(昭和 60 年 11 月 日本造船学会秋季講演会において講演)

遠隔操作式無人潜水艇の運動シミュレーション

正員	石 寺	博*	津 坂	康 和*
	伊 藤	譲*	大 石	哲 朗*
	千 葉	賢*	正員	牧 岳彦*

Motion Simulation of a Remotely Operated Vehicle (ROV)

by Hiroshi Ishidera, <i>Member</i>	Yasukazu Tsusaka
Yuzuru Ito	Tetsuro Oishi
Satoshi Chiba	Takehiko Maki, <i>Member</i>

Summary

Maneuverability of the MURS 300 Mark II (a Remotely Operated Vehicle), developed for inspecting underwater parts of hydroelectric dam facilities, is discussed in this paper based on the results of the computer simulation and the water tank test.

A mathematical model of the submersible operation is built on the equation of a six degree freedom motion of a rigid body. Gravity force, buoyancy, hydrodynamic forces and thrusts are considered as external forces in the model. Cable tension is not included because of its negligibly small force in calm water. Hydrodynamic forces, drag, lift, added mass and so on are determined by the wind tunnel test and the water tank test.

Thrusts are also measured in a water tank test. Being equipped with neither tail wing nor stabilizer, ROVs are usually characterized with their relatively poor directional stability. If a step input of thrust is added, ROVs are unlikely to move on a straight track without supplemental manipulation of thrusters.

An automatic heading control system can be a solution to improve directional stability of ROVs.

In case of the MURS 300 Mark II, a step input of its forward thrust causes its ascending because of the center of its horizontal thrust located slightly below its gravity center unless an automatic depth control system is installed. Given a rectangular pulse thrust, the MURS 300 Mark II equipped with automatic heading and depth control systems automatically returns to an original place where an operator sets a joystick in a neutral position.

This operational characteristic of the MURS 300 Mark II is quite useful for underwater structure inspections. The results of a full scale experiment performed in a water tank agree to and prove the computer simulation outputs.

記 号

A_{tj} ($i, j=1, \dots, 6$): 付加質量等
 $C_{Fx}, C_{Fy}, C_{Fz}, C_{Nx}, C_{Ny}, C_{Nz}, C_{N\omega x}, C_{N\omega y}, C_{N\omega z}$: 流体
 力係数
 D : プロペラ直径
 F_I, F_F, F_G, F_B, F_T : 外力ベクトル
 F_{HR}, F_{HL}, F_S, F_V : 推力
 g : 重力加速度

$I_{xx}, I_{yy}, I_{zz}, J_{xy}, J_{xz}, J_{yz}$: 慣性モーメント, 慣性乗積

J : 前進率

K_T : 推力係数

$K_G, K_1, \dots, K_6$: 制御回路定数

M : 慣性行列

m : 質量

n : プロペラ回転数

t : 時間

t_r : 推力減少係数

t_K : 推力減少率

T_B, tT_B : 座標変換行列

* Mitsui Ocean Development & Engineering Co., Ltd.

- $\mathbf{U}$: 潮流ベクトル
 (u_x, u_y, u_z) : 潮流速度成分
 (V_x, V_y, V_z) : 速度成分 (船体座標系)
 (V_{xe}, V_{ye}, V_{ze}) : 速度成分 (静止座標系)
 V_R : 対水速度
 (V_{Rx}, V_{Ry}, V_{Rz}) : 対水速度成分
 $\dot{\mathbf{V}}$: 加速度ベクトル
 (x_G, y_G, z_G) : 重心座標
 (x_B, y_B, z_B) : 浮心座標
 y_H, z_H, z_S : スラスタ取付位置
 α, β, γ : 迎え角, 横すべり角等
 (ϕ, θ, ψ) : オイラー角
 ρ : 水の密度
 $(\omega_x, \omega_y, \omega_z)$: 角速度
 η : 角速度計ゲイン
 ∇, ∇_R : 排水容積, 基準体積

1 緒 言

三井海洋開発㈱は、東京電力㈱の委託により、1979～1985 年にかけて水力発電設備没水部点検システムとして、小型の遠隔操作式無人潜水艇 (ROV) を開発した。水力発電用のダムは、日本全国で約 1500 ケ所存在するが、最も古いものは今世紀初頭の建設であり、竣工以来既に数十年を経過したダムが数多く存在している。したがってこれらのダム設備を今後とも使用していくにあたっては、経年変化による劣化や異常の有無を適確に点検し、把握するシステムが必要である。ダム点検用の ROV は、その第 1 ステップとして、TV カメラとスチールカメラにより没水部の視認検査を行う目的で開発された。即ちオペレータは、陸上の TV モニターにより水中構造物を視認しつつ、ジョイスティックにより ROV 搭載のスラスタを遠隔操作して水中を移動させ、VTR あるいはスチール写真によって対象を記録するシステムである。

