

# 水中作業潜水艇の制御に関する実験的検討

正員 鈴木 英之\* 正員 吉田 宏一郎\*

正員 田中 秀幸\*\* 正員 永井 英晴\*

An Experimental Consideration on Control of a ROV for Lifting Objects

by Hideyuki Suzuki, *member* Koichiro Yoshida, *member*

Hideyuki Tanaka, *member* Hideharu Nagai, *member*

## Summary

ROVs with computer aided trajectory control and acoustic feedback sensors will be needed for lifting and transportation of objects related to the underwater activities such as inspection, installation and repair of offshore structures. Especially in deep seas, environments are hazardous for human and ROVs become very useful tools. These ROVs are also demanded in the activities related to huge offshore platforms for space utilization. In the repair and inspection of such structures, the amount of works are expected to be so large that without these ROVs the works can not be accomplished.

These ROVs are thought to have relatively complicated configurations due to large thruster, and the dynamics will be highly nonlinear and have uncertainties in their dynamics compared to the streamlined vehicles. The nonlinearities depend on velocity, and hydrodynamic coefficients are poorly known. When such system are controlled, control method must be able to handle the nonlinear dynamics and uncertainties in parameters which depend on the motion of ROV. Gain-scheduled technique which uses a set of linear controllers for different combinations of speeds and directions of motions, can handle these problems. Although theoretically possible, the number of linear controllers become so large that this method is not practical. Another technique which is able to handle the problems and adopted in this paper is sliding mode technique. If the bounds of uncertainties in parameters which determine the dynamics of ROV are known, the technique can incorporate them in the formulation and allows uncertainties in the system. Dynamics change in ROV caused by lifting objects can also be treated as a uncertainty in parameter and control is expected to be robust.

The trajectory control of ROVs is examined experimentally by model basin test using a small ROV with four thrusters. Surge and Yaw are controlled by two thrusters in horizontal plane. Heave and Sway are controlled by thrusters arranged diagonally in vertical plane. Ultrasonic positioning system was developed for the basin test. The ROV used in the test was relatively small, and high accuracy of one millimeter order was required for the positioning system and realized by using ultrasound of high frequency.

## 1. はじめに

海洋における人間活動はより大水深に向かいつつあり、海底石油の開発では水深 1000 m が構造物設置の最先端になっており、試掘は 2000 m を超える水深で行われている。

また 21 世紀初頭までには水深 2000 m の海山から 6000 m の大洋底に至る範囲で熱水鉱床、コバルトリッチクラスト、マンガング塊など鉱物資源の採集が実現されるであろう。このような大水深では、人間が直接海中の作業を行うことは滞在時間の制限、作業効率、安全性の面で難しく、潜水艇を用いた検査、映像の収集、物資の運搬などが必要になる。水中音響による位置センサーとコンピューター制御による軌道追従機能を有する潜水艇はこのような高度な観測機器あるいは作業機器の移動プラットフォームとして重要

\* 東京大学工学部船舶海洋工学科

\*\* JR 東海 研究当時東京大学工学部船舶海洋工学科  
大学院

になってくるものと考えられる。また、浅い水深においても、海洋空間利用の大型構造物の建設、設置では長期におよぶ水中作業が必要と考えられ、人間による作業はコスト面から難しくなる。特に検査、調査以外に物資を運搬する作業が増えるものと考えられる。

これまで製作された潜水艇は、特定の作業のために特化したものが製作されているが<sup>1)</sup>、潜水艇の運動に関する限りあらかじめ設定された、あるいは操作者から与えられる軌道を追従することで目的を達成できる場合が多い。軌道追従を閉ループ制御で行い、操作者は軌道に関する情報を提供するシステムにすることで、操作性の向上と操作者の負担軽減ができる。この点は従来の潜水艇が、姿勢制御などを導入して操作性を向上させてはいるものの、基本的に操作者が多自由度の出力を常時操作して負担が大きいと本質的に異なる<sup>2-4)</sup>。軌道追従制御では自分の位置の検出機能を有しなければならず、機器の問題が大きくなるが、操作者の負担は大きく軽減され、長時間の作業が可能となる。ロボットでは軌道追従制御はありふれたものであるが、潜水艇では位置検出機器の問題などのため、深海底の科学調査用に作られた JASON システムが数少ない例となっている<sup>4)</sup>。このシステムでは閉ループ制御で軌道追従を行い、操作者は追従すべき軌道に関する情報を提供する方式になっている。

潜水艇の制御上の問題は機器の問題に加え、艇のダイナミクスが基本的に非線形で流体力係数に不確実性があることである<sup>3,4)</sup>。とくに水中で物体の運搬を行うような潜水艇では大型スラスタが必要で、艇体に様々な突起を有する複雑な形状になることが予想されるが、このような潜水艇は、複雑な形状のために運動によって渦を放出するなどして、流体力を正確に把握することは、流線型の潜水艇<sup>9,10)</sup>に比べてかなり難しくなる。潮流などもモデル化の難しい外乱であり、有索式の場合にはデザーケーブルの影響も考慮しなければならない。制御設計を行う場合なるべく正確なダイナミクスのモデルが必要であるが、このように運動状態によってダイナミクスが変化する場合には、潜水艇の運動を正確に記述することは大変な労力を要する。また非線形なダイナミクスに対して、線形系に対する制御設計手法を用いる場合には、前後進、上下運動、左右運動の各運動状態ごとにゲインをあらかじめ求めておくゲインスケジューリングが考えられるが、これも多大な労力を要し効率の良いものではない。そこで、ある程度ダイナミクスの変化を許容し、なおかつ非線形性を取り扱うことのできる制御手法として、スライディングモードを利用した制御手法が注目されており、ロボットアームをはじめとして研究が行われている<sup>3-7)</sup>。ロボットアームの場合、運動が非線形でも運動を支配する慣性などのパラメータや、作用する外力は正確に求まるので有利である。スライディングモードを用いた制御手法では、基本的に非線形性を取り扱うことがで

き、あらかじめパラメータの変動範囲を知ることができれば、パラメータ変化に対してロバストな制御を得ることができるので、潜水艇の制御には有効である<sup>9)</sup>。さらに、パラメータ変化を許容する特性を利用して、物体運搬にともなう重量変化をパラメータ変動の範囲に取り入れることで、重量物運搬が可能となる。

本研究では、スライディングモードを用いた軌道追従制御を、潜水艇による物体運搬に適用するための基本的な検討として、潜水艇をあらかじめ設定した水中の3次元軌道を追従させる実験と、水中の物体を取りに行き、潜水艇のダイナミクスが変化した状態で、決められた軌道にそって移し替える実験を試みた。実験に用いた潜水艇は4台のスラスタを持ち Surge, Sway, Heave, Yaw 運動を制御するもので、残る Pitch, Roll 運動については潜水艇の設計で重心と浮心の位置関係を調節して復原力で抑えた。位置検出には水槽実験用に製作した超音波位置計測装置を用いている。軌道に関する情報は操作者が制御系に与えるもので以下の機能を設定した。

- (1) あらかじめ設定した軌道情報を制御系に与えておきこれを追従させる。
- (2) 操作者が運動を指示する。具体的には運動ベクトルを随時与え、潜水艇はこれにしたがって運動する。

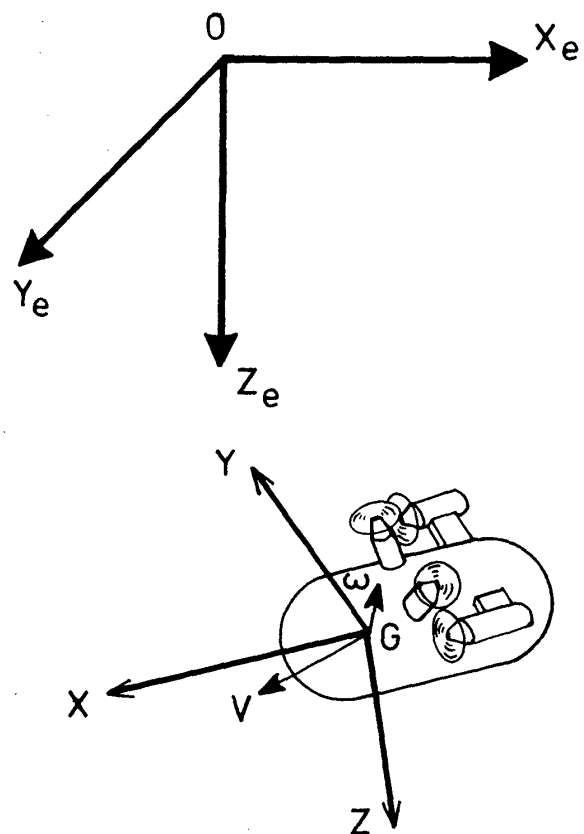


Fig. 1 Coordinate system.

