

グライダー型潜水艇の設計に関する研究 (その 6)

—— 回流水槽における自航試験 ——

Feasibility Study on Gliding Submersibles (6th Report)

—— Free-Swimming Tank Tests ——

浦 環*・藤 井 輝 夫*

Tamaki URA and Teruo FUJII

1. はじめに

自律型の無索無人潜水艇の一例として、PTEROAと呼ばれる艇体形状を提案し、これまで主としてその運動特性について検討を行ってきた¹⁾。一方、制御系についても、海底面に沿って一定の高度を維持しながら航行することを目的としたアルゴリズムが提案されている²⁾。そこで、今回はスラスタ、アクチュエータを有する自航可能な有索模型 (PTEROA60) を回流水槽内で自航させ、艇体の操縦特性および制御方法の妥当性等について確認を行ったのでここに報告する。

2. 有索自航模型 (PTEROA60)

自航模型は、艇体形状が前報までのPTEROA40とほぼ同様で艇体前縁に丸みを付け、全長を60cmとしたものである。主要寸法をTable. 1に、外観をFig. 1に示す。

ボディ外殻はFRP製でこれを内部のジュラルミン製

Table. 1 Dimensions of PTEROA60

全 長 : L	0.6 m
全 幅 : B _{0A}	0.39 m (0.65L)
胴 体 幅 : B	0.3 m (0.5L)
胴 体 厚 さ : T	0.18 m (0.3L)
排 水 量 : $\nabla\rho g$	17.45kg
浮心の位置 : X _B	0.243m (前端より)

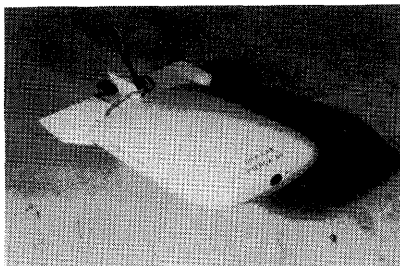


Fig. 1 PTEROA60 Submersible in Tank

のフレームで支えている。また、水平舵、垂直舵およびボディ後部は木製である。自航のため各種センサ類、アクチュエータ類等電装品を搭載しているが、これらについては、センサ類をアルミ製の円筒容器に入れ、アクチュエータ類にも適当な防水処理を行うなどして水密性を確保した。搭載機器の一覧をTable. 2に示す。

3. 実験システム

実験システムの構成とデータの流れをFig. 2に示す。模型を無索にして、所要の機能を持たせるには艇の大きさを考慮すると困難な面が多い。そこで模型艇は電源供給、およびデータ通信用のケーブルによって、地上の計算機とリンクしている。艇に搭載されたセンサから得ら

Table. 2 Instruments on Vehicle

アクチュエータ	垂直舵用ステップモータ 右舷水平舵用ステップモータ 左舷水平舵用ステップモータ
センサ	ピッチ角用傾斜計 ロール角用傾斜計 深度計測用圧力計 方位計
スラスタ	交流モータ (100V, 15W)

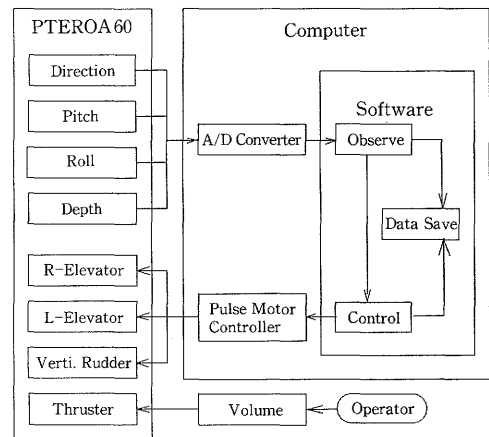


Fig. 2 Block Diagram of Experimental System

*東京大学生産技術研究所 第2部

研究速報

れたデータは、A/Dコンバータを介してパソコンに取り込まれ、メモリにセーブされる。次に計算機内のソフトウェアにより、取り込んだデータをもとにアクチュエータの駆動指令の計算が行われ、パルスモータコントローラを介して、モータが駆動される。

スラスタについては、手動で入力電圧を変化させて回転数を調整した。また、すべての処理をリアルタイムで行うため、計算機内のカウンタタイマによる同期を用いた。

これらの機器を、当研究所千葉実験所内の風路付造波回流水槽 (Table. 3) に Fig. 3 のようにセットした。自航模型は初期状態として流れの中に3本のワイヤで支えられる。水槽をある一定流速で流した状態にすると、モデルは吹き流しの状態となる。この状態でスラスタを徐々に上げ、水流に打ち勝ってワイヤが緩んだ状態になったとき、モデルは自航しているものとみなせる。

