ることによって、お互いの弱点を補完しあい、海底ケーブルの信頼性を高めていくことが期待される。

AE 1000 の構造を Fig. 1¹⁾ に示す。Table 1¹⁾ にその主要目を示す。詳細な構造については文献 1) を参照されたい。

Fig. 2¹⁾ にその調査活動行程を示す。主に、i) 潜航、ii)

バラスト切り離し後の海底ケーブルの探索、iii) 磁気センサーによる海底ケーブル追跡と水中 TV カメラによる調査・記録、iv) バラスト切り離し後の浮上の 4 つから成り立っている。

本研究は、それぞれの行程における誘導制御法について

Fig. 1 Arrangement of AE1000¹⁾

Fig. 2 Operation Procedure of AE1000¹⁾

考察する。本論は、そのうち、ii)とiii)の部分の高度および深度制御を行う縦方向運動制御を扱う。

誘導制御には、ファジリアルゴリズムを用いる。ファジリアルゴリズムはあいまいさを持った言語型ルールによって記述されるため、熟練者の制御ルールを取り入れることができ、非線形システムや数学的アルゴリズムでは表されない問題に適用が可能である。著者の一人は、AUV や水中曳航体の姿勢および誘導制御にファジリアルゴリズムを用いてその有効性を示している^{3),4),5),6)}。

本論は、まず水槽での AE 1000 の動的応答（ステップ応答と周波数応答）試験の結果と数値シミュレーションとの比較を示す。次に、高度制御法を説明し、高度および深度制御試験の結果と数値シミュレーションとの比較を示す。さらに、海中実験を実施し、そのなかで高度制御試験結果を示す。その後、数値シミュレーションを通して、ファジィコントローラの最適化および未知の環境においても目標高度を維持させるための適応型ファジィコントローラについて考察する。

2. 動的応答特性

基本的な AE 1000 の動的応答特性を調べるために、ステップ応答と周波数応答試験を行い、また運動の線形数学モデルとの比較を行った。

2.1 水槽試験

動的応答試験は、長さ 247 m、幅 12.5 m、水深 7.0 m の曳航水槽にて行った。ビーコンアンテナを外した状態の AE 1000 を使い、地上コンピュータにサンプリングデータを伝送する直径 3 mm の同軸ケーブルを取り付けて実験を行った。AE 1000 の外形図を Fig. 3 に示す。胴体の中央縦断面形状は NACA 0028 を、全可動式昇降舵の断面形状は NACA 0010 を用いた。実験では、水平安定尾翼に Fig. 4 に示すような 2 種類を用いた。大型と小型の面積比は 2 : 1 である。前進速度は 0.6 m/s から 1.0 m/s までの間に設定した。

2.2 AE 1000 の線形運動方程式

Fig. 5 に示す AE 1000 の (O - XZ) 座標系の縦方向の線形運動方程式は、状態変数 $x=[u, w, q, \theta]^T$ (u : X 方向微小擾乱速度, w : Z 方向の微小擾乱速度, q : 微小擾乱角速度, θ : 微小擾乱ピッチ角) と出力変数 δe (全可動式昇降舵翼角) を用いて次のように表せる。

$$A \cdot \dot{x}(t) = B \cdot x(t) + C \cdot \delta e(t) \quad (1)$$

ここで、行列 A の要素を a_{ij} ($i, j=1, \dots, 4$)、行列 B の要素を b_{ij} ($i, j=1, \dots, 4$)、行列 C の要素を c_i ($i=1, \dots, 4$) とすると、それらは次のように表せる。

$$\left. \begin{aligned} a_{11} &= m + A_{11}, & a_{12} &= 0 \\ a_{13} &= m \cdot Z_G, & a_{14} &= 0 \\ a_{21} &= 0, & a_{22} &= m + A_{33} \\ a_{23} &= -m \cdot X_G + A_{35}, & a_{24} &= 0 \\ a_{31} &= m \cdot Z_G, & a_{32} &= -m \cdot X_G + A_{35} \\ a_{33} &= I_{YY} + A_{55}, & a_{34} &= 0 \\ a_{41} &= 0, & a_{42} &= 0 \\ a_{43} &= 0, & a_{44} &= 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