ダムの没水部には、例えば水圧鉄管のように非常に狭隘な箇所が存在するため、その点検システムには、

- (1) 小型でコンパクトであること。
- (2) テザーケーブルが軽く、しなやかであること。
- (3) 操縦レバーに対する追従性に優れ、操作性がよいこと。

(4) 水中でのホバリング、方位および深度の保持など高い運動性能を有すること

などが要求される。これらのうち、(3) と (4) を実現するため、ダム点検用 ROV には方位および深度の自動制御機構が付加されている。

水中航走体の運動解析モデルは、6 自由度の剛体運動方程式として表現され、作用する外力には、重力、浮

力、抗力および揚力などの非慣性的流体力、付加質量および付加慣性モーメントなどの慣性的流体力、推力およびケーブル力などがある。形状が複雑で建造実績の少ない ROV に働く流体力は、計算あるいは経験によって決めることは困難で、3 分力試験あるいは強制動揺試験などによって計測される。有索自航式 ROV は、船舶や航空機の場合と異なり、前進速度が他の運動モードの速度とほぼ同じオーダーとなるため、その運動方程式は非線形のままシミュレートしなければならない。

このような有索自航式 ROV の運動解析シミュレーションについては、Russell¹⁾, Fyfe²⁾, Lewis³⁾らが、運動方程式の導入、流体力の測定などを行っているが、実用的な自動制御機構を組み入れたシステムについてシミュレーションした例はない。本論文は、自動制御された有索自航式 ROV の運動性能を、モデルによってシミュレートしその有効性を確認するとともに、実機実験によって検証するものである。なお本 ROV は平水中で運航されるため、テザーケーブルによる拘束力は小さいものとして無視した。

2 運動方程式

2.1 座標系と変換行列

座標系はすべて右手系とし、静止座標系と船体座標系を用いる。Fig. 1 に示すごとく、静止座標系は地球上の 1 点を原点とし、鉛直下方に z_e 軸、水平面内にて潮流速度ベクトル $\mathbf{U}$ と平行逆向きに x_e 軸をとる。船体座標系は、船体中心に原点をとり、船体軸前方に x 軸、 x 軸と垂直下向きに z 軸をとる。オイラー角は Fig. 2 のように定義する。したがって静止座標系から船体座標系への変換行列 T_B は、オイラー角を用いて次式で示される。

Fig. 1 Stationary coordinate system and body coordinate system

$$T_B = \begin{bmatrix} \cos \theta \cos \phi & \cos \theta \sin \phi & -\sin \theta \\ \sin \phi \sin \theta \cos \phi - \cos \phi \sin \psi & \sin \phi \sin \theta \sin \phi + \cos \phi \cos \psi & \sin \phi \cos \theta \\ \cos \phi \sin \theta \cos \phi + \sin \phi \sin \psi & \cos \phi \sin \theta \sin \phi - \sin \phi \cos \psi & \cos \phi \cos \theta \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} V_{xe} \\ V_{ye} \\ V_{ze} \end{bmatrix} = {}^t T_B \begin{bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで添字 t は転置行列を示す。(2)式を時間で積分すれば、ROV の空間位置が求まる。

またオイラー角速度と角速度との関係は次式で示される。

$$\begin{bmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \sin \phi \tan \theta & \cos \phi \tan \theta \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi \sec \theta & \cos \phi \sec \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (3)$$

2.2 運動方程式

運動方程式は船体座標系で記述する。水中における物体の運動方程式は、運動エネルギーを用いて Lamb⁴⁾ によって求められている。6 項列ベクトルの形式で表現し直すと以下のようになる。

$$M \dot{\mathbf{V}} + \mathbf{F}_I = \mathbf{F}_F + \mathbf{F}_G + \mathbf{F}_B + \mathbf{F}_T \quad (4)$$

以下各項ごとに座標系成分で示す。

(1) 慣性力

慣性力は、加速度ベクトルと慣性行列によって表わされる。

$$\dot{\mathbf{V}} = {}^t [\dot{V}_x, \dot{V}_y, \dot{V}_z, \dot{\omega}_x, \dot{\omega}_y, \dot{\omega}_z] \quad (5)$$