回流水槽における実験の利点は

- 1) モデルの移動量が小さいので有索模型で実験が行える。
- 2) 水槽側壁のガラス窓より艇の動きを直接観察できる。
- 3) 長い直進距離をとることができる。
- 4) 艇の設置が容易である。

などである。逆に問題点としては、

- 1) 横方向および上下方向の運動が水槽の幅と深さで制限される。
 - 2) 流れの乱れが生じている可能性がある。
 - 3) 許容流速以上の速度では運動できない。
- などが挙げられる。

4. 自航試験

今回は回流水槽における自航試験方法の確立を主な目

Table. 3 Specifications of Circulating Water Tank

幅	1.8 m
使用可能長さ	5 m (艇が運動可能な範囲)
深さ	1 m
流速	0 ~ 1 m/s 可変

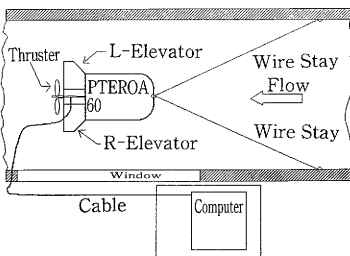


Fig. 3 Setting of Vehicle in Tank

的としたため、まず水槽内において一定流速時に艇を一定深度で直線航行させることを目標とした。これを実現する手段として、ピッチ、およびロール運動の線形フィードバックによる制御を行った²⁾。なお、垂直舵およびスラスタを用いた制御は行わず、垂直舵はニュートラルに、スラスタは一定値に固定するものとした。

4.1 ピッチ運動に関する制御則

ピッチ運動に関しては、舵角から姿勢角にいたるダイナミクスが水平定常航行状態 (以後トリム状態という) まわりで二次系で近似できるとし、 k_1 を比例係数として次の関係式

$$\dot{\theta} = \omega_y, \quad \dot{\omega}_y = k_1 \delta_e \tag{1}$$

で表す。ここに、 θ : トリム状態からの姿勢 (ピッチ) 角の変化量、 ω_y : ピッチ角速度、 δ_e : トリム状態からのエレベータ角の変化量である。さらに、制御入力 u をアクチュエータであるステップモータの動作速度と考えると、舵とモータ間のギヤ比を k_2 ($=1/20$) とすると

$$\dot{\delta}_e = k_2 u \tag{2}$$

である。ただし、 k_2 は本実験中は一定とした。これらの関係をマトリクスで表すと $\mathbf{x}^T = [\theta, \omega_y, \delta_e]$ 、 $\mathbf{u} = [u]$ として

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & k_1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ k_2 \end{bmatrix} \tag{3}$$

となる。姿勢角の変化のみで深度を一定に保つため、制御目標の姿勢角 θ_d は、Fig. 4 のように考えて、次の式で決定する。

$$\theta_d = \tan^{-1}\{(d_1 - d_0)/H\} \tag{4}$$

ここに、 d_1 : 深度、 d_0 : 目標深度、 H : 深度回復の目安とする前進距離である。 H はピッチ運動の時定数を考えて、振動を起こさない程度の値に設定する。

以上より、次の評価関数 J を最小にするような、制御入力を与えるものとする。

$$J = \int \{q_1(\theta - \theta_d)^2 + q_2\omega_y^2 + q_3\delta_e^2 + r u^2\} dt \tag{5}$$

ここに、 q_1, q_2, q_3, r は重みパラメータである。制御入

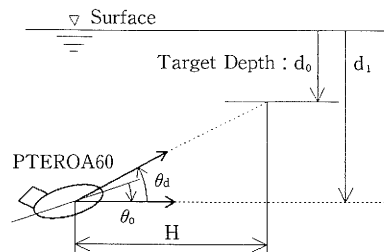


Fig. 4 Destination of Attitude θ_d

研究速報
力算出のための線形フィードバック則を

$$u = g_1(\theta - \theta_d) + g_2\omega_y + g_3\delta_e \quad (6)$$

とすると、あらためて $x^T = [\theta - \theta_d, \omega_y, \delta_e]$ とおいて

$$u = Gx, \quad G = \text{diag}(g_1, g_2, g_3) \quad (7)$$

とあらわせる。また、この G は、(8) 式のリッカチ方程式の定常解 K を (9) 式に代入して算出される、すなわち

$$-\dot{K} = KA + A^TK + KBR^{-1}B^TK - Q \quad (8)$$

$$G = R^{-1}B^TKx \quad (9)$$

として、制御入力 u が求められる。ここに、 $Q = \text{diag}(q_1, q_2, q_3)$, $R = [r]$ である。

4.2 ロール運動に関する制御則

ロール運動に関しても、ピッチ運動の場合と同様に考える。ロール角の制御は、左右のエレベータを逆方向にきることによって行うものとし、トリム状態からの変化量を $\pm \delta_a$ とする。目標ロール角 ϕ_d は、 $\phi_d = 0$ に設定する。すなわちピッチ運動と同様にして、

$$\dot{\phi} = \omega_x, \quad \dot{\omega}_x = k_3\delta_a, \quad \delta_a = k_2v \quad (10)$$