PLAN VIEW

PROFILE

Fig. 3 Configuration of AE1000

LARGE HORIZONTAL STABILIZER

SMALL HORIZONTAL STABILIZER

Fig. 4 Configurations of horizontal stabilizers

Fig. 5 Coordinate system

$$\begin{aligned}
 b_{11} &= FHXu, \quad b_{12} = 0, \\
 b_{13} &= -(m + A_{33}) \cdot Uz0 \\
 b_{14} &= (\rho \cdot V_B - m) \cdot g \cdot \cos \theta \\
 b_{21} &= 0, \quad b_{22} = FHZw \\
 b_{23} &= (m + A_{11}) \cdot Ux0 + FHZq \\
 b_{24} &= (\rho \cdot V_B - m) \cdot g \cdot \sin \theta \\
 b_{31} &= (A_{33} - A_{11}) \cdot Uz0 \\
 b_{32} &= (A_{33} - A_{11}) \cdot Uz0 + MHYw \\
 b_{33} &= -m \cdot (Z_C \cdot Uz0 + X_C \cdot Ux0) \\
 &\quad + A_{35} \cdot Ux0 + MHYq \\
 b_{34} &= (-m \cdot Z_C + \rho \cdot V_B \cdot Z_B) \cdot g \cdot \cos \theta \\
 &\quad - (-m \cdot X_C + \rho \cdot V_B \cdot X_B) \cdot g \cdot \sin \theta \\
 b_{41} &= 0, \quad b_{42} = 0, \quad b_{43} = 1, \quad b_{44} = 0
 \end{aligned} \quad (3)$$

$$c_1 = 0, \quad c_2 = FHZ\delta e, \quad c_3 = MHY\delta e, \quad c_4 = 0 \quad (4)$$

ただし、 m ：潜水機の質量、 A_{ij} ：付加質量、 I_{yy} ：慣性モーメント、 (X_C, Z_C) ：重心の座標、 (X_B, Z_B) ：浮心の座標、 $(Ux0, Uz0)$ ：釣合状態での前進速度成分、 V_B ：排水容積、 ρ ：流体密度、 g ：重力加速度、 θ ：トリム角、 $FHXu$ 、 $FHZw$ 、 $FHZq$ 、 $MHYw$ 、 $MHYq$ 、 $FHZ\delta e$ 、 $MHY\delta e$ ：流体力微係数。

付加質量は、胴体部分と翼部分の和として求め、胴体部分に関しては三次元吹き出し特異点分布法を用いて求め、翼部分に関しては二次元平板のものを用いた。流体力微係数についても、胴体部分と翼部分の和として求めた。胴体部分に関しては縮尺比 1/2.5 の付加物を付けない状態の模型を用いて回流水槽にて流体力計測を行い、その結果から流体力微係数を求め、翼部分に関しては文献(7)に従って求めた。しかし、AE 1000 には上下スラスタやパラストなどの穴があり、後述の動的応答シミュレーションでは、胴体の流体力微係数を、ピッチ角や高度変化の実験値とのカーブフィッティングによって算定した。Table 2 に潜水機の付加質量と流体力微係数の推定値（縮尺模型と AE 1000）と大型水平安定尾翼付き縮尺模型の実験値を示す。AE 1000 の揚力特性が付加物の影響によって縮尺模型のものより悪化することがわかる。

2.3 動的応答

Fig. 6 に前進速度 0.55 m/s での大型の水平安定尾翼を

Table 2 Hydrodynamic Coefficients

(1) AE1000 with Large Horizontal Stabilizer

ITEMS	ESTIMATED	ITEMS	ESTIMATED*	MEASURED	ESTIMATED**
A11	$0.164 \cdot \rho \cdot V_B$	FHZw/C1	-1.233	-1.245	-1.031
A33	$1.588 \cdot \rho \cdot V_B$	MHYw/C2	-0.153	-0.143	-0.174
A35	$0.086 \cdot \rho \cdot V_B^{4/3}$	FHZq/C2	0.099	-	0.007
A55	$0.530 \cdot \rho \cdot V_B^{5/3}$	MHYq/C3	-0.122	-	-0.117

