2 LD)\gamma^2 l_z \\ & - x_T Z_T + z_T X_T \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} \dot{Z} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -u \sin \theta + w \cos \theta \\ q \end{bmatrix} \quad (14)$$

但し、添え字 1 は前後揺、3 は上下揺、5 は縦揺を表す。また、

A_{ii} : 付加質量、付加慣性モーメント

D : 耐圧部直径

g : 重力加速度

I_{yy} : 慣性モーメント

L : 曳航体全長

l_z : 物体固定座標原点oから水平尾翼までの鉛直距離

M_w^* 、 X_{uu}' 、 X_{ww}' 、 Z_w' : 速度に関する無次元流体力係数

M_q' 、 Z_q' : 角速度に関する無次元流体力係数

M_δ' 、 $X_{\delta\delta}'$ 、 Z_δ' : 主翼角に関する無次元流体力係数

M_γ' 、 $X_{\gamma\gamma}'$ 、 Z_γ' : 尾翼角に関する無次元流体力係数

m : 曳航体の質量

(o, x, z) : 物体固定座標

(O, X, Z) : 空間固定座標

q : y 軸回りの角速度 (Fig. 3)

U : 曳航体の曳航速度

u, w : x, z 方向の速度 (Fig. 3)

X_T, Z_T : 曳航点における曳航張力の (曳航点に作用する力の) x -, z - 方向成分

(x_B, z_B) : 浮心の座標

(x_G, z_G) : 重心の座標

(x_T, z_T) : 曳航点の座標

θ : オイラー角 (Fig. 3)

δ : 主翼角 (Fig. 3)

γ : 水平尾翼角 (Fig. 3)

ρ : 水の密度

∇ : 曳航体の排水容積

付加質量, 付加慣性モーメント, 各種無次元流体力係数は, 1/7 スケールモデルを使用して, 回流水槽で行われた模型実験より得られた値を使用した。

なお, 上記モデルにおいて, 主翼, 水平尾翼駆動のダイナミクスは次式のように一次遅れで表されるとした。

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\gamma} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_\delta}\delta + \frac{1}{T_\delta}\Delta \\ -\frac{1}{T_\gamma}\gamma + \frac{1}{T_\gamma}\Gamma \end{bmatrix} \quad (15)$$

T_δ, T_γ は主翼, 水平尾翼の時定数であり, Δ, Γ は主翼, 尾翼角指令値である。

3.3 曳航点における曳航張力

5章で示すコントローラーの設計には曳航点における曳航張力の x -, z - 方向成分の変化率が必要になる。この変化率は3.1節に示したランプドマス法によるケーブルの運動方程式と3.2節に示した曳航体の運動方程式を連成させて解くことにより得られる。Fig. 4 に曳航張力の計算精度確認の為にを行った実験結果を示す。曳航点における張力は計測が困難であった為、曳航ケーブル上端における張力の実験値と計算値の比較を行った。曳航ケーブルは長さ400mのものを使用し、曳航速度は6ノットである。計算には、DGPSで計測した母船の平均対地速度をADCPにより計測された実験海域の平均潮流速度で修正した曳航速度 U (=流体との相対速度) を使用している。また、ケーブルはFig. 3に示すように4分割として計算を行った。計算結果は実験結果と非常によく一致し、静的な問題に関しては精度よく数学モデルが構築されていることが検証された。実験結果が計算結果のまわりに多少散らばっているのは、計算に平均曳航速度を使用した為と考えられる。

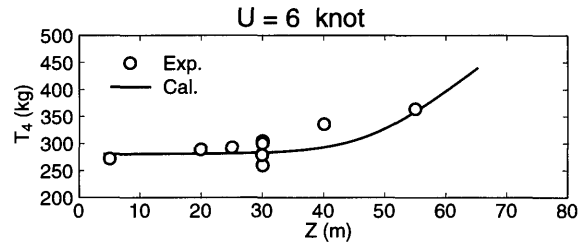


Fig. 4 Towing tension at upper end of cable

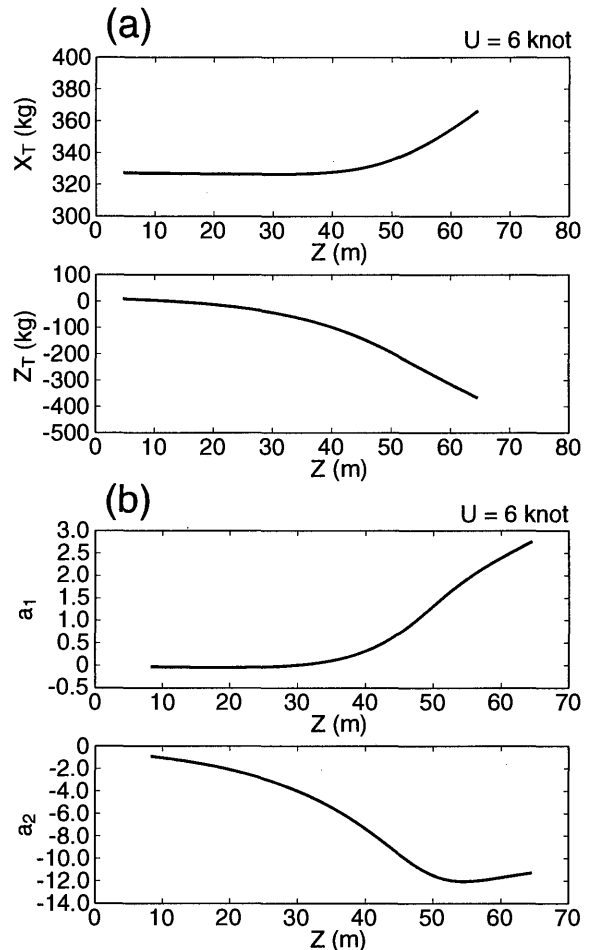


Fig. 5 Towing tension at towing point (a) and derivative (b)

