

## ニューラル・ネットによる潜水艇の運動制御 (その 2)

——自航によるコントローラの自動生成——

Motion Control of Underwater Vehicle Using Neural Network Models (2nd Report)

——Self-Organization of Controller through Free-Swimming——

藤 井 輝 夫\*・浦 環\*

Teruo FUJII and Tamaki URA

### 1. はじめに

前報では、自律型潜水艇の制御のためのニューラル・ネットを構成する具体的な方法として、オフラインで望ましい操縦例を学習する手法について検討した<sup>1)</sup>。本論では、次の段階として、新たに考案したコントローラの自動生成の方法<sup>2)</sup>を潜水艇PTEROA60<sup>3)</sup>の縦運動の制御問題に適用し、航行実験によってその効果を確認する。

### 2. 制御目標

縦運動に関する量としての姿勢角 $\theta$ 、深度 $d$ およびエレベータ角 $\delta_e$ をFig. 1のように定義し、艇を目標深度 $d_0$ で水平航行させることを制御の目標とする。

### 3. 実験における制御システムの構成

本論において用いるニューラル・ネットは、実際に制御を行うコントローラ部分と運動状態を参照するためのフォワードモデル部分からなる。また、ネットワークの外にはフォワードモデルの出力を参照して運動を評価し、コントローラを調整する部分が必要となる。その全体構造をFig. 2に示す。以後コントローラ部分を[cnet]、フォワードモデル部分を[enet]と記す。

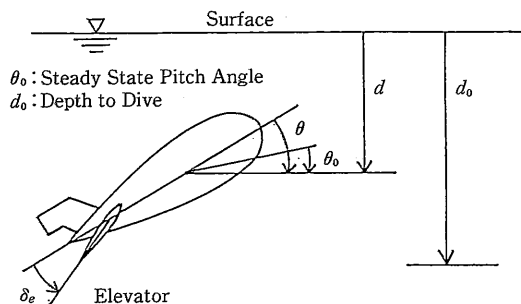


Fig. 1 Untethered Submersible in Free-Swimming

\*東京大学生産技術研究所 第2部

全く事前に情報を与えずに、いきなり[cnet]に制御を行わせることは不可能なため、まずはじめは運動特性に関する詳しい情報なしに構成可能な、簡単なファジー制御による航行データを与える。用いたファジー制御則は、0.1秒ごとの姿勢角および深度の変化量 $\Delta\theta$ 、 $\Delta d$ をもとにエレベータ角の操作量 $\Delta\delta_e$ を計算し1秒ごとに制御動作を行うもので、そのアルゴリズムはFig. 3のように表される。これによる航行実験の結果をFig. 4に示す。このデータを出発点として以下に述べるプロセス (Fig. 5参照)を経ることにより、最終的な制御システムが得られる。

### 4. コントローラ・ネットの予備学習

[cnet]の構造をFig. 6に示す。ファジー制御による20秒間の操縦結果から得られる20組の入出力とその否定(符号をすべて変えたもの)20組を混合した計40組の教示データに関して各500回の学習を行った。得られた[cnet]による航行実験の結果をFig. 7に示す。この段階で[cnet]は、ファジー制御とほぼ同等な操縦が可能となる。

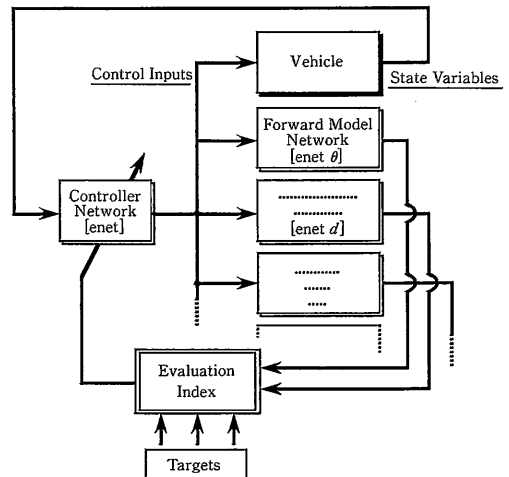


Fig. 2 System for Organization of Controller

研究速報

if	$\Delta d$ (cm) is	$\Delta \theta$ (deg) is	then	$\Delta \delta_e$ (deg) is
Rule 1	UP 	NEUTRAL 	→	DOWN 
Rule 2	DOWN 	NEUTRAL 	→	UP 
Rule 3		UP 	→	DOWN 
Rule 4		DOWN 	→	UP 

Fig. 3 Fuzzy Algorithm

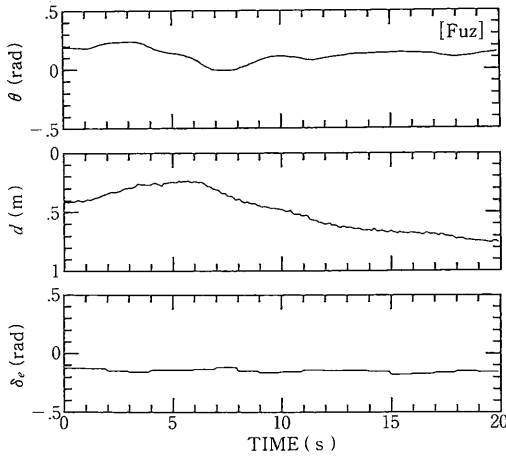


Fig. 4 Experimental Results of Motion Controlled by Premature Fuzzy Controller

5. フォワードモデリング

コントローラの調整を行うためには、ファジー制御による航行データをもとに、ニューラル・ネットによって艇の運動のフォワードモデル [enet] を作る必要がある。本論では、姿勢角 $\theta$ と深度 $d$ を運動評価の対象とするので、これらの量を出力とする[enet]をおのおのについて一つずつ作るものとし、それぞれ [enet $\theta$ ]、[enet $d$ ] と記す。二つのネットを統合することもできるが、システムの見通しを良くするためと、学習の収束を速めるために、2つに分割した。その構造をFig. 8に示す。このような回帰的な結合を有する2つの[enet]にファジー制御による運動例 (Fig. 4) を学習させる。学習は20秒間で1セットのデータに関して、[enet $\theta$ ]は3000回、[enet $d$ ]