(2) AE1000 with Small Horizontal Stabilizer

ITEMS	ESTIMATED	ITEMS	ESTIMATED**
A11	$0.164 \cdot \rho \cdot V_B$	FHZw/C1	-0.829
A33	$1.502 \cdot \rho \cdot V_B$	MHYw/C2	-0.076
A35	$-0.005 \cdot \rho \cdot V_B^{4/3}$	FHZq/C2	0.105
A55	$0.433 \cdot \rho \cdot V_B^{5/3}$	MHYq/C3	-0.070

$C1 = \rho \cdot U_0 \cdot L_B^3 / 2$, $C2 = \rho \cdot U_0 \cdot L_B^2 / 2$, $C3 = \rho \cdot U_0 \cdot L_B^4 / 2$
 (*): Scaled Model
 (**): AE1000

取り付けけた場合のステップ応答（昇降舵の翼角 10° の変化）の実験結果と数値シミュレーションとの比較を示す。Fig. 7 に同じく小型の水平安定尾翼を取り付けた場合の結果を示す。水平安定尾翼を小さくすることによって、ピッチ角変化や上昇・下降速度を大きくすることがわかる。数値シミュレーション結果はほぼ実験値と一致しているが、ピッチ角に関しては減衰係数に違いが見られる。

Fig. 8 に前進速度 0.55 m/s での大型の水平安定尾翼を取り付けた場合の周波数応答（昇降舵の翼角 5° の振幅、周期 15 秒）の実験結果と数値シミュレーションとの比較を示す。Fig. 9 に同じく小型の水平安定尾翼を取り付けた場合の結果を示す。安定水平尾翼を小さくすることによって、ピッチ角振幅は大きくなるが、その位相遅れは約 90° の変化はあまり見られない。ピッチ角振幅や高度変化の数値シミュレーション結果は実験値とほぼ一致しているが、ピッチ角の位相に関しては、前述の減衰係数に関連して差が見られる。

3. 高度制御および深度制御

3.1 高度制御および深度制御法

(i) 高度制御法

海底からの潜水機の高度は音響高度計にて、またピッチ角は加速度計にて測定し、高度変化は全可動式昇降舵を作動させて行う。

高度制御は二つの部分から成り立つ（Fig. 10）。

(a) 潜水機が、目標高度を中心として、Band の幅を持つ領域の外側にいる場合、目標ピッチ角へのピッチ角制御を行う。

(b) 潜水機が、その領域内に入った場合、目標ピッチ角ゼロのピッチ角制御と目標高度への鉛直方向移動制御の両方を行う。

Fig. 6 Step response of AE1000 with large horizontal stabilizer

Fig. 8 Frequency response of AE1000 with large horizontal stabilizer

Fig. 7 Step response of AE1000 with small horizontal stabilizer

Fig. 9 Frequency response of AE1000 with small horizontal stabilizer

(a)の場合、ファジィコントローラに次に示す $\Delta\theta$ と $\Delta\dot{\theta}$ を入力する。

$$\Delta\theta = \theta - \theta_1, \quad \Delta\dot{\theta} = (\Delta\theta(t) - \Delta\theta(t - \Delta t)) / \Delta t \quad (5)$$