曳航点における曳航張力の x -, z - 方向成分 X_T, Z_T 及びその微係数 a_1, a_2 の計算結果を Fig. 5 (a), (b) に示す。図より曳航張力の x -, z - 方向成分は潜航深度に対して非線形であり、ある深度における深度と張力の関係を

$$W_T(Z) = a_1 Z + b_1 \quad (16)$$

$$Z_T(Z) = a_2 Z + b_2 \quad (17)$$

のように線形化した場合、深度に応じて傾き a_1, a_2

が変化することがわかる。

4. 曳航体の線形モデル

モデルベースのコントローラ設計に必要な線形モデル

$$\dot{\bar{\xi}} = A\bar{\xi} + B\bar{\zeta} \quad (18)$$

$$\bar{\xi} = \xi - \xi^* \quad (19)$$

$$\bar{\zeta} = \zeta - \zeta^* \quad (20)$$

は一般に非線形モデル

$$\dot{\xi} = f(\xi, \zeta) \quad (21)$$

より

$$a_{ij} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial \xi_j} \right|_{\xi=\xi^*, \zeta=\zeta^*} \quad (22)$$

$$b_{ij} = \left. \frac{\partial f_i}{\partial \zeta_j} \right|_{\xi=\xi^*, \zeta=\zeta^*} \quad (23)$$

で得られる。ξは状態変数ベクトル、ζは入力変数ベクトルであり、添え字*は平衡点における値であることを表している。この手法を(10)～(14)式に示した曳航体の非線形モデルに適用すると線形モデルが以下のように求まる。

$$E\dot{x} = A'x + B'u \quad (24)$$

$$y = Cx \quad (25)$$

ここで、xはシステムの状態、uは操作入力、yは観測出力であり、

$$x = \begin{bmatrix} Z - Z^* \\ \theta - \theta^* \\ u - u^* \\ w - w^* \\ q \\ \delta - \delta^* \\ \gamma - \gamma^* \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$u = \begin{bmatrix} \Delta - \Delta^* \\ \Gamma - \Gamma^* \end{bmatrix} \quad (27)$$

$$E = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m + A_{11} & 0 & mz_G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m + A_{33} & -mx_G & 0 & 0 \\ 0 & 0 & mz_G & -mx_G & I_{yy} + A_{55} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

$$A' = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & a_{14} & a_{15} & a_{16} & a_{17} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & a_{25} & a_{26} & a_{27} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & a_{34} & a_{35} & a_{36} & a_{37} \\ a_{41} & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} & a_{46} & a_{47} \\ a_{51} & a_{52} & a_{53} & a_{54} & a_{55} & a_{56} & a_{57} \\ a_{61} & a_{62} & a_{63} & a_{64} & a_{65} & a_{66} & a_{67} \\ a_{71} & a_{72} & a_{73} & a_{74} & a_{75} & a_{76} & a_{77} \end{bmatrix} \quad (29)$$

$$a_{11} = a_{13} = a_{15} = a_{16} = a_{17} = 0$$

$$a_{12} = -u^*$$

$$a_{14} = 1$$

$$a_{21} = a_{22} = a_{23} = a_{24} = a_{26} = a_{27} = 0$$

$$a_{25} = 1$$

$$a_{34} = a_{35} = 0$$

$$a_{31} = a_1$$

$$a_{32} = -(m - \rho \nabla) g$$

$$a_{33} = \rho LDX_{uu}' u^* + \rho LDX_{\delta\delta}' u^* (\delta^*)^2 + \rho LDX_{\gamma\gamma}' u^* (\gamma^*)^2$$

$$a_{36} = \rho LDX_{\delta\delta}' (u^*)^2 \delta^*$$

$$a_{37} = \rho LDX_{\gamma\gamma}' (u^*)^2 \gamma^*$$

$$a_{41} = a_2$$

$$a_{42} = 0$$

$$a_{43} = \rho LDZ_{\delta}' u^* \delta^* + \rho LDZ_{\gamma}' u^* \gamma^*$$

$$a_{44} = 0.5 \rho LDZ_w' u^*$$

$$a_{45} = 0.5 \rho L^2 DZ_q' u^* + (m + A_{11}) u^*$$

$$a_{46} = 0.5 \rho LDZ_{\delta}' (u^*)^2$$

$$a_{47} = 0.5 \rho LDZ_{\gamma}' (u^*)^2$$

$$a_{51} = z_T a_1 - x_T a_2$$

$$a_{52} = -(mz_G - \rho \nabla z_B) g$$

$$a_{53} = \rho L^2 DM_{\delta}' u^* \delta^* + \rho L^2 DM_{\gamma}' u^* \gamma^* + \rho LDX_{uu}' l_2 u^* + \rho LDX_{\gamma\gamma}' l_2 u^* (\gamma^*)^2$$