ここに、 ω_x : ロール角速度, k_3 : 比例定数, v : 左右逆方向にきる角度の変化速度である。(3) 式において、 $x^T = [\phi, \omega_x, \delta_a]$, また k_1 と k_3 を置き換えて考え、深度制御の部分を除き θ_d と $\phi_d (= 0)$ を置き換えれば、同様の過程を経て制御入力が算出できる。ただし、ギヤ比 k_2 は同

じ値とした。

このようにして得られたピッチ、およびロールに関する制御量を単純に加えることにより、最終的な制御入力 u_L と u_R とすると

$$u_L = u + v, \quad u_R = u - v \quad (11)$$

である。

4.3 運動特性試験

前節までに述べたような方法で制御を行うためには、(1) 式および (10) 式に現れる定数 k_1, k_3 を求めなければならない。言いかえれば、このように運動方程式を単純化した時に、この k_1, k_3 がそれぞれ、ピッチ、およびロール運動の舵角から姿勢角に至るダイナミクスを代表しているということである。これらを知るため、自航模型にある種のリミットサイクル運動をさせ、その時の舵角と運動の関係から、上記の比例定数を求める。すなわち、艇のピッチまたはロール角速度の絶対値に一定の制限を与えて、この値を越えた時点で、逆方向の運動を起こす方向に舵をある一定角度きる操作を行う。

艇がこのようなりミットサイクル運動を行ったとき、これを位相面に描くと 2 次曲線で近似できる曲線が得られる。たとえば、(1) 式より

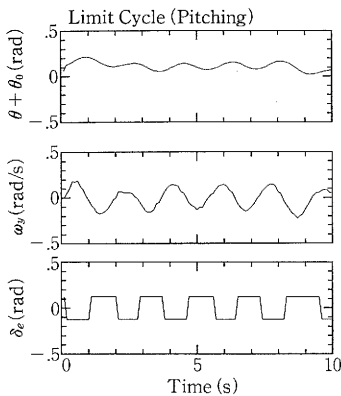


Fig. 5 Limit Cycle Motion of PTEROA60 (Pitching)

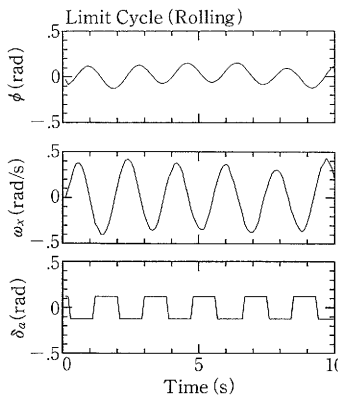


Fig. 7 Limit Cycle Motion of PTEROA60 (Rolling)

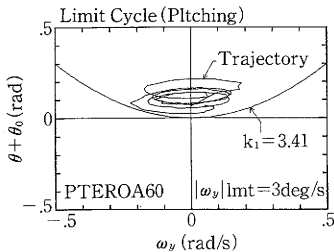


Fig. 6 Phase Plane Curve (Pitching)

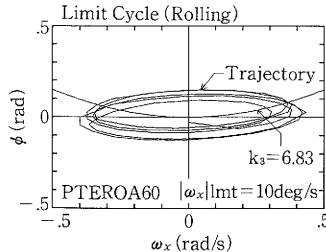


Fig. 8 Phase Plane Curve (Rolling)