## 2. 運動方程式

### 2.1 運動方程式

潜水艇の運動方程式を Fig. 1 に示す艇固定の O-XYZ で表す。原点を潜水艇の重心に一致させ、X, Y, Z 軸をそれぞれ潜水艇の前方、右手方向、下方にとると運動方程式は次式で表される<sup>9)</sup>。

$$m(\dot{V}_x + \omega_y V_z - \omega_z V_y) = F_x$$

$$m(\dot{V}_y + \omega_z V_x - \omega_x V_z) = F_y \quad (1)$$

$$m(\dot{V}_z + \omega_x V_y - \omega_y V_x) = F_z$$

$$I_{xx}\dot{\omega}_x - I_{xy}\dot{\omega}_y - I_{xz}\dot{\omega}_z - I_{xz}\omega_x\omega_y + (I_{zz} - I_{yy})\omega_z\omega_y$$

$$+ I_{xy}\omega_x\omega_z - I_{zy}\omega_y^2 + I_{yz}\omega_z^2 = G_x$$

$$-I_{yx}\dot{\omega}_x + I_{yy}\dot{\omega}_y - I_{yz}\dot{\omega}_z + I_{zy}\omega_x\omega_y + (I_{xx} - I_{zz})\omega_z\omega_x$$

$$- I_{xy}\omega_y\omega_z - I_{xz}\omega_z^2 + I_{xz}\omega_x^2 = G_y \quad (2)$$

$$-I_{xz}\dot{\omega}_x - I_{zy}\dot{\omega}_y + I_{zz}\dot{\omega}_z + I_{xz}\omega_y\omega_z + (I_{yy} - I_{xx})\omega_x\omega_y$$

$$- I_{yz}\omega_z\omega_x - I_{yx}\omega_x^2 + I_{xy}\omega_y^2 = G_z$$

ここに、 $\mathbf{V}=(V_x, V_y, V_z)$  は速度ベクトル、 $\boldsymbol{\omega}=(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$  は角速度ベクトルで、 $\mathbf{F}=(F_x, F_y, F_z)$ 、 $\mathbf{G}=(G_x, G_y, G_z)$  はそれぞれ流体力、制御力による外力ベクトルとモーメントである。また  $I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}$  は X, Y, Z 軸に関する慣性モーメント、 $I_{xy}=I_{yx}, I_{yz}=I_{zy}, I_{xz}=I_{zx}$  は XY 面, YZ 面, ZX 面に関する慣性乗積である。実験に用いた潜水艇は左右対称で  $I_{xy}=I_{yx}, I_{yz}=I_{zy}, I_{xz}=I_{zx}=0$  である。

### 2.2 オイラーの角の導入

潜水艇の運動方程式は潜水艇固定の座標系で記述されており、外力と制御力も潜水艇固定の座標系で与えられている。一方、潜水艇の軌道と姿勢は空間固定の座標系で与えられるため、座標系相互の変換が必要になる。そこで、潜水艇の姿勢を空間固定の O-X<sub>e</sub>Y<sub>e</sub>Z<sub>e</sub> 系に対する艇固定の O-XYZ 系の向きとしてオイラー角を用いて定義する。Z<sub>e</sub> 軸は鉛直下向きを正にとるものとする。オイラー角は次の 3 つの回転  $\Psi, \theta, \phi$  によって定義する。まず、O-X<sub>e</sub>Y<sub>e</sub>Z<sub>e</sub> を O-X<sub>0</sub>Y<sub>0</sub>Z<sub>0</sub> 系とし、O-XYZ 系を移動して O-X<sub>0</sub>Y<sub>0</sub>Z<sub>0</sub> 系と原点を一致させたものを O-X<sub>3</sub>Y<sub>3</sub>Z<sub>3</sub> 系とする。そのうえで Fig. 2 に示すように、O-X<sub>0</sub>Y<sub>0</sub>Z<sub>0</sub> 系を Z<sub>0</sub> 軸まわりに回転させ、X<sub>0</sub> が Z<sub>0</sub> と X<sub>3</sub> とで定まる平面に含まれるようにする。これを O-X<sub>1</sub>Y<sub>1</sub>Z<sub>1</sub> 系としこのときの回転角を  $\Psi$ 、変換行列を  $F_1(\Psi)$  とする。次に O-X<sub>1</sub>Y<sub>1</sub>Z<sub>1</sub> 系を Y<sub>1</sub> 軸回りに回転させ X<sub>1</sub> を X<sub>3</sub> に一致させる。これを O-X<sub>2</sub>Y<sub>2</sub>Z<sub>2</sub> 系としこのときの回転角を  $\theta$ 、変換行列を  $F_2(\theta)$  とする。最後に O-X<sub>2</sub>Y<sub>2</sub>Z<sub>2</sub> 系を X<sub>2</sub> 軸回りに回転し O-X<sub>3</sub>Y<sub>3</sub>Z<sub>3</sub> 系と一致させる。このときの回転角を  $\phi$  としその変換行列を  $F_3(\phi)$  とする。O-X<sub>e</sub>Y<sub>e</sub>Z<sub>e</sub> 系から O-XYZ 系への変換は座標変換行列  $T$  を用いて次式のように表すことができる。

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = T(\phi, \theta, \Psi) \begin{bmatrix} X_e \\ Y_e \\ Z_e \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここに、

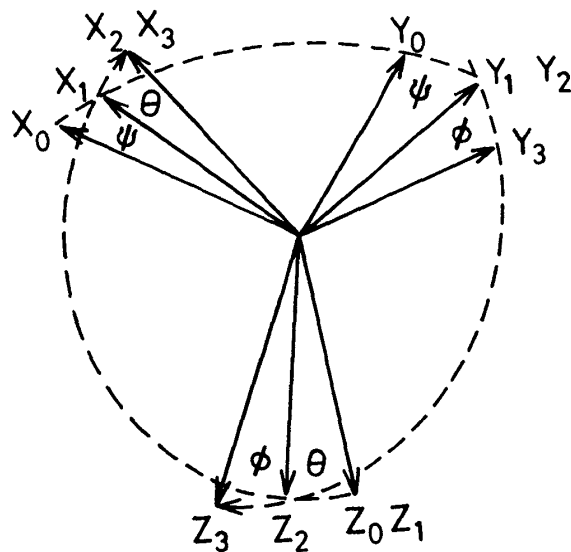


Fig. 2 Definition of Euler angles.

$$T(\phi, \theta, \Psi) = F_3(\phi)F_2(\theta)F_1(\Psi)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \Psi & \cos \theta \sin \Psi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \Psi & \sin \phi \sin \theta \sin \Psi & \sin \phi \cos \theta \\ -\cos \phi \sin \Psi & +\cos \phi \cos \Psi & \end{bmatrix} \quad (4)$$

一方オイラー角と潜水艇の角速度の関係は次のようになる。

$$\omega_x = \dot{\phi} - \dot{\Psi} \sin \theta$$

$$\omega_y = \dot{\theta} \cos \phi + \dot{\Psi} \sin \phi \cos \theta$$

$$\omega_z = -\dot{\theta} \sin \phi + \dot{\Psi} \cos \phi \cos \theta \quad (5)$$

以上より空間固定座標系と潜水艇固定座標系の状態量の変換公式が得られた。潜水艇の制御では、空間固定座標系で与えられた位置、速度、加速度を変換公式を用いて潜水艇固定座標系へ変換し、制御戦略に照らして制御力を計算した。