$$a_{54} = 0.5 \rho L^2 DM_w' u^*$$

$$a_{55} = 0.5 \rho L^3 DM_q' u^* - mx_C u^*$$

$$a_{56} = 0.5 \rho L^3 DM_{\delta}' (u^*)^2$$

$$a_{57} = 0.5 \rho L^2 DM_{\gamma}' (u^*)^2 + \rho LDX_{\gamma\gamma}' (u^*)^2 \gamma^* l_2$$

$$a_{61} = a_{62} = a_{63} = a_{64} = a_{65} = a_{67} = 0$$

$$a_{66} = -1/T_{\delta}$$

$$a_{71} = a_{72} = a_{73} = a_{74} = a_{75} = a_{76} = 0$$

$$a_{77} = -1/T_{\gamma}$$

$$B' = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1/T_\delta & 0 \\ 0 & 1/T \end{bmatrix} \quad (30)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (31)$$

以前の研究²⁾⁻⁴⁾では、平衡状態における曳航速度での有次元流体力係数を使用した運動方程式を線形化してコントローラーを設計していた。つまり、たとえば(12)式の中で $Z'_\delta(0.5\rho u^2 LD)$ は主翼の揚力に関する有次元流体力係数であるが、 u の値として平衡状態における曳航速度を代入し定数係数として線形モデルを得ていた。本論手法では $Z'_\delta(0.5\rho u^2 LD)$ を u で偏微分し((22), (23)式参照)平衡状態における値を代入することにより、流体力係数の速度による変化分を考慮することにする。これにより速度変化に対するコントローラーのロバスト性が向上するものと考えられる。

5. H_∞ コントローラーの設計

コントローラーの目標は、

- ・ 常用曳航速度 (6 ノット) に対して400mの曳航ケーブルを用いた場合の潜航可能範囲 (0 m ~ 60m) の全領域において、深度変更時、設定深度に対してのオーバーシュートがない、精度の良い深度制御が可能なこと。
- ・ 潜航可能範囲の全領域において、深度変更時においても縦傾斜角を精度よく0度に保持可能なこと。
- ・ 深度のセンサーノイズに対して水平尾翼が反応して激しく動かないこと。
- ・ 曳航速度変化に対してもある程度のロバスト性を持つこと。

である。

3.3節で示した、曳航点における曳航張力の x -, z -方向成分の深度に対する微係数 a_1 , a_2 の変動を考慮すると、前章に示した線形モデルより a_1 , a_2 がアフィンに入る次の線形モデルを得る⁷⁾。

$$\begin{aligned} \dot{x} &= E^{-1}(A'_0 + a_1 A'_{a_1})x + E^{-1}B'u \\ &= (A_0 = a_1 A_{a_1} = a_2 A_{a_2})x + Bu \\ &= A(a_1, a_2)x = Bu \end{aligned} \quad (32)$$

但し、

$$A_0^x = \begin{bmatrix} a_{011} & a_{012} & a_{013} & a_{014} & a_{015} & a_{016} & a_{017} \\ a_{021} & a_{022} & a_{023} & a_{024} & a_{025} & a_{026} & a_{027} \\ a_{031} & a_{032} & a_{033} & a_{034} & a_{035} & a_{036} & a_{037} \\ a_{041} & a_{042} & a_{043} & a_{044} & a_{045} & a_{046} & a_{047} \\ a_{051} & a_{052} & a_{053} & a_{054} & a_{055} & a_{056} & a_{057} \\ a_{061} & a_{062} & a_{063} & a_{064} & a_{065} & a_{066} & a_{067} \\ a_{071} & a_{072} & a_{073} & a_{074} & a_{075} & a_{076} & a_{077} \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$a_{11} = a_{13} = a_{15} = a_{16} = a_{17} = 0$$

$$a_{12} = -u^*$$

$$a_{14} = 1$$

$$a_{21} = a_{22} = a_{23} = a_{24} = a_{26} = a_{27} = 0$$

$$a_{25} = 1$$

$$a_{31} = a_{34} = a_{35} = 0$$

$$a_{32} = -(m - \rho \nabla)g$$

$$a_{33} = \rho LDX_{uu}'u^* + \rho LDX_{\delta\delta}'u^*(\delta^*)^2 + \rho LDX_{\gamma\gamma}'u^*(\gamma^*)^2$$

$$a_{36} = \rho LDX_{\delta\delta}'(u^*)^2\delta^*$$

$$a_{37} = \rho LDX_{\gamma\gamma}'(u^*)^2\gamma^*$$

$$a_{41} = a_{42} = 0$$

$$a_{43} = \rho LDZ'_\delta u^*\delta^* + \rho LDZ'_\gamma u^*\gamma^*$$

$$a_{44} = 0.5\rho LDZ'_w u^*$$

$$a_{45} = 0.5\rho L^2 DZ'_q u^* + (m + A_{11})u^*$$

$$a_{46} = 0.5\rho LDZ'_\delta (u^*)^2$$

$$a_{47} = 0.5\rho LDZ'_\gamma (u^*)^2$$

$$a_{51} = 0$$

$$a_{52} = -(mz_G - \rho \nabla z_B)g$$

$$a_{53} = \rho L^2 DM'_\delta u^*\delta^* + \rho L^2 DM'_\gamma u^*\gamma^* + \rho LDX_{uu}'l_z u^* + \rho LDX_{\gamma\gamma}'l_z u^*(\gamma^*)^2$$