ここで θ は潜水機のピッチ角を、 θ_1 は目標ピッチ角を、 t は時間を、 Δt は制御の時間間隔を表す。二つの入力値を Fig. 11 に示すような三角形状のメンバーシップ関数を用いて、Negative Big (NB), Negative Small (NS), Zero (ZO), Positive Small (PS), Positive Big (PB) の5つのファジィ変数に変換する。また出力値である翼角変化 δp についてもファジィ変数に変換する。Table 3にあるファジィ推論 (MAX-MIN 合成と重心法⁸⁾) によって出力値 δp を求める。時刻 t における翼角 $\delta e(t)$ を次式で求める。

$$\delta e(t) = \delta e(t - \Delta t) + \alpha \cdot \delta p \quad (6)$$

(b)の鉛直方向移動制御では、次に示す Δh と $\Delta\dot{h}$ を入力とする。

$$\Delta h = h_1 - h, \quad \Delta\dot{h} = (\Delta h(t) - \Delta h(t - \Delta t)) / \Delta t \quad (7)$$

ここでは、 h は潜水機の高度を、 h_1 は目標高度を表す。ただし、高度の値の符号は重力方向をプラスとする。こうすることによって、深度制御を同様なアルゴリズムで行うことができる。この2つの入力値から Table 3と同様なファ

Fig. 10 Control strategy of altitude control

ジィ推論によって出力値 δh を求める。時刻 t における翼角を次式で求める。

$$\delta e(t) = \delta e(t - \Delta t) + \beta \cdot \delta h + \gamma \cdot \delta p \quad (8)$$

(ii) 深度制御法

深度制御では、高度制御における高度に関する情報の代わりに深度に関する情報 (深度計によって得られる潜水機の深度およびその時間変化) を用いるだけで、その他アルゴリズムは高度制御と同様である。

Fig. 11 Membership functions

Table 3 Fuzzy Rules

		$\Delta \dot{\theta}$					
		NB	NS	ZO	PS	PB	
$\Delta \theta$	NB	NB	NB	NB	NS	ZO	
	NS	NB	NB	NS	ZO	PS	
	ZO	NB	NS	ZO	PS	PB	
	PS	NS	ZO	PS	PB	PB	
	PB	ZO	PS	PB	PB	PB	

3.2 水槽実験

前述の動的応答試験と同じ実験状態で高度および深度試験を実施した。

Fig. 12 に前進速度 0.55 m/s での大型水平安定尾翼を用いた高度制御実験結果の一例を数値シミュレーション結果と比較して示す。初期速度を 1.64 m に、目標高度を 2.64 m とした。また、翼角の最大値を 17° とし、制御間隔を 50 msec とした。ファジィコントローラに関して、ピッチ角に関する Fig. 11 に示す b の値を 2.5 deg., ピッチ角速度については 0.5 deg./s, ピッチ角に関する出力については 0.015 deg. とした。高度については 1.0 m, 高度変化速度については 0.1 m/s, その出力を 0.015 deg. とした。また、(6) 式中の α を 5.0 に、(8) 式中の β および γ を 8.0 および 2.0 に、(5) 式中の θ_1 を 7° に、Band を 1.0 m に定めた。実験結果から、目標高度はほぼ達成されることがわかる。若干のオフセットが見られるが、これはファジィコントローラの中で釣合状態でのピッチ角がゼロではないにもかかわらず、 0° の目標ピッチ角のピッチ角制御を同時に行っていることによるものと思われる。また数値シミュレーション結果はほぼ潜水機の運動を表していることがわかる。

Fig. 13 に前進速度 0.6 m/s での小型水平安定尾翼を用いた深度制御実験結果の一例を数値シミュレーション結果と比較して示す。初期深度を 6.07 m に、目標深度を 1.07 m とした。ファジィコントローラに関して、ピッチ角に関

Fig. 12 Altitude control of AE1000 with large horizontal stabilizer

Fig. 13 Depth control of AE1000 with small horizontal stabilizer

する b の値を 5.0 deg., ピッチ角速度については 1.0 deg./s, ピッチ角に関する出力については 0.075 deg. とした。深度については 1.0 m, 高度変化速度については 0.1 m/s, その出力を 0.075 deg. とした。また、 α を 0.2 に、 β および γ を 0.8 および 0.2 に、 θ_1 を 10° に、Band を 3.33 m に定めた。実験結果から、Band の幅をもつ領域の外側での目標ピッチ角は達成されるが、その領域内では目標深度から 0.5 m ほどオーバーシュートが見られる。また数値シミュレーション結果はほぼ潜水機の運動を表していることがわかる。