### 2.3 潜水艇に働く外力

潜水艇に働く力は付加質量力、抗力、揚力、重力、浮力、制御力であり、さらにこれらによるモーメントが作用する。制御力を除く力については実験や計算などにより求められるが潜水艇の形状や運動により複雑な値を取る。本研究では模型の説明のところで示すように簡便な方法を用いて求めた。艇固定の座標系における重力、浮力による力  $\mathbf{F}_{gb}$  とモーメント  $\mathbf{G}_{gb}$  は、空間固定座標系における重力ベクトルと浮力ベクトルを  $\mathbf{W}, \mathbf{B}$  とし、潜水艇固定座標系における重心と浮心の位置ベクトル  $\mathbf{O}_c, \mathbf{O}_b$ 、座標変換行列  $T$  を用いて以下のようなになる。

$$F_{gb} = TW + TB$$

$$= \begin{bmatrix} -(mg - \rho g V) & 0 & 0 \\ 0 & mg - \rho g V & 0 \\ 0 & 0 & mg - \rho g V \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$G_{gb} = O_C \times (T \cdot W) + O_B \times (T \cdot B)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 & -(mgZ_C - \rho gVZ_B) \\ -(mgZ_C - \rho gVZ_B) & 0 \\ mgY_C - \rho gVY_B & mgX_C - \rho gVX_B \\ mgY_C - \rho gVY_B & -(mgX_C - \rho gVX_B) \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sin \theta \\ \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここに、 $m$  は艇の質量、 $V$  は排水量、 $\rho$  は水の密度、 $g$  は重力加速度で  $W$ ,  $B$ ,  $O_C$ ,  $O_B$  は次のような成分を有する。

$$W = (0, 0, mg)^T$$

$$B = (0, 0, -\rho g V)^T$$

$$O_C = (X_C, Y_C, Z_C)^T$$

$$O_B = (X_B, Y_B, Z_B)^T$$

### 3. 制御方法

#### 3.1 運動方程式

潜水艇をある事前に定めた軌道を追従させようとする場合、加えるべき制御力は運動を逆問題として解くことで得られる。つまり、軌道から計算される位置、速度、加速度を潜水艇の運動方程式に代入して、加えるべき外力として制御力が計算できる。しかし、制御力を計算するために利用できる運動方程式は艇のダイナミクスのモデルであって一般には厳密なものではない。したがって、逆問題を解いて求まる入力に加えて、モデルの誤差を補償し、軌道からのずれを補償するためにフィードバックを加える。ここでは得られた誤差方程式に VSS (Variable Structure System) 理論<sup>7)</sup>に基づいて、スライディングモードを用いて潜水艇の制御を行う<sup>9)</sup>。事前に知り得る潜水艇の運動方程式を次式のように表す。

$$M\ddot{x} + C\dot{x} + f_g = f \quad (8)$$

潜水艇の真の運動方程式を次のように表す。

$$(M + \Delta M)\ddot{x} + (C + \Delta C)\dot{x} + (f_g + \Delta f_g) = f \quad (9)$$

ここで制御力  $f$  を次のように定める。

$$f = f_g + M(\ddot{x}_d - D\dot{e} + \Lambda\dot{x} + \Gamma x + h) \quad (10)$$

ここに、 $M$  は慣性行列、 $C$  は減衰行列、 $f_g$  は重力に依存する力。 $x_d$  は潜水艇の軌道、 $x$  は実際の位置で計測より求まり、 $e = x - x_d$  は艇の位置と軌道との差、 $\Lambda$ ,  $\Gamma$ ,  $h$  は以下の手続きで変化するゲインである。この式を(9)式に代入して

$$\ddot{e} + D\dot{e} = (\Lambda - \Delta M^*)\dot{x} + (\Gamma - \Delta C^*)x$$

$$+ (h - \Delta f_g^*) \quad (11)$$

ここに、 $\Delta M^* = M^{-1}\Delta M$ ,  $\Delta C^* = M^{-1}(C + \Delta C)$ ,  $\Delta f_g^* = M^{-1}\Delta f_g$  である。

#### 3.2 スライディングモード

ここで、フィードバックゲインとなる  $\Lambda$ ,  $\Gamma$ ,  $h$  をシステムの状態によって切り換えることによって目標からのずれ  $e$  をゼロに持って行くようにする。ここで  $D = [d_1, d_2, \dots, d_n]$  を対角で適切な減衰を示す行列とし、誤差方程式を形式上無干渉化する。ついで、位相面上の直線

$$\dot{e}_i + d_i e_i = 0 \quad i=1, \dots, n \quad (12)$$

に艇の運動が拘束されるように、つまりこの直線に押し戻されるように(11)式右辺のゲインを切り換えることによって、艇の状態はこの直線上に拘束されて位相面上をスライディングして、誤差  $e_i$  は時定数  $d_i$  でゼロに収束する。位相面上の直線に拘束されるためには

$$s_i = \dot{e}_i + d_i e_i \quad (13)$$

を用いて定義される  $s_i^2$  が直線からの距離の指標となるので、この値の時間変化を負とすることがスライディングモード存在のための条件となる。

$$\dot{s}_i s_i < 0 \quad (14)$$

つまり、 $s_i = 0$  の直線から離れると押戻され、直線上を滑りながら原点へ収束する。状態ベクトルが切換面に拘束されるため、制御対象のパラメータ変動、非線形性、雑音等においてロバストな制御系を構成できる。ゲインの切り換えによるチャタリングについては不感帯を設けることによって対応することも考えられている。また高ゲインで通常見られる不安定現象とは異なり、切換線近傍に状態を閉じこめることができるので、切換線が安定であるならば安定になる。

#### 3.3 ゲイン切り替え

ここでスライディングモードにある状態では  $s_i \equiv 0$  であるから  $\dot{s}_i \equiv 0$  であり、

$$\dot{x}_i = \dot{x}_{di} - d_i \dot{e}_i \quad (15)$$

と見なすことができる。(11), (13)式より

$$\dot{s}_i s_i = \sum_{j=1}^n (\Lambda_{ij} - \Delta M_{ij}^*) (\ddot{x}_{dj} - d_j \dot{e}_j) s_i + \sum_{j=1}^n (\Gamma_{ij} - \Delta C_{ij}^*) \dot{x}_j s_i + (h_i - \Delta f_{gi}^*) s_i \quad (16)$$

従って、この式が負になるためには次のようにゲイン  $\Lambda$ ,  $\Gamma$ ,  $h$  を選ぶことが十分である。

$$\begin{aligned} \Lambda_{ij} &> \Delta M_{ij}^* && \text{if } (\ddot{x}_{dj} - d_j \dot{e}_j) s_i < 0 \\ \Lambda_{ij} &< \Delta M_{ij}^* && \text{if } (\ddot{x}_{dj} - d_j \dot{e}_j) s_i > 0 \\ \Gamma_{ij} &> \Delta C_{ij}^* && \text{if } \dot{x}_j s_i < 0 \\ \Gamma_{ij} &< \Delta C_{ij}^* && \text{if } \dot{x}_j s_i > 0 \\ h_i &> \Delta f_{gi}^* && \text{if } s_i < 0 \\ h_i &< \Delta f_{gi}^* && \text{if } s_i > 0 \end{aligned} \quad (17)$$

ここに、添字  $U, L$  は変動量の上下限値を示す。パラメータの変動量の上下限を事前に評価しておくことにより、上の

関係を満たすようにゲインを選ぶことができ、制御が可能となる。より精度の高い運動方程式を手にするによって、ゲインの切り換え量を最小限にとどめ、チャタリングを少なくすることができる。また、パラメーターの変動があっても、これによる応答の悪化を押さえ込むだけのスラストが要求されるため、スラストの容量に余裕を見る必要がある。

#### 4. 潜水艇の軌道

##### 4.1 軌道計画

潜水艇は一連の運動を通じて作業を遂行するので、この一連の運動を軌道として与えてやり、軌道を忠実にたどるようにした。潜水艇の操作プログラムは、位置・姿勢計測装置を制御するプログラムと軌道を計算するプログラムを潜水艇制御プログラムに組み込んだものであり、以下のような作業を潜水艇に行わせることが可能である。

(1) 通過すべき点の座標、時刻、通過速度をパラメーターとして与えることにより人間が操作に関与することなく軌道を追従させる制御が可能である。決まったコースをたどる海底の調査、写真撮影などを行う場合には、このように軌道を事前に与えることで潜水艇は自動的に作業を行いオペレーターは監視するだけでよい。