$$a_{54} = 0.5\rho L^2 DM'_w u^*$$

$$a_{55} = 0.5\rho L^3 DM'_q u^* - mx_G u^*$$

$$a_{56} = 0.5\rho L^3 DM'_\delta (u^*)^2$$

$$a_{57} = 0.5\rho L^3 DM'_\gamma (u^*)^2 + \rho LDX_{\gamma\gamma}'(u^*)^2\gamma^* l_z$$

$$a_{61} = a_{62} = a_{63} = a_{64} = a_{65} = a_{67} = 0$$

$$a_{66} = -1/T_\delta$$

$$a_{71} = a_{72} = a_{73} = a_{74} = a_{75} = a_{76} = 0$$

$$a_{77} = -1/T_\gamma$$

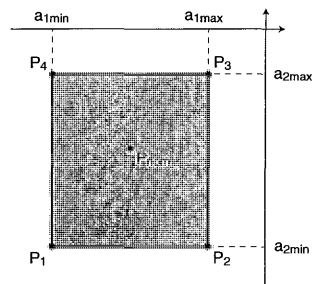


Fig. 6 Parameter box of a_1 , a_2

$$A_{a1}' = \left[\begin{array}{cc|ccc|cc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ z_T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (34)$$

$$A_{a2}' = \left[\begin{array}{cc|ccc|cc} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -x_T & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} \right] \quad (35)$$

Fig. 5 (b) より a_1, a_2 の最小値, 最大値を $a_{1min}, a_{2min}, a_{1max}, a_{2max}$ とすると Fig. 6 に示す端点 $p_1 (a_{1min}, a_{2min}), p_2 (a_{1max}, a_{2min}), p_3 (a_{1max}, a_{2max}), p_4 (a_{1min}, a_{2max})$ で囲まれたパラメータボックスが得られる. 代表点として $p_{nom} (a_{1nom}, a_{2nom})$ をとると, これらによる行列 $A (a_1, a_2)$ の端点表現として

$$A(a_1, a_2) = p_1 A_1 + p_2 A_2 + p_3 A_3 + p_4 A_4 \quad (36)$$

$$p_1 = \frac{(a_{1nom} - a_{1min})(a_{2max} - a_{2nom})}{(a_{1max} - a_{1min})(a_{2max} - a_{2min})} \quad (37)$$

$$p_2 = \frac{(a_{1max} - a_{1nom})(a_{2max} - a_{2nom})}{(a_{1max} - a_{1min})(a_{2max} - a_{2min})} \quad (38)$$

$$p_3 = \frac{(a_{1nom} - a_{1min})(a_{2nom} - a_{2min})}{(a_{1max} - a_{1min})(a_{2max} - a_{2min})} \quad (39)$$

$$p_4 = \frac{(a_{1max} - a_{1nom})(a_{2nom} - a_{2min})}{(a_{1max} - a_{1min})(a_{2max} - a_{2min})} \quad (40)$$

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1 \quad (41)$$

を得る. A_1, A_2, A_3, A_4 は, Fig. 6 における端点 P_1, P_2, P_4, P_3 における a_1, a_2 の値を用いた $A (a_1, a_2)$ である. また, 該当パラメータボックスの任意の点に対応する線形モデル (32), (25) においては

$$\begin{bmatrix} A & B \\ C & 0 \end{bmatrix} = p_1 S_1 + p_2 S_2 + p_3 S_3 + p_4 S_4 \quad (42)$$

$$S_i = \begin{bmatrix} A_i & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \quad (j = 1, \dots, 4) \quad (43)$$

となり, これらの無数の線形モデルを, 固定コント

ローラー

$$\dot{x}_K = A_K x_K + B_K y' \quad (44)$$

$$u = C_K x_K + D_K y' \quad (45)$$

で安定化を行うのがここでの制御問題である. そこで, 多モデル・多仕様に対応できる LMI (Linear Matrix Inequalities) ベース設計法の適用を試みた. これはいまの場合, 4つの端点モデルの同時設計を行うだけで, Fig. 6 の四角形パラメータボックスの任意の点をカバーできる特徴を持つ. このコントローラーは

$$S_i = \begin{bmatrix} A_K & B_K \\ C_K & D_K \end{bmatrix} = p_1 S_{K1} + p_2 S_{K2} + p_3 S_{K3} + p_4 S_{K4} \quad (46)$$

$$S_{Ki} = \begin{bmatrix} A_{Ki} & B_K \\ C_K & D_K \end{bmatrix} \quad (j = 1, \dots, 4) \quad (47)$$

のように構成する. 各端点コントローラーには次の仕様を与える.

(1) できるだけ小さな $\gamma > 0$ に対して, Fig. 7 に示す H_∞ コントロールシステム相互結合系における $[Z_c \ Z_{noise}]^T$ から $[z_1 \ z_2 \ z_3 \ z_4]^T$ までの伝達関数の H_∞ ノルムを最小にする.

$$\left\| T \begin{bmatrix} Z_c \\ Z_{noise} \end{bmatrix} \rightarrow \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \right\| < \gamma \quad (48)$$

(2) 閉ループ系の極が含まれる極領域は原点を中心とする半径10の左半円とする.