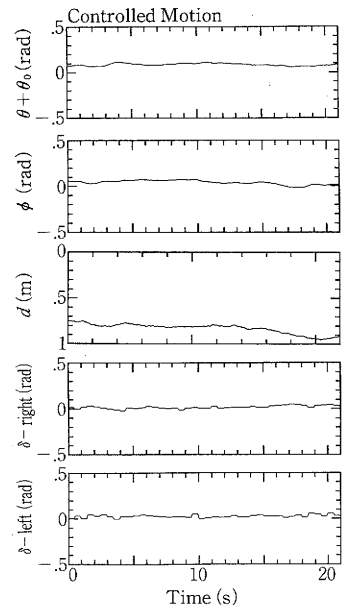


Fig. 9 Controlled Motion of PTEROA60

研究速報

$$\theta = \frac{1}{2k_1 \delta_e} \omega^2 + C, \quad C: \text{定数} \quad (12)$$

である。そこで実験により得られた曲線に、2次曲線をフィットすることにより、 k_1 および k_3 が求められる。これらの値を用いて、制御は計算される。

5. 実験結果

今回実験に用いた模型PTEROA60の艇体に関するパラメータは、全長を L 、排水容積を ∇ として、

$$\text{重心位置: } x_c = 0.392L$$

$$\text{水中重量: } W_w = 0.005 \nabla \rho g \quad (13)$$

である。この条件で、スラスト入力電圧を85Vに固定すると艇は

$$\text{舵角 } \delta_e: 10\text{deg}, \text{ 姿勢角 } \theta_0: 0.08\text{rad},$$

$$\text{前進速度: } 0.7\text{m/s} \quad (14)$$

で直線定常航行する。以後の実験においてはスラスト入力および回流水槽の流速はそれぞれこの値で固定するものとした。

5.1 リミットサイクル運動

$|\omega_y|_{\text{lim}} = 3\text{deg/s}$ の条件で δ_e を $\pm 7\text{deg}$ きり、模型にピッチに関するリミットサイクル運動をさせた実験結果の一例をFig. 5に示す。またこの時の位相面曲線をFig. 6に示す。次に、 $|\omega_x|_{\text{lim}} = 10\text{deg/s}$ の条件で δ_e を $\pm 7\text{deg}$ きり、ロールに関するリミットサイクル運動をさせた結果の一例をFig. 7に示す。またこの時の位相面曲線をFig. 8に示す。

これらの結果より、艇体のダイナミクスに関する比例係数が

$$k_1 = 3.41(1/\text{s}), \quad k_3 = 6.83(1/\text{s}) \quad (15)$$

と得られた。

5.2 制御実験

(15)式の比例定数を用いて、フィードバックゲインを計算し、制御により一定深度で航行させる実験を行った結果をFig. 9に示す。評価関数の重み設定は、ピッチに関して $q_1:q_2:q_3:r=500:100:1:1$ 、ロールに関して $q_1:q_2:q_3:r=10:10:1:1$ とした。また H は艇体の全長を考えて、2mとした。艇体運動のサンプリング時間は0.1秒、制御指令は0.5秒間隔で行っている。ピッチ角 θ 、ロール角 ϕ とも一定の値にとどまっておき、後半深度が幾分大きくなってはいるが、ほぼ安定に水平航行している様子がわかる。さらに、この航行状態において、ピッチ角に強制的に外乱を与えた時の運動の様子をFig. 10に示す。この図では、7秒付近で瞬間的な外乱を与えているが、その後2秒程度でピッチ角、ロール角および深度それぞれが回復していることがわかる。

6. おわりに

本論では、無索無人潜水艇PTEROAの運動特性および

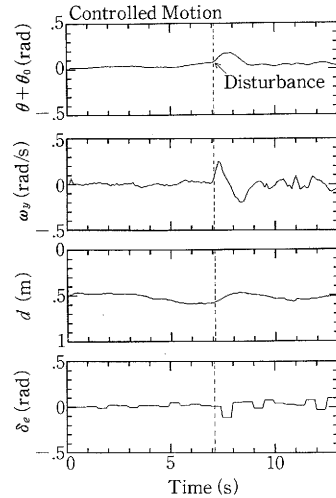


Fig. 10 Controlled Motion with Disturbance

制御系の検討を行うため、まずはじめにセンサ、スラスト、アクチュエータを搭載した自航模型艇PTEROA60を用いた回流水槽における自航実験方法について述べ、その手始めとして、回流水槽内で、模型艇を一定深度で水平に航行させることを目標とした。

次に、PTEROAの制御系として提案されている、ピッチおよびロール運動に関するそれぞれ独立した線形フィードバックを行うため、舵角と姿勢角について簡略化した運動方程式をたて、式に現れる係数を、艇に実際にリミットサイクル運動をさせることによって求めた。さらに、得られた運動方程式の係数を用いて制御系を構成し、実際に回流水槽内において模型艇に水平に航行させ、強制的な外乱に対しても、対応しうることを確認した。

本実験に際し、東京農工大学谷喬教授よりご指導を賜った。また模型製作から実験実施にいたるまで同大学院卒業生山下智氏と共同して研究を行った。ここに深甚なる謝意を表します。(1989年5月24日受理)

参考文献

- 1) 浦 環, ほか: グライダー型潜水艇の設計に関する研究 (その1~5), 生産研究, Vol. 37-12, 39-4, 39-5, 40-2, 40-12 (1985~1988).
- 2) 石谷 久: 無人潜水艇の高度維持制御に関する考察 (第1報, 第2報), 日本造船学会論文集, Vol. 160, 161 (1986).
- 3) 山下 智: 有索小型模型を用いた無索無人潜水艇の運動の研究, 東京農工大学修士論文 (1989).