(2) オペレーターの割り込みにより適宜軌道を設定し直すことができ、マニュアル操縦の要素をかみ込むことができる。海洋構造物の継手部分を詳しく調査する場合などには、継手付近までは(1)の方法で行き、その後はオペレーターの指示する軌道を追従することで詳細な調査が可能になる。オペレーターは潜水艇に移動方向と距離を指定するだけで直接自由度をコントロールするわけではないので労力は著しく軽減される。

このように本システムでは潜水艇の自由度全てが制御されており、オペレーターはスーパーバイザーとしての存在で、操縦技量などに左右されることなく目的を遂行することができる。

##### 4.2 軌道の与え方

軌道の与え方は、空間固定座標系で艇の通過点と時刻さらに姿勢、速度、角速度を与え、これを順次内挿して時々刻々の状態を計算し、これを艇に追従させる方法を取った。軌道上の点の与え方は、オペレーターが艇の運動中に直接与える方法と、あらかじめ軌道データを作成しておくものであるが、後者についてはオペレーターによる割り込みで適宜マニュアル操縦に移れるようにした、いずれの場合にもデータがなくなった時点で入力待になるようにした。与えられた2点  $P_1, P_2$  を内挿する方法は、速度については Fig.3 に示すように、時間に関する1次関数と三角関数の和として、速度と角速度よりなるベクトル  $V_1, V_2$  を内挿した。変位については速度を積分したものが、2点で座標と姿勢よりなるベクトル  $X_1, X_2$  に一致するようにした。2点

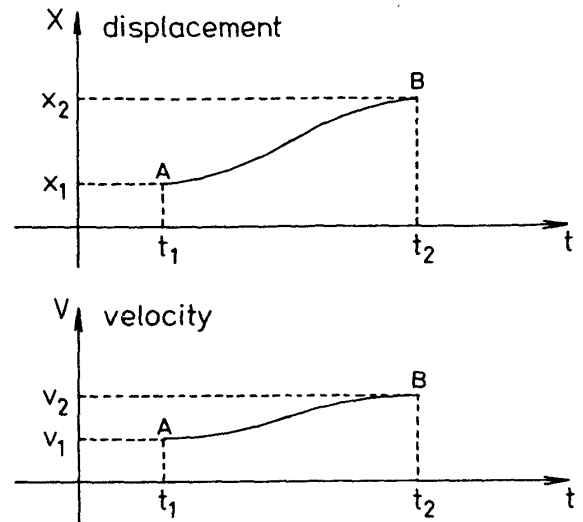


Fig.3 Creation of trajectory by interpolation.

を結ぶ軌道の加速度、速度、座標は時刻  $t$  の関数として次式のように決まる。

$$\begin{aligned} \frac{dV}{dt} &= \frac{\Delta V}{\Delta T} - \frac{2\pi}{\Delta T} a \sin \frac{2\pi}{\Delta T} t \\ V &= \frac{\Delta V}{\Delta T} t + a \cos \frac{2\pi}{\Delta T} t + b \end{aligned} \quad (18)$$

$$X = bt + \frac{\Delta V}{2\Delta T} t^2 + \frac{\Delta T}{2\pi} a \sin \frac{2\pi}{\Delta T} t + X_1$$

ここに、

$$t = T - T_1 \quad T_1 \leq T \leq T_2$$

$$a = V_1 - \frac{\Delta X}{\Delta T} + \frac{\Delta V}{2}$$

$$b = \frac{\Delta X}{\Delta T} - \frac{\Delta V}{2}$$

$$\Delta X = X_2 - X_1$$

$$\Delta V = V_2 - V_1$$

$$\Delta T = T_2 - T_1$$

である。次の点の座標、速度、姿勢、角速度が与えられ、到達する時刻が決められていない場合には、潜水艇の能力内で速度の最大値を設定し、これによって到達時間を決めて軌道を求めた。

##### 4.3 位置、姿勢の計算

潜水艇の位置と姿勢を求めるには、潜水艇に固定された3点の座標が定めれば求めることができる。実験では潜水艇に取り付けた3つの超音波送波器から送信された超音波を、空間固定の座標系に固定された3つの受波器で受信し、送受信間の時間を計測して、それを距離に換算する方法で各送波器と受波器の距離を求め、これらの距離と受波器の位置関係から4面体を構成して送波器の座標を決定した。具体的な算定法を示す。Fig.4において空間固定座標系を  $O-X_e Y_e Z_e$  とし潜水艇固定の運動座標系を  $O-XYZ$  とする。潜水艇に固定された送波器  $A, B, C$  の  $O-XYZ$  系で記述した位置ベクトルを  $r_a, r_b, r_c$ 、 $O-X_e Y_e Z_e$  系で記述した

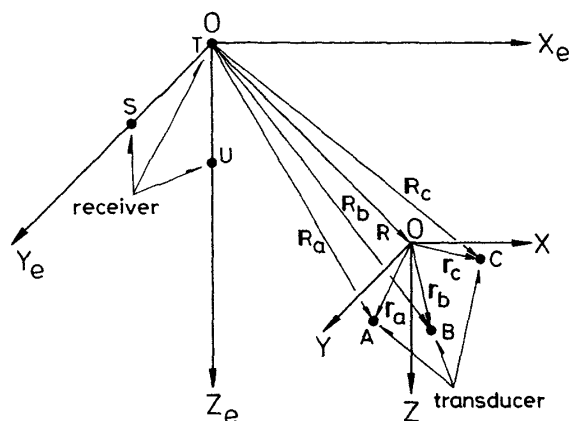


Fig. 4 Relation between locations of transducers and receivers.

それぞれの位置ベクトルを  $R_a, R_b, R_c$  とする。運動座標系  $O-XYZ$  系の原点  $O$  を空間固定座標系  $O-X_eY_eZ_e$  で表した位置ベクトルを  $R$  とする。

まず各送信器の  $O-XYZ$  座標系における座標を求める。簡単のため受波器  $S, T, U$  を空間固定の座標系で  $R_s = (0, Y_r, 0), R_t = (0, 0, 0), R_u = (0, 0, Z_r)$  に設置する。座標は三角測量の原理に基づいて次式のように計算される。

$$\begin{aligned} Y_t &= (Q^2 - P^2 + Y_r^2) / 2Y_r \\ Z_t &= (Q^2 - R^2 + Z_r^2) / 2Z_r \\ X_t &= (Q^2 - Z_t^2 - Y_t^2)^{1/2} \end{aligned} \quad (19)$$

ここに、 $P, Q, R$  はそれぞれ受波器  $S, T, U$  と送信器との距離、 $X_t, Y_t, Z_t$  は送信器の  $O-X_eY_eZ_e$  系での座標。このようにして送信器  $A, B, C$  の  $O-X_eY_eZ_e$  系での座標が決まる。ここで  $O-X_eY_eZ_e$  系から  $O-XYZ$  系への変換マトリクス  $T$  を用いると点  $A, B, C$  の  $O-X_eY_eZ_e$  系で表した位置ベクトルと  $O-XYZ$  で表した位置ベクトルの関係は次式で表される。

$$\begin{aligned} R_a &= T^t r_a + R \\ R_b &= T^t r_b + R \\ R_c &= T^t r_c + R \end{aligned} \quad (20)$$

ここに、 $R_a, R_b, R_c$  が計測されたベクトルで、 $T$  と  $R$  が潜水艇の姿勢と位置を表す未知パラメーターである。つまり、オイラー角の6つのパラメーターと座標の3つのパラメーターが未知で、式が9つあるので解くことができ、空間座標系から見た位置・姿勢がわかる。まず  $R$  を求めることができる。 $r_a, r_b, r_c$  が1次独立になるように送信器が設置されているとすると  $(r_b - r_a) \times (r_c - r_a), r_b - r_a, r_c - r_a$  が1次独立になるので

$$-r_a = \alpha(r_b - r_a) \times (r_c - r_a) + \beta(r_b - r_a) + \gamma(r_c - r_a) \quad (21)$$