H_∞ コントロールシステムの相互結合系 Fig. 7 において, Z_c は深度の定置目標入力, Z_{noise} は深度セン

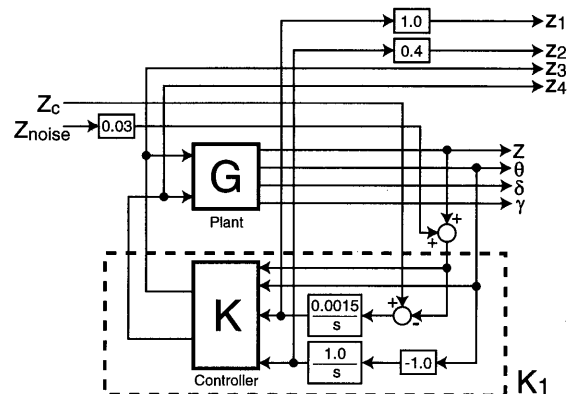


Fig. 7 Interconnection structure of H_∞ control system

サーのノイズ, G はプラント, K はコントローラーであり, システムは誤差の積分動作を含む. 各端点について, 上の仕様を LMI 表現し, これらを連立させて, 端点コントローラーのパラメータと γ を決定変数とする線形目的関数の最小化⁷⁾を, Matlab の LMI Control Toolbox[®]を用いて行った. (46) 式から決定したコントローラーは状態空間表現に直され, 離散化することにより実装される. 離散化のタイムステップは使用する AD・DA 変換器の性能や CPU の能力, 観測データ処理にかかる負荷の大きさによって決まり, FLYING FISH の場合0.05秒である. 閉ループ系の極が含まれる極領域の制約は, コントローラーの極が大きいと, ハイゲインの為ノイズを増幅してしまい, スタートアップができなくなるのを防ぐ為に必要である.

観測は400mの曳航ケーブルを使用し, 曳航速度6ノット, 常用潜航深度30mで行われる予定であったので, 代表点として深度30mを選んでコントローラーを設計した. Fig. 5 (b) に示した a_1, a_2 の値が Z の関数として表現可能ならば, 深度により時々刻々変化する a_{1nom}, a_{2nom} の値が計算でき, 時々刻々コントローラーのパラメータが変化するゲインスケジュールド H_∞ 制御が可能となる. さらに深度制御の性能が向上すると考えられるが, 実装プログラムの大幅な変更が必要になる為, 今後の課題とした.

6. 実験結果

実験は1998年6月, 日本海若狭湾沖で, FLYING FISH を北西に向かって曳航し行われた.

Fig. 8 に FLYING FISH の深度変更時の深度, 縦揺角の時系列を, Fig. 9 に主翼角, 水平尾翼角, 曳航張力の平衡状態 (初期状態) からの偏差時系列を示す. 細い実線が実験結果, 太い破線がシミュレーション結果を表している. 実験は400mの曳航ケーブルを使用し, 曳航速度6ノットで実施された. この条件の場合, 最大潜行可能深度は約60mである. 深度指令は50秒おきの5mステップコマンドを5回繰り返し深度30mから55mへ潜行, 深度が55mで整定した後50秒おきの-5mステップコマンドを5回繰り返し深度30mへ上昇, 深度が30mで整定した後50秒おきの5mステップコマンドを5回繰り返し深度5mへ上昇, さらに, 深度が5mで整定した後50秒おきの-5mステップコマンドを5回繰り返し深度30mへ潜行というものである. これは曳航体システムの挙動は非線形性が非常に強く, 線形コントローラーでは一度に±25mのステップ指令を与えるのが不可能な為の処置である. ランプ状または正弦状の深度指令を与えることも可能であるが, 実装プログラムの大幅な変更を必要とし, コントロールがうまく行かなかった場合, 新しいコントローラーに