3.3 海中実験

小型水平安定尾翼を用い、ビーコンアンテナを装着した AE 1000 の基礎的な性能確認を目的とした海中実験を、1993 年 3 月駿河湾三津浜の水深 30 m の海域にて実施した。実験項目は、(i) 水中重量およびバランスの調整、(ii) 搭載機器の動作確認と評価、(iii) 超音波データ伝送装置の評価試験、(iv) 小型 ROV による海底調査、(v) 潜水浮上試験、(vi) 有索および無索での高度制御実験、などであった。

浮上試験は、浮上用バラスト 10 kg $\times$ 2 のうち、1 個を落

下させて行った。Fig. 14 に有索(直径 3 mm 同軸ケーブル)状態での浮上試験データを示す。0.23 m/s から 0.31 m/s の範囲の速度で上昇することがわかる。浮上途中ピッチ角がもう一度 30° まで達しているが、これはその時点で方位角を変更したことによるものである。

無索走行実験では、超音波データ伝送装置を介して、船上装置からは誘導命令信号(伝送速度: 250 bps, データ長: 48 bit (内 16 bit は誤り訂正用))が、また潜水機からは潜水機の各種データが伝送され(伝送速度: 250 bps, データ長: 240 bit (内 80 bit は誤り訂正用)), 船上装置のグラフィック装置に潜水機の各種データ(高度・深度・方位等のセンサー情報, 自動操縦の状態, アラーム情報, 船上装置から送られてきたコマンドのアンサーバックなど)や GPS と SSBL 方式音響測位装置で測定された潜水機位置の緯度・経度や航跡が図示された。Fig. 15 に高度制御実験データの一例と数値シミュレーション結果を示す。このデータは潜水機内の 8 Mbyte の RAM に書き込まれた一部である。ファジィコントローラに関して、ピッチ角に関する b の値を 10.0 deg., ピッチ角速度については 5.0 deg./s, ピッチ角に関する出力については 0.05 deg. とした。高度については 0.5 m, 高度変化速度については 0.05 m/s, その出力を 0.05 deg. とした。また, α を 1.0 に, β および γ

を 0.8 および 0.2 に, θ_1 を 10° に, Band を 2.0 m に定めた。実験から 4.75 m の目標高度から最大 0.5 m のオーバーシュートがみられ, また減衰振動が顕著である。数値シミュレーション結果はほぼ実験状態を再現していることがわかる。ただ, ピッチ角に関してはあまり一致度はよくない。

4. ファジィコントローラの最適化

水槽試験から線形数学モデルがかなり AE 1000 の動的応答特性を表現できることが明らかになったことから, ファジィコントローラをこの数学モデルを用いて最適化が可能となる。ここでは, 深度制御に対して非線形最適化手法の一つである Hooke & Jeeves 直接探索法⁹⁾を用いる。ファジィコントローラの中の $\alpha, \beta, \text{Band}$ そしてピッチ角, ピッチ角速度, それに関する出力, 深度, 深度変化率, それに関する出力についてのメンバーシップ関数を表す b を, 次の評価関数を最小にするように求めた。

$$\left. \begin{aligned} f &= f_1 + f_2 \\ f_1 &= 0.5 \cdot (\theta - \theta_1)^2 \cdot dt : |d - d_1| > \text{Band}/2 \\ f_2 &= 0.5 \cdot (d - d_1)^2 \cdot dt : |d - d_1| < \text{Band}/2 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