となる零でない  $\alpha, \beta, \gamma$  が定まる。これより  $O-XYZ$  系の原点の位置ベクトル  $R$  は  $O-X_eY_eZ_e$  系で測られたベクトル  $R_a, R_b, R_c$  を用いて次式のように表すことができる。

$$R = R_a + \alpha(R_b - R_a) \times (R_c - R_a) + \beta(R_b - R_a) + \gamma(R_c - R_a) \quad (22)$$

次に  $T$  を求める。(20)式を行列で表すと、

$$[R_a R_b R_c] = T^t [r_a r_b r_c] + [R R R] \quad (23)$$

$r_a, r_b, r_c$  が互いに1次独立なベクトルとなるように送信器を設置したので行列  $[r_a r_b r_c]$  は逆行列が存在し座標変換マトリクス  $T$  は

$$T^t = [R_a R_b R_c][r_a r_b r_c]^{-1} - [R R R][r_a r_b r_c]^{-1} \quad (24)$$

として求められる。よって潜水艇の姿勢を表すオイラー角は(4)式より

$$\begin{aligned} \Phi &= \text{Arctan}\{T^t(3, 2)/T^t(3, 3)\} \\ \Theta &= -\text{Arcsin}\{T^t(3, 1)\} \\ \Psi &= \text{Arctan}\{T^t(2, 1)/T^t(1, 1)\} \end{aligned} \quad (25)$$

である。以上により潜水艇に固定された3点の位置を計測し、艇の位置と姿勢が求まった。

## 5. 実験

### 5.1 実験システム

実験システムを Fig.5 に示す。潜水艇の位置、姿勢の計測は超音波を用いた位置測定装置により計測した。装置は潜水艇に取り付けた3つの超音波発振器の1つを選んで、超音波を発信させ、空間固定の座標系に固定してある3つの受信機により受信し、各受信機への超音波の到達時間を計測して、I/Oポートを介して計算機に送るものである。位置測定装置はこの手続きを計算機からの指示にしたがって繰り返す。計算機では、得られた各発振器と受信機間の距離から構成される4面体から送信器の座標を割り出す。3つの発振器の座標がわかると潜水艇の位置と姿勢を決定することができる。得られた位置、姿勢を制御手法に照らして各スラスターの推力を計算しスラスターの制御装置に出力する。制御装置は、計算機で計算された制御力をD/Aコンバーターを介してアナログ信号に変え、増幅してモータ

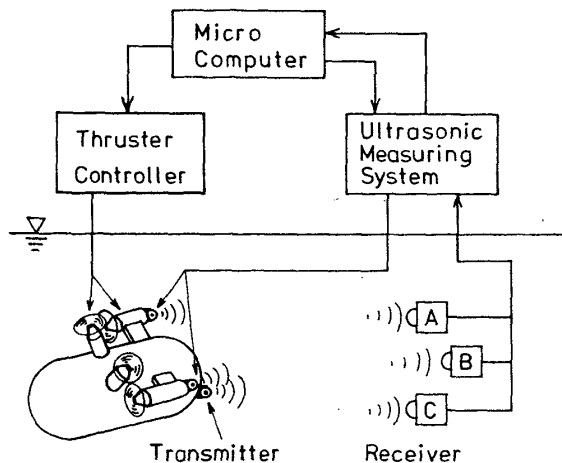


Fig. 5 Experimental system.

一を駆動してプロペラを回転させて推力を得るものである。この一連の作業を1ステップとして各ステップを5 Hzで行い、同期はコンピューターのタイマー割り込みを利用して行った。

### 5.2 スラスタおよび制御回路

実験に用いたスラスタの外形および寸法を、Table 1, Fig. 6 に示す。スラスタは極力小型で、プロペラの正転反転による推力の変動が起こりにくくなるように配慮した。用いた直流小型モーターは、定格電圧 7.2(V), 電流 6.0(A), 適正トルク 200(g-cm), 回転数 14000(rpm)のものである。このモーターに減速比 5:1 の同軸遊星ギヤを取り付け、駆動トルクの増大と回転数の低下を図った。本スラスタはプロペラの正転、反転によって推力方向を変化させるため、プロペラシャフトに2組のスラストベアリングを取り付けて、スラスト反力を受け持たせている。また、プロペラの周囲にはダクトを設置して水流の整流、さらにケーブルの巻き込み防止を図った。スラスタ本体の防水対策は、ハウジング関係にはシリコン樹脂、プロペラシャフトには“O”リングを用いて防水を図った。

スラスタに用いた直流モーターは、低電圧、大電流の“電流型モーター”であるため、D/A コンバーターを通した電圧信号となった制御信号でOP アンプとパワートランジスタよりなる駆動回路を駆動し、±12(V), 27(A)のスイッチング電源からの電流を制御してモーターを駆動した。

Table 1 Kinematic parameters of thruster.

Length	L (cm)	16.0
Diameter	D (cm)	5.0
Mass	m (kg)	0.55
Volume	V (cm <sup>3</sup> )	265
Moment of inertia	I <sub>xx</sub> (g-cm <sup>2</sup> )	1500
	I <sub>zz</sub> (g-cm <sup>2</sup> )	6200

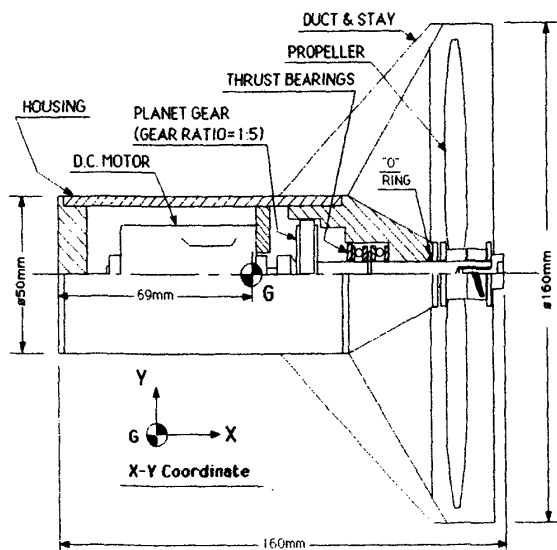


Fig. 6 Thruster.

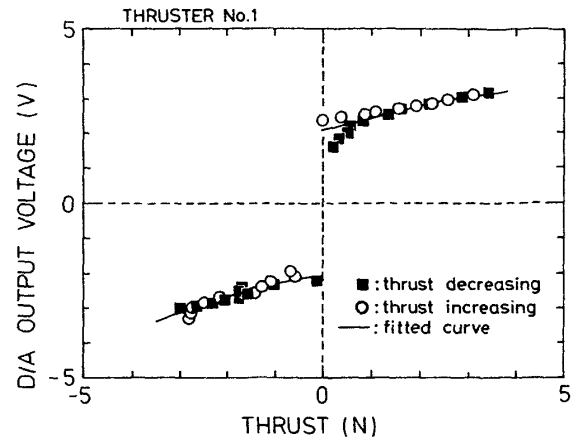


Fig. 7 Relation between thrust and driving voltage.

各スラスタについて加えた電圧信号と推力の検定を行い、較正曲線を求めた。加えた電圧信号に対するスラスタ推力の位相遅れはなかったが、低推力領域でヒステリシスが生じた。これは防水シール関係の摩擦の影響である。D/A 出力(V)と各スラスタの推力(T)との関係の一例を Fig. 7 と(26)式に示す。較正曲線は正転、反転を別々に最小自乗法により求めた。

$$V_1 = 2.062 + .2698 T_1 + .0998 T_1^2 - .02459 T_1^3 \quad (T_1 > 0)$$

$$V_1 = -2.061 + .02646 T_1 - .2489 T_1^2$$

$$- .04799 T_1^3 \quad (T_1 < 0) \quad (26)$$

### 5.3 潜水艇

実験に供した潜水艇の形状を Fig. 8 に示す。寸法、質量などを Table 2 に示す。本体はアクリル製で、スラスタ2基を艇の左右に取り付け前後方向に推力を発生させ、鉛直から 45 度の角度をなすスラスタ2基を上部に取り付けた。水平に取り付けたスラスタで Surge と Yaw, 斜めに取り付けたスラスタで Heave と Sway を制御した。Pitch と Roll はバラストで重心の位置を調整して復原力レバーを大きく取り、発生を抑えた。Pitch と Roll は艇の水平性を損なうので、作業に必要なない運動モードである。しかし、艇の水平面に関する対称性は斜めに取り付けたスラスタにより大きく崩れており、水平面内での運動が激しくなると Pitch, Roll を生じた。

復原力を十分に大きくなるように設計すれば Pitch と Roll 運動は小さいとして Yaw 軸回りの運動方程式を簡略化することができる。まず Pitch, Roll 運動が小さいとして、2次項を省略してオイラー角と艇の角速度の関係を求めると、

$$\begin{aligned} \omega_x &= \dot{\phi} \\ \omega_y &= \dot{\theta} \\ \omega_z &= \dot{\psi} \end{aligned} \quad (27)$$

Yaw 軸回りの回転の運動方程式を、同様に 2次項を省略すると次のようになる。

Table 2 Kinematic parameters of ROV.