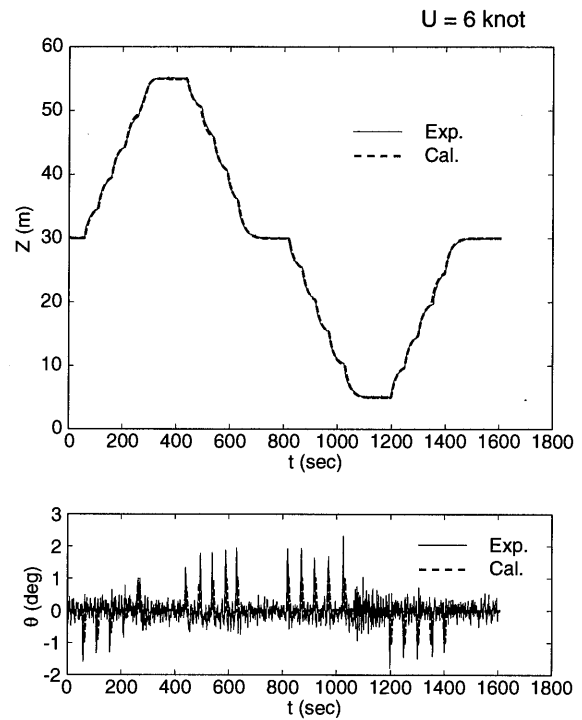


Fig. 8 Motion of Flying Fish in depth change

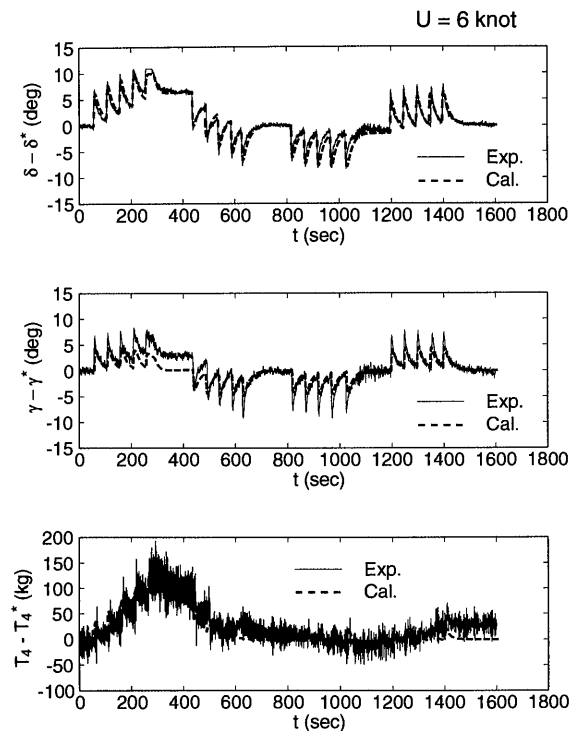


Fig. 9 Main wing angle and tail wing angle of Flying Fish and towing tension in depth change

問題があるのか実装プログラムのバグなのかを見つけるのが船上では非常に困難である為, 次回の課題とした. Fig. 8 より深度変更はスムーズに行われ, 目標深度である55m, 5m地点でオーバーシュートがまったく見られないことがわかる. 深度のステップコマンド

が入力された直後は主翼が大きく動く為、縦揺が若干生じるが、最大±2度と非常に小さく、コントローラーが非常にうまく働いていることがわかる。深度が整定した後は縦揺角の変動はわずか±0.5度である。

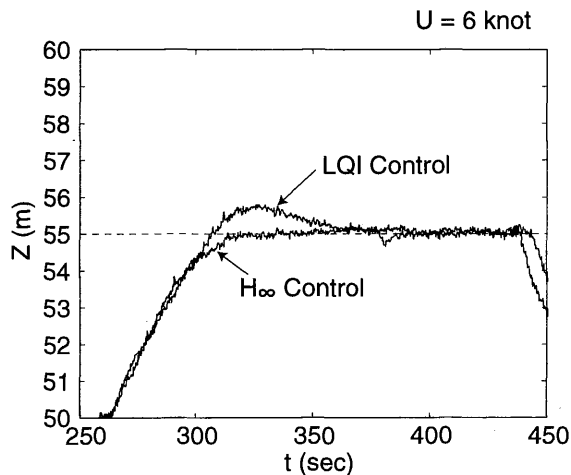


Fig. 10 Submerged depth of Flying Fish

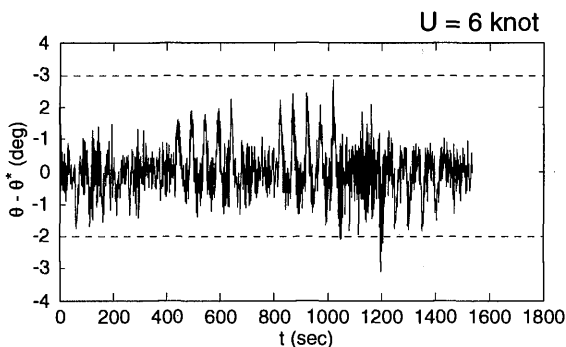


Fig. 11 Pitching of Flying Fish in depth change (LQI Control)

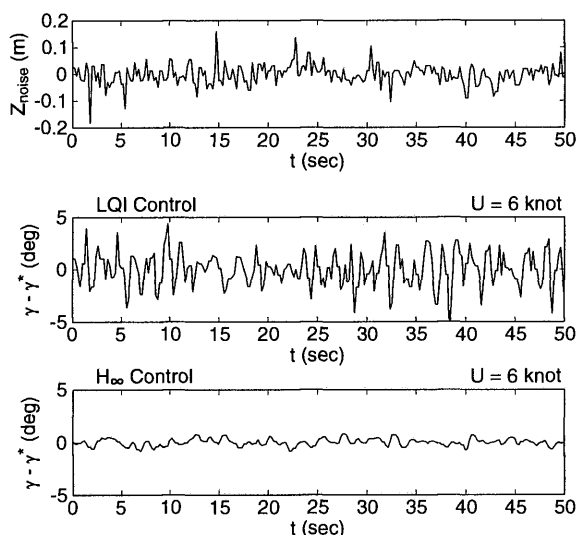


Fig. 12 Depth sensor noise and tail wing angle

またシミュレーション結果は実験とよく一致し、動的な問題に対しても曳航体システムの数学モデルが精度よく構築されていることが確認できた。なお、実験中 ADCP の調子が悪く潮流速度の計測ができなかった為、シミュレーションにおける曳航速度は曳航母船の DGPS による平均船速を使用し、潮流速度を使った修正は行っていない。深度のステップコマンドが入力された直後の縦揺の計算結果が実験結果よりわずかに小さいがこれは主翼が動くことによって発生するモーメント²³⁾を数学モデルに取り入れることで解決できると思われる。

