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ッ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となってしまう.

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して,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²⁰³¹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ィ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

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

 Table 1
 Principal features 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・横揺制御 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 Vertical view of "Flying Fish"

(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,テレメーター 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,全炭酸分析計の為のキャリ 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を,反位相で駆動することにより 横揺を制御する.水平尾翼による縦揺制御と主翼によ 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ターで曳航体に送られ る.

数値シミュレーション及びコントロー ラー設計の為の数学モデル(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

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[®]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.

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

$$F_{x} = -(m + A_{33}) qw + mx_{G}q^{2} - (m - \rho \nabla) g \sin\theta + X_{uu}'(0.5\rho LD) u^{2} + X_{ww}'(0.5\rho LD) w^{2} + X_{\delta\delta}'(0.5\rho u^{2}LD) \delta^{2} + X_{\tau\tau}'(0.5\rho u^{2}LD) \gamma^{2} + X_{\tau}$$
(11)

$$F_{z} = -m_{zG}q^{2} + (m - \rho \nabla)g\cos\theta + Z_{w}'(0.5\rho uLD)w^{2} + \{Z_{q}'(0.5\rho uL^{2}D) + (m + A_{11})u\}q + Z_{\delta}'(0.5\rho u^{2}LD)\delta + Z_{r}'(0.5\rho u^{2}LD)\gamma + Z_{T}$$
(12)

$$M_{y} = -mz_{G}qw - (mz_{G} - \rho \nabla z_{B})g \sin\theta - (mx_{G} - \rho \nabla x_{B})g \cos\theta + M_{w}*'(0.5\rho uL^{2}D)w + \{M_{q}'(0.5\rho uL^{3}D) - mx_{G}u\}q + M_{\delta}'(0.5\rho u^{2}L^{2}D)\delta + M_{r}'(0.5\rho u^{2}L^{2}D)\gamma + l_{z}X_{uu}'(0.5\rho LD)u^{2} + X_{rr}'(0.5\rho u^{2}LD)\gamma^{2}l_{z} - x_{T}Z_{T} + z_{T}X_{T}$$
(13)

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

Aii: 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

- *Iyy*: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*_{δδ}', *Z*_δ':主翼角に関する無次元流体力係数

M_r', *X_{rr}*', *Z_r*': 尾翼角に関する無次元流体力係数

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.

$$\begin{bmatrix} m_{11j} & m_{13j} \\ m_{31j} & m_{33j} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} \ddot{x}_j \\ \ddot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{xj} \\ F_{zj} \end{bmatrix}$$
$$(j = 2, 3, 4, 5, \dots, N)$$
(1)

但し,

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

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

 $m_{33j} = M_j + \sin^2 \bar{\beta}_j A_{tj} + \cos^2 \bar{\beta}_j A_{nj} \tag{4}$

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

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

 M_{j} は質点 j の質量, A_{ij} , 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_{i} の正弦, 余弦は次式で得られる.

$$\sin\beta_i = (z_{i+1} - z_i)/l_i \tag{7}$$

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

$$l_{j} = \sqrt{(x_{j+1} - x_{j})^{2} + (z_{j+1} - z_{j})^{2}}$$
(9)

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
- マ: 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 ダイナミックスは次式のように一次遅れで表されると した.

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

 T_{δ}, T_{τ} 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.



derivative (b)

曳航点における曳航張力の x-, z- 方向成分 XT, ZT 及びその微係数a₁, a₂ 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

$$W_T(Z) = a_1 Z + b_1 \tag{16}$$

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

のように線形化した場合,深度に応じて傾き a1, a2

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ー設計に必要な線形モ デル

$$\dot{\bar{\xi}} = A\bar{\xi} + B\bar{\xi} \tag{18}$$

$$\bar{\xi} = \xi - \xi^* \tag{19}$$

$$\bar{\zeta} = \zeta - \zeta^* \tag{20}$$

は一般に非線形モデル

$$\dot{\xi} = f(\xi, \varsigma) \tag{21}$$

より

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

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

で得られる. <は状態変数ベクトル, くは入力変数ベ 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.