Mass	m (kg)	5.425
Volume	V (cm <sup>3</sup> )	5425
Center of gravity	Y <sub>G</sub> (m)	-0.01
	Z <sub>G</sub> (m)	0.05
	X <sub>G</sub> (m)	-0.01
Center of buoyancy	Y <sub>B</sub> (m)	0.0
	Z <sub>B</sub> (m)	-0.01
	X <sub>B</sub> (m)	0.0
Moment of inertia	I <sub>xx</sub> (kg-m <sup>2</sup> )	0.06202
	I <sub>yy</sub> (kg-m <sup>2</sup> )	0.04656
	I <sub>zz</sub> (kg-m <sup>2</sup> )	0.07122
	I <sub>xy</sub> (kg-m <sup>2</sup> )	0.0
	I <sub>yz</sub> (kg-m <sup>2</sup> )	0.0
	I <sub>xz</sub> (kg-m <sup>2</sup> )	0.0028

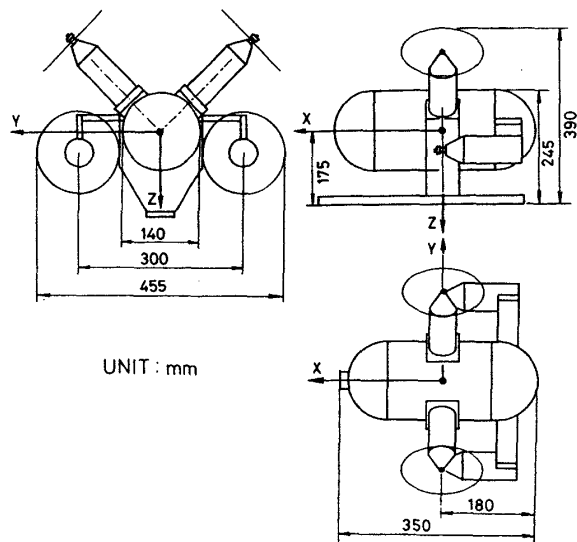


Fig. 8 ROV for experiment.

$$-I_{zz}\dot{\phi} + I_{zz}\dot{\psi} = G_z \quad (28)$$

さきに述べたように、潜水艇の近似度の高い運動方程式を手にするには、制御結果を改善するうえで重要であり、付加質量係数と抗力係数はその中でも最も重要な係数である。艇の形状の対称性と復原性から、連成項の応答への寄与は小さいと考えられる。そこで Sway, Heave, Surge, Yaw の各運動モードについて 2 階の線形運動方程式を仮定し、スラスタで発生させた正弦波推力に対する応答を超音波位置計測装置で記録し、推力と応答の振幅と位相差から線形近似の範囲で付加質量係数、抗力係数を求めた。推力の振幅と周波数をいくつか変えて付加質量係数、抗力係数を求めたが値の変化は小さく、制御パラメータの計算では、得られた値の平均値を用いた。用いた値を Table 3 に示す。

5.4 超音波位置計測装置

艇の位置、姿勢の計測に用いた超音波位置計測装置は 16 の送波器と 3 つの受信器を有し、水中の 16 点の 3 次元座標を計測することができる。今回の実験ではそのうち 3 つの送波器を用いて潜水艇の位置と姿勢を計測した。本装置は、

- ① 計算機
- ② 測定装置の計測部

Table 3 Added mass and drag force coefficients of ROV.

kg			kg-m <sup>2</sup>
m <sub>ax</sub>	m <sub>ay</sub>	m <sub>az</sub>	I <sub>a</sub>
4.335	7.375	5.175	0.10678

kg/s			kg-m <sup>2</sup> /s
c <sub>x</sub>	c <sub>y</sub>	c <sub>z</sub>	c <sub>r</sub>
11.8	13.4	13.9	0.1865

- ③ 超音波送信器
- ④ 超音波受信機

より構成されている。これらのブロックダイアグラムを Fig.9 に示す。以下に、各装置を簡単に説明する。

計算機は計測指令、送受信チャンネル選択、タイマクリヤーなどの信号を計測部に送り、計測部から 16 進の距離データが送られてくる。計測部とのデータのやり取りは、潜水艇制御用の計算機が兼用で I/O ポートを介して行う。計測部は、制御計算機から送られてくる 16 進のデータをデコードして 16 台の送波器から 1 台を選択する。また、送信指令にしたがって、選択した送波器へ超音波発信指令を送り、同時に 3 台のタイマーをクリヤーして 4 MHz で時間の計測を始める。受信機が超音波を受信すると受信機からの信号によって各々のタイマーを停止させ、その値を制御計算機へ送る。送波から受信までの経過時間は距離と等価である。

超音波送信器は、送信信号を受けて超音波振動子へ高電圧の鋭いパルスを加えるものである。高電圧は 37 kHz のブロック発信器の信号を高圧トランスにより昇圧させたもので、2 次側に発生した 400 V~450 V の電圧を整流して高圧コンデンサーに蓄える。送信指令にしたがって、高圧コンデンサーに蓄えられた電荷を放電してパルスを発生させ、これを振動子に作用させて超音波を発生させるものである。

超音波受信機は、受信振動子によって捉えられた微弱な超音波信号を増幅して、計測部へ送るものである。信号の増幅方法は、受信振動子が捕らえる電圧が数 100 μV と微弱な為、外部ノイズの影響を除去するために、差動増幅回路を構成して、信号成分のみを後段の 3 段増幅器とフィルターへ送っている。初段の増幅度は 35 dB, 2 段目は 20 dB

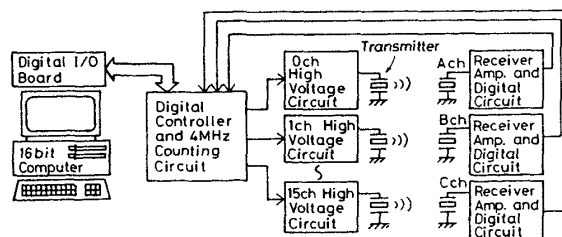


Fig. 9 Ultrasonic ranging system.

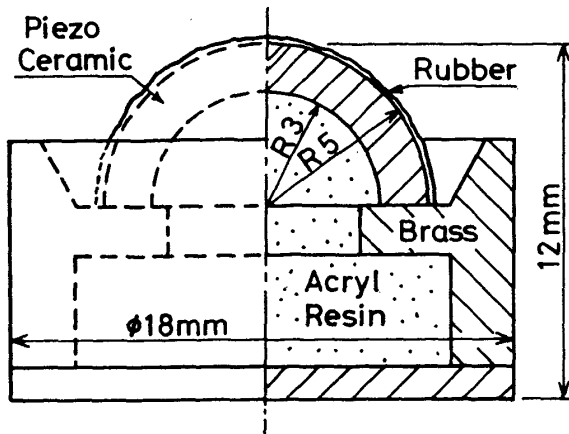


Fig. 10 Transducer.