Fig. 9 に示した主翼角変化の計算結果は実験と非常によく一致している。水平尾翼角もよく一致しているが、深度のステップコマンドが入力された直後の動きの計算結果が実験結果よりわずかに小さい。実験では主翼が動くことによって発生するモーメントを水平尾翼が打ち消すように動く為、水平尾翼の動きが計算結果より大きくなっていると考えられる。差はわずかであるので、コントローラーの設計時には主翼が動くことによって発生するモーメントは考慮せず、シミュレーション計算だけに取り入れ計算精度の向上を図りたい。350秒付近で計算結果と実験結果の差が生じているのは、潜航深度、主翼角、曳航張力の計算結果が実験とよく一致していることを考えると、曳航体に何らかの縦揺モーメントが外乱として働いたものと思われる。最大潜航深度付近であることを考えると、曳航金具と主翼との接触が原因の一つと推測される。曳航張力の変化も計算は実験と非常によく一致している。実験の最後1400秒付近から曳航深度が最初の30mと同じであるにもかかわらず曳航張力が増しているのは実験海域の流場の変動が原因と思われる。

Fig. 10 に曳航体が設定最大深度に達し、整定するまでの深度時系列を拡大して示す。LQI 制御ではオーバーシュートが見られるが、 H_{∞} 制御ではオーバーシュートなく、整定時間も短いことがわかる。800m の曳航ケーブルを使用し最大潜航深度を200m とする場合、LQI 制御との性能の差はもっと大きくなり、 H_{∞} 制御が不可欠になると思われる。

Fig. 11 は LQI 制御により Fig. 8 上図と同じ深度変更を行った場合の縦揺である。Fig. 8 下図と比べると、定常曳航時の縦揺が約2倍ぐらい大きく、深度のステップコマンドが入力された直後の縦揺も大きい。Fig. 12 は30m の潜行深度を保持して定常曳航中の尾翼の動きを LQI 制御と比べた結果である。図は上から深度センサーのノイズ、LQI 制御による水平尾翼の動き、 H_{∞} 制御による水平尾翼の動きを示している。深度センサーノイズは曳航体を陸上で固定して(深度 0 m) 得られた計測結果である。LQI 制御による水平

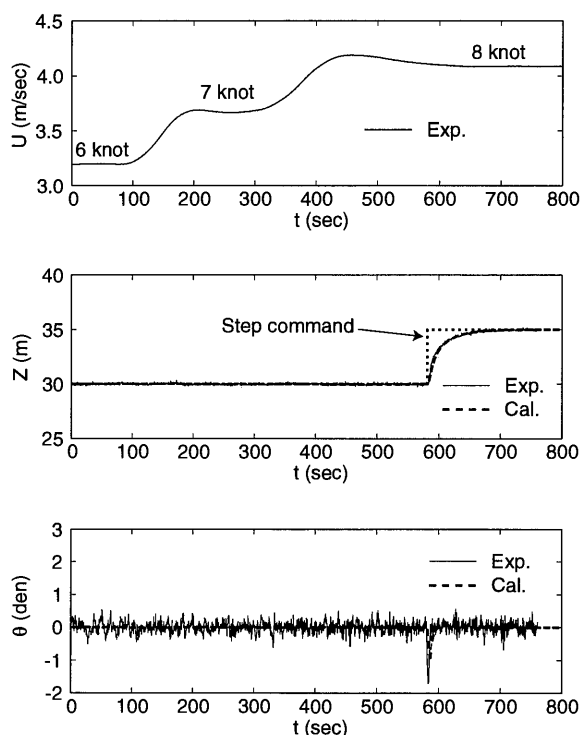


Fig. 13 Speed of mother ship, submerged depth and pitching angle of Flying Fish ($U = 6\text{knot} \rightarrow 7\text{knot} \rightarrow 8\text{knot}$)

尾翼の動きはセンサーノイズと同じ周波数帯域であることがフーリエ解析によりわかっている。現代制御では深度を含めたすべての状態変数を使用し水平尾翼角を計算する。また、コントローラーの次数を下げる為最小次元オブザーバーを使用したコントローラーでは深度ノイズが直接コントローラーに入力されることになる。よって以前のコントローラーでは深度センサーのノイズが尾翼の動きに反映してしまったと考えられる。 H_∞ 制御ではセンサーのノイズ成分の動きは非常に小さく、初期の目的に合ったコントローラーが設計されたことがわかる。

実際の観測中（曳航中）は流場の変動により曳航母船の対地速度が一定でも曳航体とまわりの流体との相対速度が変化し、コントローラーの設計速度から離れてしまう状況が考えられる。また、観測中曳航速度はある程度変更できることが曳航体の運行上望ましい。そこで曳航速度変更実験を行って曳航速度変動に対するコントローラーの性能を調べた。

曳航速度を6ノットから7ノット、8ノットへと増速した場合の実験結果、シミュレーション結果を Fig. 13, 14 に示す。シミュレーションではDGPSにより得られた時々刻々変化する曳航母船の位置（速度）を計算に使用している。また、この実験の直後に ADCP による流速データが得られたので、潮流速度の平均値を使用し曳航速度を修正している。曳航速度を6ノットから約33%増して8ノットとしても、コント