Fig. 2 Eulerian angles

(1) 式を用いると、静止座標系と船体座標系での速度成分の関係は次式で示される。

Table 1 Principal Particulars of MURS 300 MK II

Items	Symbols	Value	Items	Symbols	Value
Length	L	0.96 m	Displacement volume	∇	0.2 m ³
Width	W	0.76 m	Total body volume	∇_R	0.378 m ³
Height	H	0.63 m	Center of gravity	X_G	-0.013 m
Mass	m	200 kg		Y_G	0 m
Moment of inertia	I_{xx}	12.3 kg·m ²		Z_G	0.006 m
	I_{yy}	17.7 kg·m ²	Center of buoyancy	X_B	-0.013 m
	I_{zz}	19.5 kg·m ²		Y_B	0 m
	J_{xy}	-0.2 kg·m ²		Z_B	-0.094 m
	J_{xz}	-0.9 kg·m ²	Location of thrusters	Y_H	0.5 m
	J_{yz}	0 kg·m ²		Z_H	0.064 m
Added mass	A_{11}	157 kg		Z_S	0.064 m
	A_{22}	197 kg	Rotational drag coefficients	$C_{N\omega x}$	-0.16
	A_{33}	270 kg		$C_{N\omega y}$	-0.37
	A_{44}	7.9 kg·m ²		$C_{N\omega z}$	-0.32
	A_{55}	12.8 kg·m ²			
	A_{66}	8.5 kg·m ²			
	A_{ij}	0			
	(i≠j)				

$$M = \begin{bmatrix} m + A_{11} & A_{12} & A_{13} & A_{14} & mz_G + A_{15} & -my_G + A_{16} \\ A_{21} & m + A_{22} & A_{23} & -mz_G + A_{24} & A_{25} & mx_G + A_{26} \\ A_{31} & A_{32} & m + A_{33} & my_G + A_{34} & -mx_G + A_{35} & A_{36} \\ A_{41} & -mz_G + A_{42} & my_G + A_{43} & I_{xx} + A_{44} & -J_{xy} + A_{45} & -J_{xz} + A_{46} \\ mz_G + A_{51} & A_{52} & -mx_G + A_{53} & -J_{xy} + A_{54} & I_{yy} + A_{55} & -J_{yz} + A_{56} \\ -my_G + A_{61} & mx_G + A_{62} & A_{63} & -J_{xz} + A_{64} & -J_{yz} + A_{65} & I_{zz} + A_{66} \end{bmatrix} \quad (6)$$

ここで, $(\cdot) = \partial/\partial t$

質量はロードセルによって実測した。重心位置, 慣性モーメントおよび慣性乗積は, 搭載物重量および搭載位置などから計算によって求めた。また付加質量および付加慣性モーメントは, 水槽試験によって求めた。MURS-

300 MK II の主要目を Table 1 に示す。

(2) 遠心力および慣性的流体力等 F_I

慣性的流体力については, 東等⁵⁾が行っているように, 対水速度による運動エネルギーを用いて定めると F_I は次のようになる。

$$F_I = \begin{bmatrix} \omega_y(mV_z + my_G\omega_x - mx_G\omega_y + A_{33}V_{Rz}) - \omega_z(mV_y + mx_G\omega_z - mz_G\omega_x + A_{22}V_{Ry}) - A_{11}\dot{u}_x \\ \omega_z(mV_x + mz_G\omega_y - my_G\omega_z + A_{11}V_{Rx}) - \omega_x(mV_z + my_G\omega_x - mx_G\omega_y + A_{33}V_{Rz}) - A_{22}\dot{u}_y \\ \omega_x(mV_y + mx_G\omega_z - mz_G\omega_x + A_{22}V_{Ry}) - \omega_y(mV_x + mz_G\omega_y - my_G\omega_z + A_{11}V_{Rx}) - A_{33}\dot{u}_z \\ \omega_y(-J_{xz}\omega_x - J_{yz}\omega_y + I_{zz}\omega_z + A_{66}\omega_z) - \omega_z(-J_{xy}\omega_x + I_{yy}\omega_y - J_{yz}\omega_z + A_{55}\omega_y) \\ + my_G(V_y\omega_x - V_x\omega_y) + mz_G(V_z\omega_x - V_x\omega_z) + (A_{33} - A_{22})V_{Ry}V_{Rz} \\ \omega_z(I_{xx}\omega_x - J_{xy}\omega_y - J_{xz}\omega_z + A_{44}\omega_x) - \omega_x(-J_{xz}\omega_x - J_{yz}\omega_y + I_{zz}\omega_z + A_{66}\omega_z) \\ + mz_G(V_z\omega_y - V_y\omega_z) + mx_G(V_x\omega_y - V_y\omega_x) + (A_{11} - A_{33})V_{Rx}V_{Rz} \\ \omega_x(-J_{xy}\omega_x + I_{yy}\omega_y - J_{yz}\omega_z + A_{55}\omega_y) - \omega_y(I_{xx}\omega_x - J_{xy}\omega_y - J_{xz}\omega_z + A_{44}\omega_x) \\ + mx_G(V_x\omega_z - V_z\omega_x) + my_G(V_y\omega_z - V_z\omega_y) + (A_{22} - A_{11})V_{Rx}V_{Ry} \end{bmatrix} \quad (7)$$