で、200 kHz–1 MHz のバンドパスフィルターを構成して雑音の除去を図った。3 段目の増幅器の増幅度は 40 dB で、次段のアナログ信号をデジタル信号に変換する回路へ十分な大きさの信号としている。アナログ-デジタル変換回路は、入力にしきい値を設定してこのしきい値を越える入力信号に対して 5 V のデジタルパルスを発生させ、デジタルコントローラーへ受信信号を送る。しきい値を設定することによって、増幅器に内在する残留雑音を除去することが出来る。また、大きな信号に対しては、初段増幅器の前とバンドパスフィルターの後ろに配したアッテネーターによって、増幅度を変化させて対応した。

本装置で用いた振動子は、PCM 圧電磁器材料を用いたもので、特に送信側にはパワー用素子そして受信側にはマイクロフォン用素子を用いた。また、音波を無指向性で放出・受信させたいために、外形を Fig. 10 に示すように半球形状とし、振動子表面にゴム系の樹脂を塗布して防水加工した。ここで使用したセラミック振動子単体の共振周波数は、1 MHz であるが水中で実際に測定したところ約 250 kHz であった。

### 5.5 実験

実験は東京大学工学部船舶海洋工学強度実験室に設けた小型水槽において行った。この水槽は Fig. 11 に示すように長さ 5.9 m × 幅 3.3 m × 深さ 1 m で、中心部に深さ 1.2 m、幅 2.2 m の溝を設けたもので、超音波反射防止のため水槽の内壁の一部に吸音材を張った。超音波受信器を図のように配置し、空間固定座標系を設定した。水深が比較的浅く、送信器と受信器の指向性のための Heave, Yaw, Sway 運動には制限があった。また、水面、水槽底部などには吸音材を張らなかつたために残響が予想以上に大きく、超音波による位置計測の間隔を短くすると計測に失敗することがあった。そこで計測間隔を長くして、超音波の減衰を待って次の計測を行うようにし、さらに、複数回の計測を行い上位と下位の結果を捨てて中間の値をデータとして採用した。その結果一回の計測を 5 Hz で行うこととなっ

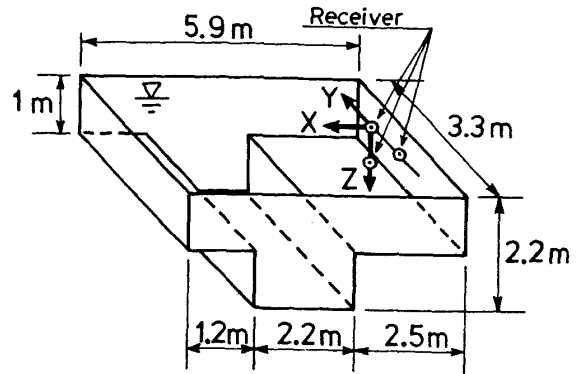


Fig. 11 Basin for experiment.

た。

計測結果は巡回型デジタルフィルターを用いてノイズを除去し、微分して速度を求めた。潜水艇の Pitch と Roll の固有周期はいずれも 1 秒程度と短く、ノイズを除去するためにフィルターを強く利かせると位相遅れを生じ、ピッチとロール運動を誘起した。フィルターの利かせ方は実験を行いながら決めた。

潜水艇に与えた軌道は Fig. 12, Fig. 13 の 2 通りで、事前に計算機に記憶させておき、開始後オペレーターは介入しなかつた。Fig. 12 の軌道では初期位置から、右に進み、前進し、上昇し、左に進み、沈みながら後退してもとの位置に戻る 3 次元軌道で、Yaw 以外の運動モードの制御をテストするものである。Fig. 13 の軌道では A 点の物体を B 点まで運ぶもので、軌道としては初期位置から、前進し、A 点の手前でいったん停止し、緩やかに前進してフックを物体に掛け、上昇して吊り下げ、後退して、B 点で物体を下ろし、後退してもとの位置に戻ってくるものである。運んだ物体の寸法は 5 cm × 5 cm × 25 cm、質量は 530 g で付加質量も含めて約 1 kg のもので、水中重量は 60 g である。物体の質量が潜水艇の約 10 % と比較的大きく、潜水艇のダイナミクスに影響があり、制御のロバスト性、さらにはダイナミクスが変化する物体運搬に、スライディングモードを用いた制御が応用できるかが試されるものである。物体を取

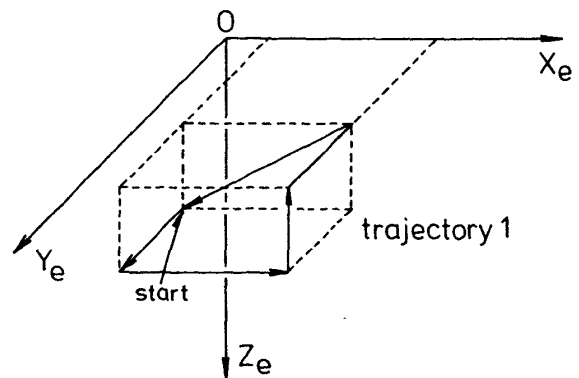


Fig. 12 3D trajectory for basic test of control.

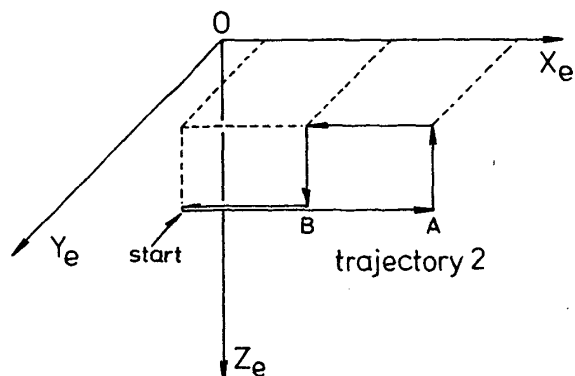


Fig. 13 Trajectory for object transportation control.

りに行く場合、今回の実験ではあらかじめ物体の位置を覚えておいたが、物体に超音波発信器を取り付けることで、物体の位置を事前に教える必要をなくすることが可能である。

## 6. 実験結果

右進・前進・上昇・左進・沈みながらの後退で元に戻ってくる場合の実験結果を Fig. 14~Fig. 16 に示す。Fig. 14 は前進運動を示しており、正方向が前進を意味している。Fig. 15 は右方向の変位で正方向が右変位を示している。Fig. 16 は下方向の変位で正方向が深度、つまり負の方向が浮上になっている。時間を追ってみると 6 秒から 14 秒の間で右進し、18 秒から 26 秒で前進し、34 秒から 42 秒で浮上し、46 秒から 54 秒で左進し、58 秒から 66 秒で沈みながら後進して元に戻ってきている。狭い範囲を回って戻ってくるために相対的に計測ノイズが大きく見えるが、JASON の水槽実験では精度数 mm の超音波位置計測システムを用いてやはり 5 Hz で実験を行っており、前進速度がある場合の位置精度が数インチであることに比べ、全般的には軌道をよく追従したといえる。軌道からの誤差は X, Y, Z 各軸方向ともほぼ最大で 5 cm 以内に収まっている。先に述べたように、位相遅れをなくすためにオンラインフィルタをはずしており、ノイズが乗っているが設定した軌道速度に追従していることがわかる。水平面内の 2 つのスラスタで Yaw と Surge を制御しているために、推力のバラ

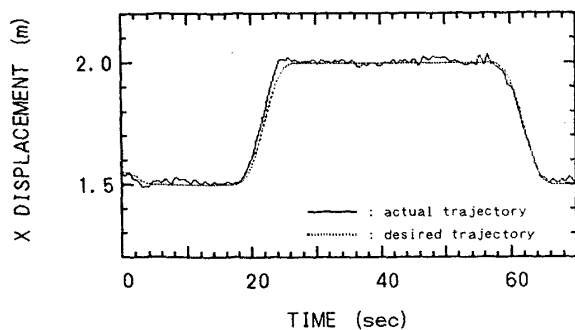


Fig. 14 Surge of ROV in basic test of control.

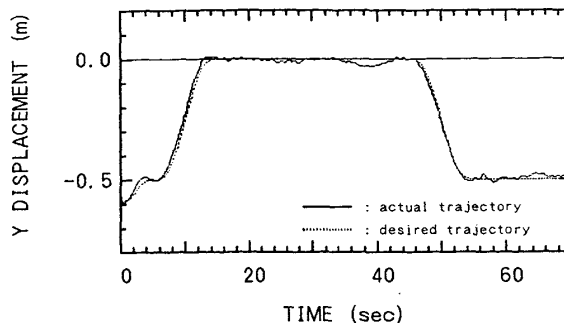


Fig. 15 Sway of ROV in basic test of control.