 $E\dot{x} = A'x + B'u \tag{24}$

$$y = Cx \tag{25}$$

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,

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

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

	[1]	0	0	0	0	0	0]
	0	1	0	0	0	0	0
	0	0	$m + A_{11}$	0	mz_G	0	0
E =	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
							(28)

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

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

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

$$a_{14} = 1$$

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

$$a_{25} = 1$$

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

$$a_{31} = a_1$$

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

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

$$(\gamma^*)^2$$

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

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

$$a_{41} = a_2$$

$$a_{42} = 0$$

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

$$a_{44} = 0.5\rho LDZ_{\delta}'(u^*)^2$$

$$a_{45} = 0.5\rho LDZ_{\delta}'(u^*)^2$$

$$a_{51} = z_{\tau}a_1 - x_{\tau}a_2$$

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

$$a_{53} = \rho L^2DM_{\delta}'u^* \delta^* + \rho LDM_{\tau}'u^* \gamma^* + \rho LDX_{uu}'l_zu^*$$

$$+ \rho LDX_{\tau\tau}'l_zu^* (\gamma^*)^2$$

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

$$a_{55} = 0.5\rho L^3DM_{\delta}'(u^*)^2$$

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

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

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

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

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

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(0m~ 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 a₁, a₂ の変動を考慮 すると,前章に示した線形モデルより a₁, a₂ がア フィンに入る次の線形モデルを得るⁿ.

$$\dot{x} = E^{-1} (A'_0 + a_1 A'_{a2}) x + E^{-1} B' u$$

= $(A_0 = a_1 A_{a1} = a_2 A_{a2}) x + B u$
= $A (a_1, a_2) x = B u$ (32)

但し,

$$A_{0}^{*} = \begin{bmatrix} a_{011} & a_{012} & a_{013} & a_{014} & a_{015} & a_{016} & a_{017} \\ a_{021} & a_{022} & a_{023} & a_{024} & a_{025} & a_{026} & a_{027} \\ a_{031} & a_{032} & a_{033} & a_{034} & a_{035} & a_{036} & a_{037} \\ a_{041} & a_{042} & a_{043} & a_{044} & a_{045} & a_{046} & a_{047} \\ a_{051} & a_{062} & a_{053} & a_{054} & a_{055} & a_{056} & a_{057} \\ a_{061} & a_{062} & a_{063} & a_{064} & a_{065} & a_{066} & a_{067} \\ a_{071} & a_{072} & a_{073} & a_{074} & a_{075} & a_{076} & a_{077} \end{bmatrix}$$

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

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

$$a_{14} = 1$$

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

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

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

$$(\gamma^{*})^{2}$$

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

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

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

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

$$a_{45} = 0.5\rho LDZ_{o}' u^{*} + (m + A_{11}) u^{*}$$

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

$$a_{51} = 0$$

$$a_{52} = -(mz_{G} - \rho \nabla z_{B})g$$

$$a_{53} = \rho L^{2} DM_{\delta}' u^{*} \delta^{*} + \rho L^{2} DM_{\tau}' u^{*} \gamma^{*} + \rho LDX_{uu}' l_{z}u^{*}$$

$$+ \rho LDX_{\tau\tau}' l_{z}u^{*} (\gamma^{*})^{2}$$

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

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

 $a_{55} = 0.5\rho L^3 D M_q' u^* - m x_G u^*$ $a_{55} = 0.5\rho L^3 D M_q' (u^*)^2$

$$u_{56} = 0.5 pL D M_{\delta} (u)$$

$$u_{57} = 0.5\rho L DM_7 (u) + \rho LDA_{77} (u) f l$$

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

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

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

 $a_{77} = -1/T_r$



Fig. 6 Parameter box of a1, a2

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

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

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

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

$$p_{3} = \frac{(a_{1nom} - a_{1min}) (a_{2nom} - a_{2min})}{(a_{1max} - a_{1min}) (a_{2max} - a_{2min})}$$
(39)

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

$$p_1 + p_2 + p_3 + p_4 = 1 \tag{41}$$

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

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

$$S_{t} = \begin{bmatrix} A_{i} & B \\ C & 0 \end{bmatrix} \quad (j = 1, \dots, 4)$$
(43)

となり、これらの無数の線形モデルを、固定コント

$$\dot{x}_{K} = A_{K} x_{K} + B_{K} y' \tag{44}$$

$$u = C_{\kappa} x_{\kappa} + D_{\kappa} y' \tag{45}$$

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

$$S_{i} = \begin{bmatrix} A_{K} & B_{K} \\ C_{K} & D_{K} \end{bmatrix} = p_{1}S_{K1} + p_{2}S_{K2} + p_{3}S_{K3} + p_{4}S_{K4}$$
(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.

$$\left\| T_{\begin{bmatrix} Z_c \\ Z_{noise} \end{bmatrix}} \xrightarrow{t} \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \\ z_4 \end{bmatrix} \right\| < \gamma$$

$$(48)$$

(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ⁿ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 5 mで整定した後50秒おきの-5 m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. 9 Main wing angle and tail wing angle of Flying Fish and towing tension in depth change

問題が有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. 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²³³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 じであるの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. 800 m の曳航ケーブルを使用し最大潜行深度を200 m 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の潜行深度を保っ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 = 6knot → 7knot → 8knot)

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



ローラーは曳航体の運動を発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、旋回中におけ 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. Yugawa: 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).