ここで

$$V_{Rx} = V_x - u_x, \quad V_{Ry} = V_y - u_y, \quad V_{Rz} = V_z - u_z \quad (8)$$

(3) 非慣性的流体力 F_F

$$F_F = \frac{1}{2}\rho V_R^2 \begin{bmatrix} C_{Fx}(\alpha, \beta)\nabla_R^{2/3} \\ C_{Fy}(\beta, \gamma)\nabla_R^{2/3} \\ C_{Fz}(\alpha, \gamma)\nabla_R^{2/3} \\ C_{Nx}(\gamma)\nabla_R \\ C_{Ny}(\alpha)\nabla_R \\ C_{Nz}(\beta)\nabla_R \end{bmatrix} + \frac{1}{2}\rho\nabla_R^{5/3} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ C_{N\omega x}\omega_x|\omega_x| \\ C_{N\omega y}\omega_y|\omega_y| \\ C_{N\omega z}\omega_z|\omega_z| \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1} \frac{V_z - u_z}{V_x - u_x} \\ \beta &= \tan^{-1} \frac{V_y - u_y}{V_x - u_x} \\ \gamma &= \tan^{-1} \frac{V_z - u_z}{V_y - u_y} \end{aligned} \quad (10)$$

$C_{Fx}, C_{Fy}, C_{Fz}, C_{Nx}, C_{Ny}, C_{Nz}$ は 3 分力試験より求めた。Fig. 3 に結果を示す。 $C_{N\omega x}, C_{N\omega y}, C_{N\omega z}$ は強制制動試験より求めた。

(4) 重力および浮力

$F_G + F_B$

$$= \begin{bmatrix} -(m - \rho\nabla)g \sin \theta \\ (m - \rho\nabla)g \sin \phi \cos \theta \\ (m - \rho\nabla)g \cos \phi \cos \theta \\ (my_G - \rho\nabla y_B)g \cos \phi \cos \theta - (mz_G - \rho\nabla z_B)g \sin \phi \sin \theta \\ -(mz_G - \rho\nabla z_B)g \sin \theta - (mx_G - \rho\nabla x_B)g \cos \phi \cos \theta \\ (mx_G - \rho\nabla x_B)g \sin \phi \cos \theta + (my_G - \rho\nabla y_B)g \sin \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

(5) 推力

$$F_T = \begin{bmatrix} F_{HL} + F_{HR} \\ F_S \\ F_V \\ -F_{SzS} \\ (F_{HL} + F_{HR})z_H \\ (F_{HL} - F_{HR})y_H \end{bmatrix} \quad (12)$$

MK II は, 前・後進および旋回のための水平スラスタを艇体後方に 2 台, また潜航, 浮上および横進のためのスラスタを, 艇体中央部に鉛直軸より左右対称に 45° 傾けて 2 台, 合計 4 台のスラスタを搭載している。