ここで, d は深度を, d_1 は目標深度を表す。ただし, 制御条件として, $\gamma = 1 - \beta$ と $\text{Band} \leq 2.0$ を与えた。後者の条件は, 潜水機が海底ケーブルの点検やビデオ撮影のために海底から約 1 m の高度を航行する必要があるからである。深度制御の計算においては, 初期深度を 1 m に, 目標深度を 3 m に設定し, パラメータの初期値に Fig. 13 に示した深度制御のものを用いた。最適化されたパラメータの内, ピッチ角に関する b の値は 3.0 deg. に, ピッチ角速度については 1.2 deg./s となった。また, α は 0.475, Band は 2.13 m となった。その他のパラメータは変化しなかった。Fig. 16

Fig. 14 Dynamic behavior in ascent

Fig. 15 Altitude control at sea trials

Fig. 16 Comparison of depth control performance between pre-optimization and post-optimization

に最適化を行う前と行った後の深度制御の比較を示す。最適化を行った後では、明らかに応答が速くなり、目標深度からのオーバーシュートが見られない。

5. 適応ファジィコントローラ

前述のファジィコントローラの最適化は最適化を行った限定された環境では有効であるが、海底に不規則な凹凸があるような未知環境ではその有効性は必ずしも保証されない。この問題を解決するために、ここではファジィコントローラにニューラルネットワークの中の逆伝播学習法¹⁰⁾によるシステム同定部と出力修正部を付加した。Fig. 17 にその構成を示す。

システム同定部 (Fig. 18) は、9 ユニットの入力層、9 ユニットの中間層、2 ユニットの出力層から構成されている。ここで、入力層のユニット i の出力を li 、中間層のユニット j の出力を、 Hj 、出力層のユニット k の出力を Ok 、入力層のユニット i から中間層のユニット j への結合係数を Wji 、中間層のユニット j から出力層のユニット k への結合係数を Vkj 、中間層のユニット j のオフセットを θ_j 、出力層のユニット k とオフセットを γ_k で表して、次の関係が与えられる。

$$Ok = f(Sk + \gamma_k), Sk = \sum_j VkjHj \quad (10)$$

$$Hj = f(Uj + \theta_j), Uj = \sum_i Wjili \quad (11)$$

また、関数 f としては、次に示すシグモイド関数で与えられるものとする。

$$f(X) = 1/(1 + \exp(-X)) \quad (12)$$

ここでは結合係数とオフセット値を学習させる。

学習は (13) 式に示す出力自乗誤差 Ep を最小化するようにパラメータ (Vkj , Wji , γ_k , θ_j) を変更する。出力自乗誤差

の最も減少する方向である最急降下ベクトルは各パラメータについて (14)~(17) 式となる。

$$Ep = \frac{1}{2} \sum_k (Ok - Ok^*)^2 \quad (13)$$

Ok^* : 番目の出力の教師信号

$$\frac{\partial Ep}{\partial Vkj} = \delta k \cdot Hj, \quad \delta k = -(Ok - Ok^*) \cdot Ok \cdot (1 - Ok) \quad (14)$$

$$\frac{\partial Ep}{\partial Wji} \left\{ \sum_k \delta k \cdot Vkj \right\} \cdot Hj \cdot (1 - Hj) \cdot li \quad (15)$$

$$\frac{\partial Ep}{\partial \gamma_k} = \delta k \quad (16)$$

$$\frac{\partial Ep}{\partial \theta_j} = \left\{ \sum_k \delta k \cdot Vkj \right\} \cdot Hj \cdot (1 - Hj) \quad (17)$$

結合係数とオフセット値の各々の学習定数を η_1, η_2 とすると、 t 回目のチューニングパラメータの値は、(18)~(21) 式のようなになる。

$$Vkj(t) = Vkj(t-1) - \eta_1 \cdot \frac{\partial Ep}{\partial Vkj} \quad (18)$$

$$Wji(t) = Wji(t-1) - \eta_1 \cdot \frac{\partial Ep}{\partial Wji} \quad (19)$$

$$\gamma_k(t) = \gamma_k(t-1) - \eta_2 \cdot \frac{\partial Ep}{\partial \gamma_k} \quad (20)$$

$$\theta_j(t) = \theta_j(t-1) - \eta_2 \cdot \frac{\partial Ep}{\partial \theta_j} \quad (21)$$