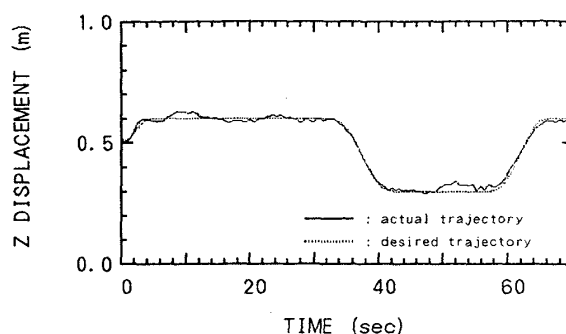


Fig. 16 Heave of ROV in basic test of control.

ンスの狂いで一方の運動モードが他方を誘起する現象がみられた。同様に、鉛直斜めに取り付けた 2 つのスラスタのバランスの狂いで Sway と Heave の一方が他方を誘起している。

鉛直斜めのスラスタについては、スラスタの水流が艇体に当たるため、特性が良くなく、影響が出ているようである。スライディングモードを用いた制御では、チャタリングを防ぐために制御のサンプル間隔をなるべく小さくしたい。今回の実験では超音波測定の問題から制御は 5 Hz で行い潜水艇に振動が観察されることがあった。またこの制御方法は不確実な特性を力で押え込むもので、基本的に高出力を必要とするためスラスタ出力が飽和した場合に制御成績が悪化することが考えられる。

次に、物体を移し替える実験の結果を Fig. 17~Fig. 18 に示す。Fig. 17 が前進、Fig. 18 が下方の運動を示している。結果を時間を追って見ると 6 秒から 18 秒で前進して物体の前で一旦停止し、22 秒から 26 秒でさらに前進して A 地点の物体にフックを通し、30 秒から 34 秒で浮上して吊り、38 秒から 48 秒で後進して B 地点で停止し、52 秒から 56 秒で降下して物体を降ろし、62 秒から 72 秒でさらに後進して元の位置に戻っている。物体を吊っている間にかかわらず前後方向の運動はよい結果となっており、物体を吊ることによる約 10% の重量増加がうまくカバーされていることがわかる。物体を吊って上昇する場合には初期の追従は良いが、目標の高さまで上昇できないでいる。これは艇体に水流が当たり十分な制御力が出ないまま推力が飽和してしまったためと考えられる。また上昇するときス

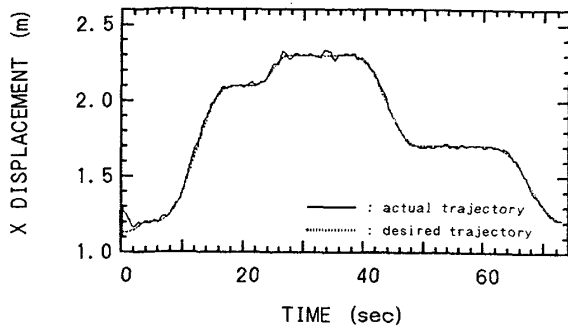


Fig. 17 Surge of ROV in object transportation control.

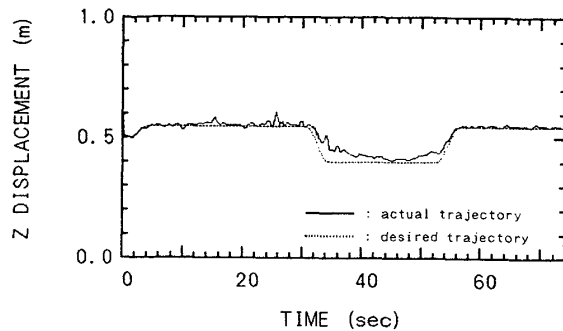


Fig. 18 Heave of ROV in object transportation control.

ラスターは、ほぼフルパワーで回転するために、スラスター内のモーターの回転の反作用による回頭モーメントが働き、これを Yaw 制御で抑えることができなくなる場面があった。

## 7. 結 論

水中音響による位置センサーとコンピューター制御による軌道追従機能を有する潜水艇の制御では、追従すべき軌道に関する情報を提供するだけでよく、オペレーターの負担が軽減するため、今後の海中作業で多用されるものと考えられる。とくに、検査、調査といったこれまでの目的以外に、資材運搬などが重要になると考えられる。このような潜水艇では大型スラスターが必要で、艇体は比較的複雑な形状で、艇のダイナミクスは非線形、流体力係数も複雑な挙動を示して不確実性があることが予想される。このような特性を有する艇に対しては、非線形性を取り扱うことができ、パラメーター変化も許容できる、スライディングモードを用いた制御手法が有効と考えられる。とくに、物体を運搬することによる重量変化をパラメーターの変動と捕らえることにより、重量物運搬が可能となる。

本研究では、スライディングモードを用いた軌道追従制御を、潜水艇による物体運搬に適用するため、超音波による位置計測システムを含めた基本的システムの構築を行った。ついで、潜水艇をあらかじめ設定した水中の 3 次元軌道に追従させ、軌道追従制御の基本的な検証を行った。さらに、水中の物体を取りに行き、潜水艇のダイナミクスが変化した状態で、決められた軌道にそって移し替える実験

を試みた。実験に用いた潜水艇は 4 台のスラスターを用いて Surge, Sway, Heave, Yaw 運動を制御するもので、残る Pitch, Roll 運動については潜水艇の重心と浮心の位置関係を調節して復原力で抑えたものである。実験から次の結論を得た。

- (1) 超音波位置計測装置を含めた、潜水艇の軌道追従制御の基本システムを構築し、動作を確認することができた。
- (2) 3次元軌道を追従させ、軌道追従制御の基本的な動作確認を行った。設定された軌道との誤差は、最大で 5 cm 以内に収まり、良好な制御結果が得られた。
- (3) 潜水艇の重量の約 10% に相当する、質量 530 g、水中重量 60 g の水中物体を吊上げ、ダイナミクスが変化した状態で移し替えることができた。深さ方向の制御ではスラスターの水流が艇体に当たるため、軌道追従はあまり良くなかったが、他の運動モードについてはパラメーターの変動にも関わらず良好な制御結果を得ることができた。

## 参 考 文 献

- 1) J. A. Pritzlaff, "An Over View of Remotely Operated Vehicles (ROVs)", 8th Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 6, pp. 49-60, Hague, 1989.
- 2) 石寺博, 津坂康和, 伊藤讓, 大石哲朗, 千葉賢, 牧岳彦, "遠隔操作式無人潜水艇の運動シミュレーション", 日本造船学会論文集, 第 158 号, pp. 157-168, 1985.
- 3) D. R. Yoerger and J. -J. E. Slotine, "Robust Trajectory Control of Underwater Vehicles", IEEE Journal of Ocean Engineering, Vol. OE-10, No. 4, pp. 462-469, 1985.
- 4) D. R. Yoerger J. B. Newman and J. -J. E. Slotine, "Supervisory Control System for the JASON ROV", IEEE Journal of Ocean Engineering, Vol. OE-11, No. 3, pp. 392-400, 1986.
- 5) F. Harashima J. -X. Xu and H. Hashimoto, "Tracking Control of Robot Manipulators Using Sliding Control", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. PE-2, No. 2, pp. 169-176, 1987.
- 6) J. -J. E. Slotine and J. A. Coetsee, "Adaptive Sliding Controller Synthesis for Non-linear Systems", Int. J. Control, Vol. 43, No. 6, pp. 1631-1651, 1986.
- 7) Vadim I. Utkin, "Variable Structure Systems with Sliding Modes", IEEE Trans. on AC, Vol. AC-22, No. 2, 1977.
- 8) 加藤寛一郎, 大屋昭男, 柄沢研二, "航空機力学入門", 東京大学出版会
- 9) 藤井輝夫, 浦環, "ニューラルネットによる潜水艇の運動制御—水平航行への適用—", 日本造船学会論文集, 第 166 号, pp. 503-511, 1989.
- 10) 小寺山亘, 中村昌彦, 金子新, 経塚雄策, 柏木正, 稲田勝, 石寺博, 伊藤讓, "海洋観測用曳航体の開発研究", 日本造船学会論文集, 第 166 号, pp. 485-495, 1989.