各スラスタは, 単体ではすべて同一仕様であり, 静止推力は正転約 140N, 逆転約 130N である。

スラスタの配置を Fig. 4 に示す。

プロペラ推力は, 船舶の場合と同様に推力減少係数を用いて次式で表わせる。

$$\text{推力} = (1 - t_r)K_T(J)\rho n^2 D^4 \quad (13)$$

推力減少係数は, 試験水槽における静止推力試験および速力試験より求めた。また推力係数 $K_T(J)$ は, ROV の速度が小さく前進率 J が 0.2 以下であるため, 次式のように J の 1 次式で近似した。

$$K_T(J) = K_T(0)(1 - t_K J) \quad (14)$$

3 スラスタ制御

ジョイスティックによる ROV の運動制御は, 前後進,

Fig.3 Hydrodynamic characteristics for the MURS 300 MK II

横進、潜航、浮上および旋回の4つの運動モードについて行われる。Fig.3 から明らかなように、本 ROV は方向の静安定が負であり、ピッチングあるいはローリングと異なり BG モーメントによる固有の復原力がないため、保針性能が悪い。また水中での点検作業には深度の

Fig.4 Location of thrusters

保持が重要である。このような ROV の操縦性向上のため、旋回および深度については、角速度センサーおよび深度センサーによってそれぞれフィードバック制御を行っている。制御の主要目的は、ジョイスティックがオフになった時点での方位と深度を保持することにあるため、深度制御の場合にはジョイスティックオフ時の深度

Fig.5 Block diagram of the thruster control

Fig. 6 Response of the ROV without automatic control system for a step input of horizontal thrust

Fig. 7 Response of the ROV without automatic control system for a step input of horizontal thrust

Fig. 8 Trajectory of the ROV going ahead without automatic control system

Fig. 9 Response of the automatic controlled ROV for a step input of the horizontal thrust

値を保持し、それ以後の深度との差をとってフィードバックを行っている。また方位制御では、角速度センサーの出力を積分して制御を行っており、更に減衰力を補なうためレートフィードバックを加えている (Fig. 5 参照)。

Fig.10 Response of the automatic controlled ROV for a step input of the horizontal thrust

Fig.12 Response of the ROV without automatic control system for a step input of side thrust

Fig.11 Response of the ROV without automatic control system for a step input of side thrust

Fig.13 Trajectory of the ROV going to the right without automatic control system

4 結果および考察

4.1 ステップ応答

ROV は、細長体として近似できる通常の船舶や航空機と異なり、直方体あるいは球に近い形状をもつものが多い。これは ROV の運用使命により、前進の場合と同程度の運動速度および操作性が、潜航、浮上、横進、旋回などにも要求されるためである。また尾翼や安定翼をもたないため方向の静安定が悪く、そのままではなかなか操縦にくい。このような ROV の操縦性能を評価するため、目標物への接近等 ROV の運航上よく用いられるステップ入力に対する応答を調べる。

(1) 前進

自動制御がない場合の結果を Fig. 6~8 に、自動制御がある場合の結果を Fig. 9, 10 に示す。入力後約 5 秒で最大速度 (約 0.9 m/s) に達するが、自動制御がない場合には運動によって横すべり角 β が誘起されると、ジョイスティック操作を加えない限り ROV は回転を続けてしまう。また水平スラスタ取付位置が、重心よりも下側にあるため頭上げモーメントを発生し、上昇およびピッチングを生ずる。これに対し自動制御がある場合には、方位および深度の変化は非常に小さく、一定深度を保持したまま直進することが示されている。ピッチング

Fig. 14 Response of the automatic controlled ROV for a step input of side thrust

は、振幅 3° 、周期 2.5 秒であるが、観察作業中に全速前進することはなく、現実には振幅はさらに小さくなるため、ほとんど作業の支障とはならない。

(2) 横進

結果を Fig. 11~15 に示す。Fig. 13 から明らかなように、横進時の流体力モーメントが大きいいため、ほとんど直進することなく旋回してしまう。横推力の推力中心も重心よりやや下側に位置しているため、正の推力によって負のローリングモーメント (右舷上げ) を発生し振動する。しかし前進に比べると推力は約 1/5 であるため、ローリング角は小さく、また浮上速度も小さい (Fig. 11 および Fig. 12 参照)。方位の自動制御の効果は顕著で、回転角はほとんどなく直進している。深度方向については、もともと変化が小さいため効果は判定しにくい (Fig. 14, 15 参照)。

(3) 潜航

潜航時には、縦運動と横運動はほとんどカップリングしないため、自動制御の効果は判定できない。抗力が働くため、潜航するとともに後退する (Fig. 16~18 参照)。

(4) 旋回

自動制御の効果としては、ゲインを等しく設定すれば、ジョイスティックからの指示値通りの角速度が得ら

Fig. 15 Response of the automatic controlled ROV for a step input of side thrust

Fig.16 Response of the ROV without automatic control system for a step input of vertical thrust