計算では、 η_1, η_2 を 1.0 とした。

出力修正部 (Fig. 19) では、次式に示す目標高度に対する $t+1$ 回目の高度の予測値の誤差の二乗を最小化するために、最急降下法のひとつである逆伝播法のデルタルールを用いて、出力修正量 $\delta 1$ を求める。記号 (*) は予測値を表す。

$$E = (h^*(t+1) - h1)^2 / 2, \quad \delta 1 = -\eta_3 \cdot \partial E / \partial \delta e \quad (22)$$

ただし、 $\partial E / \partial \delta e$ をニューラルネットワークから近似的に求める。具体的には、 $\delta e(t) \pm 1^\circ$ の間で E の傾きを求めた。以上により、ファジィコントローラを適応的にチューニングすることができる。

Fig. 20 に波長 120 m, 振幅 2 m の正弦波形に対するファジィコントローラと適応ファジィコントローラによる高度制御の比較を示す。目標高度を 1 m とした。ファジィコントローラの各パラメータは前章において最適化されたものを用いた。高度変化に対する応答や目標高度の維持の点で適応ファジィコントローラの効果が著しいことがわかる。

Fig. 17 Structure of adaptive fuzzy controller for altitude control

Fig. 18 Structure of system identification block

Fig. 19 Structure of modification block

Fig. 20 Comparison of control performance between fuzzy controller and adaptive fuzzy controller

6. 結 論

海底ケーブル探査用自律型無人潜水機の縦方向運動制御について数値シミュレーションや水槽実験や海中実験を通して検討した結果、次の結論を得た。

- 1) ファジィアルゴリズムを用いた二つの誘導部分から

成る高度制御および深度制御法は有効に作動する。

- 2) 潜水機の運動の数学モデルに基づいた非線形最適化手法によるファジィコントローラの最適化は縦方向運動制御の性能を向上する。

- 3) ファジィコントローラにニューラルネットワークを用いたシステム同定部と出力修正部をつけ加えた適応ファジィコントローラは凹凸状の海底のような未知環境での高度制御に有効である。

参 考 文 献

- 1) Asakawa, K., Kojima, J., Ito, Y., Shirasaki, Y. and Kato, N.: Development of Autonomous Underwater Vehicle for Inspection of Underwater Cables, Proc. of UNDERWATER INTERVENTION '93, (1993), pp. 208-216
- 2) Shirasaki, Y., Asakawa, K., Kojima, J., Homma, H. and Tamura, R.: Deep Sea ROV "MARCAS-2500" for Cable Maintenance and Repair Works, Proc. of INTERVENTION'88/ROV'88, (1988), pp. 627-641
- 3) Kato, N. and Kouda, S.: Attitude Control and Navigation of Unmanned, Untethered Submersible, Proc. 8th International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering, Vol. 6, (1989), pp. 89-96
- 4) Kato, N. and Endou, M.: Guidance and Control of Unmanned, Untethered Submersible for Rendezvous and Docking with Underwater Station, OCEANS'89, Vol. 3, (1989), pp. 804-809
- 5) 加藤直三：鉛直および水平両方向に移動可能な水中曳航体に関する研究(その1 基本形状と姿勢制御), 日本造船学会論文集, 第169号, (1991), pp. 111-122
- 6) 加藤直三：鉛直および水平両方向に移動可能な水中曳航体に関する研究(その2 誘導制御), 日本造船学会論文集, 第171号, (1992), pp. 389-398
- 7) 加藤寛一郎, 大屋昭雄, 柿沢研司：航空力学入門, 東大出版会, 1982
- 8) 菅野道夫：ファジィ制御, 日刊工業新聞, 1989
- 9) Parson, M. G.: Optimization Methods for Use in Computer-Aided Ship Design, 1st Ship Technology and Research Symposium, (1975), pp. 13.1-13.27
- 10) Rumelhart, D. E.: Parallel Distributed Processing, The MIT Press, 1986