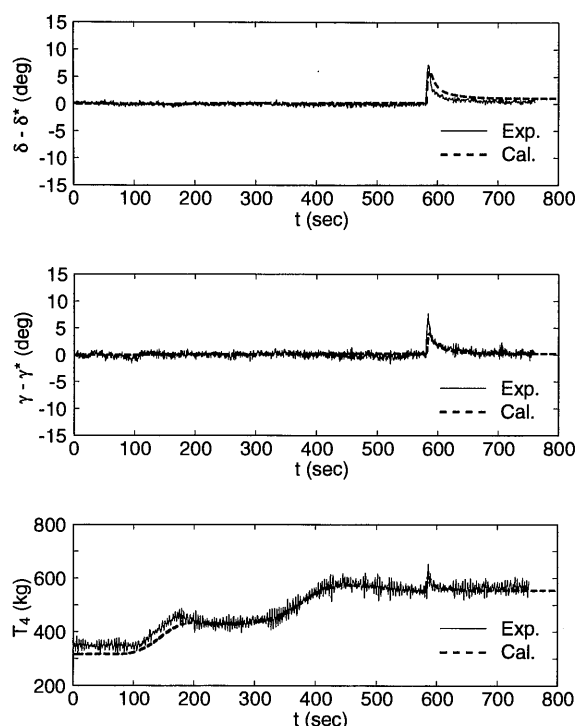


Fig. 14 Main wing angle, tail wing angle and towing tension of Flying Fish ($U = 6\text{knot} \rightarrow 7\text{knot} \rightarrow 8\text{knot}$)

ローラーは曳航体の運動を發散させることなく一定深度30m、縦傾斜角0度をよく保っており、速度変動に対するロバスト性能が優秀であることがわかる。実験時間の都合で大きな深度変更はできなかったが、600秒付近で5mの深度変更指令が入力されている。指令入力後の応答も極めて安定していることがわかる。

7. 結 言

翼制御型曳航体の深度・縦傾斜制御用 H_∞ コントローラーを設計し、海上実験を行った結果、以下の結論を得た。

(1) 本論文で提案した手法による H_∞ コントローラーは広範囲の深度領域において、深度のオーバーシュートがない、精度の良い深度・縦傾斜制御が可能であり、LQI 制御に比べ優れた性能を示す。

(2) 最小次元オブザーバーを使用した LQI 制御に比べ、本論文で提案した手法による H_∞ コントローラーでは、深度のセンサーノイズに対して水平尾翼が激しく反応することなく、駆動部分への悪影響が少ない為、長時間の観測が可能である。

(3) 曳航速度を設計速度から約30%増速しても安定した曳航及び深度・縦傾斜制御が可能である。

現在旋回時における横方向の運動に対する研究が進行中であり、横方向の数学モデルの精度が検証されつつある。今後、横方向の運動による曳航張力の変化を考慮したパラメーターボックスを考え、旋回中にお

る深度変更を性能よく実行するコントローラーの設計を試みたい。またより大きな曳航速度変化に対応できるコントローラーについても研究を続けていきたい。

謝 辞

コントローラーの設計に当たり九州大学工学研究院の梶原宏之先生（研究当時九州工業大学）には貴重なご助言・ご協力をいただきました。また実海域実験では長崎大学・鶴洋丸のクルーの皆様と応用力学研究所の安部、北氏の全面的なご協力を得ました。ここに深く感謝の意を表します。

参 考 文 献

- 1) 小寺山亘, 経塚雄策, 中村昌彦, 大楠丹, 柏木正: 海洋観測用曳航体の開発研究 (第一報 曳航体の運動と制御について), 日本造船学会論文集, 第163号 (1988), pp130-140.
- 2) 小寺山亘, 山口悟, 中村昌彦, 赤松毅人: 海洋環境総合観測ロボット「FLYING FISH」の開発研究, 日本造船学会論文集, 第179号 (1996), pp196-204.
- 3) W. koterayama, S. Yamaguchi, M. Nakamura, A. Moriyama, T. Akamatsu: A Numerical Study for Design of Depth, Pitch and Roll Control System of a Towed Vehicle, Proceedings of the Fourth International Offshore and Polar Engineering Conference (1994), pp337-344.
- 4) S. Yamaguchi, T. Yokobiki, W. koterayama: Field Experiments on Motion Control Systems of the Towed Vehicle "Flying Fish", Proceedings of the Eighth International Offshore and Polar Engineering Conference (1998), pp271-276.
- 5) 小寺山亘, 中村昌彦, 梶原宏之, 佐藤一身: 広域海底探査用 ROV の開発研究, 日本造船学会論文集, 第175号 (1994), pp205-218.
- 6) 大楠丹, 柏木正, 小寺山亘: Towed Vehicleの動力学に関する基礎的研究, 日本造船学会論文集, 第162号 (1987), pp99-109.
- 7) H. Kajiwara, W. Koterayama, M. Nakamura, S. Yuga-wa: LMI-Based Design of Robust Controllers for an Underwater Vehicle, Proceedings of the Seventh International Offshore and Polar Engineering Conference (1997), pp51-56.
- 8) P. Gahinet, et al.: LMI Control Toolbox, The Math-Works (1995).