Fig.17 Response of the ROV without automatic control system for a step input of vertical thrust

Fig.18 Trajectory of the ROV submerging

Fig.19 Response of the automatic controlled ROV for a step input of turning moment

れることであり、その他は制御なしの場合と同じである。

Fig. 19 から明らかなように、約 2 秒で指示値に整定し一定角速度で旋回を続ける。ローリングとピッチングは発散傾向にあるが、これは各船体軸まわりの慣性モーメントと付加慣性モーメントの和が異なり、負の減衰力項を生ずるためである。しかしながら、減衰力は慣性力や復原力に比べて小さく、発散傾向は極めてゆるやかであること、ROV ではテザーケーブルのねじりを防止するため原則として 1 回転以上はしないことを考慮すると、実用上はほとんど問題とならない。並進運動とのカップリングはほとんどなく、その場旋回が可能である (Fig. 19, 20 参照)。

4.2 パルス応答

目標物探索あるいは観察時に用いられる、パルス入力に対する応答を調べる。

(1) 潜航

最大入力を 10 秒間保持した後の応答を Fig. 21~24 に示す。Fig. 21 および Fig. 22 から明らかなように、自動制御がない場合にはジョイスティックオフの後も潜航を続け、11 秒後では速度は 0 とならず 1m 以上も行過ぎてしまう。これに対し自動制御を付加した場合には、ジョイスティック操作を何ら付加することなく、約 4 秒後

Fig. 20 Response of the automatic controlled ROV for a step input of turning moment

に元の深度へ復帰し整定している (Fig. 23, 24 参照)。水の濁度が大きいダムでは、目標物を視認するためには至近距離まで近づかねばならず、空中に比べ視界が非常に小さい。したがって一旦目標を見失うと、再度発見す

Fig. 21 Response of the ROV without automatic controlled system for a pulse input of vertical thrust

Fig. 22 Trajectory of the ROV submerging without automatic control system

Fig. 23 Response of the automatic controlled ROV for a pulse input of vertical thrust

Fig. 25 Response of the automatic controlled ROV for a pulse input of turning moment

Fig. 24 Trajectory of the automatic controlled ROV submerging

るためには時間を要する。こうした環境下で水中構造物の検査を行う ROV にとって、このような運動機能の付加は、作業効率をあげる上で大きな効果を有する。

(2) 旋回

Fig. 26 Example of test data

自動制御がある場合の結果を Fig. 25 に示す。ジョイスティックオフ後、約 0.5 秒で最終値に到達するが、積分回路を加えなかったため立ち上がり時の誤差が残る、目標値と約 13° ずれる。しかしながら TV カメラの水平画角は 77° であるため、実用上ほとんど支障はない。

Fig. 27 Comparison between experiment data and calculation results

4.3 実験値との比較

長さ 8m, 幅 5m, 深さ 5m の角水槽において実機実験を行った。入力は, Fig. 5 の試験入力ポートよりステップ入力を与え, ゲイン K_G および K_2 をパラメータとして実験を行った。応答は, 積分器の直後にある出力ポートより出力した。Fig. 26 に試験データの一例と, 立上り時間および最大オーバーシュートの定義を示す。

Fig. 27 に実験データと計算結果との比較を示す。最大オーバーシュートおよび立上り時間とも, 実験と計算結果とは良く一致しており, 本シミュレーションが妥当であることを示している。

5 結 言

以上の結果から次の結論を得る。

(1) 平水中での遠隔操作式無人潜水艇 (ROV) の運動解析方法を確立した。

(2) 方位および深度の自動制御が, ROV の運航上有用であることが示された。

参 考 文 献

- 1) G. T. Russel, P. Bellec : The Investigation of submersible Manoevrability by simulation, CH 1685-7, 1981 IEEE.
- 2) A. J. Fyfe, G. T. Russel : Closed Loop Control Systems and Hydrodynamics of a Tethered Submersible, OTC 3767 (1980).
- 3) D. J. Lewis, J. M. Lipscombe, P. G. Thomasson : The Simulation of Remotely Operated Underwater Vehicles, ROV '84.
- 4) H. Lamb : Hydrodynamics Sixth Edition.
- 5) A. Azuma, K. Nasu : The Flight Dynamics of an Ocean Space Surveying Vehicle, 宇宙航空研究所レポート No. 547 (Vol. 42, No. 2), 1977.