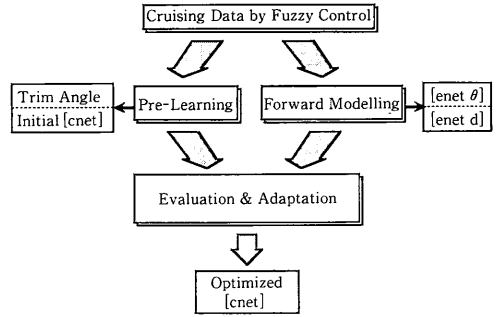


Fig. 5 Organizing Process of the Controller

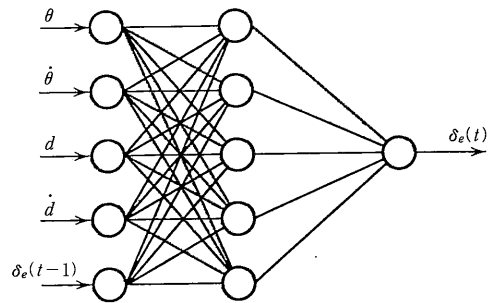


Fig. 6 Controller Network

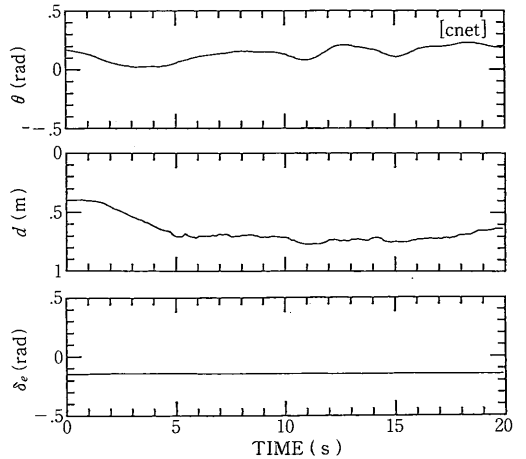


Fig. 7 Experimental Results of Motion Controlled by Initial [cnet]

は1000回行った。得られたネットワークに $\theta$ 、および $d$ を出力させた結果をFig. 9に示す。図中のOriginal Motionに非常によい一致をしている。これより[enet]内には艇の運動を表す非常によい近似モデルが得られたと考えることができる。ここで、回帰的な結合の荷重はすべて等しく $\mu_i=0.9$ とした。

6. コントローラの調整

予備学習により得られた [cnet] を修正して、設定した目標値に艇の運動を到達させるような特性を持たせるため、次の2つの2乗積分形式を導入する。

$$E_{\theta} = \frac{1}{2} \int^t (\theta - \theta_0)^2 dt \quad (1)$$

$$E_d = \frac{1}{2} \int^t (d - d_0)^2 dt$$

ここに、 $\theta_0$  は艇の水平定常航行角で、 $d_0$  は定深度航行の目標値である。評価関数  $E$  を

$$E = E_{\theta} + E_d \quad (2)$$

と定義し、これが減少するように [cnet] の結合荷重を

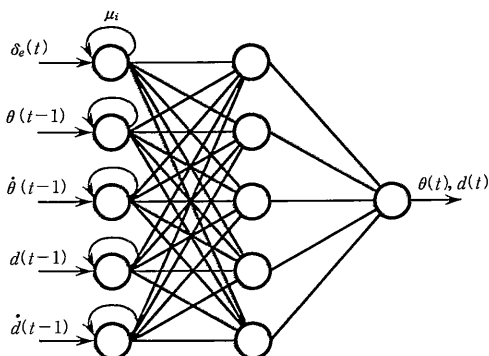


Fig. 8 Forward Model Networks for  $\theta(t)$  and  $d(t)$

$$\Delta W_{ij} = -\epsilon \frac{\partial E}{\partial W_{ij}} \quad (3)$$

に従って変化させる。ここで、 $\epsilon$  は比例係数である。

前節において求めた [enet] と [cnet] を組み合わせ、Fig. 10のようにこれらのネットワークを結合すると、評価関数  $E$  は、ネットワーク全体に関する出力誤差関数を時間積分したものと等価となり、バックプロパゲーション<sup>3)</sup>と全く同様の方法により、(3)式と等価な形で [cnet] の結合荷重を調整することができる<sup>2)</sup>。

$\theta_0 = 0.1 \text{ rad}$ ,  $d_0 = 0.5 \text{ m}$  として4回の調整を行った。各調整後の [cnet] による制御結果を Fig. 11 に示す。姿勢角  $\theta$ 、深度  $d$  とともに目標の値に達し、安定した水平航行状態となっていることがわかる。ここで  $\epsilon = 0.2$  とした。また、結合荷重の調整の過程における評価関数の値の変化を Fig. 12 に示す。

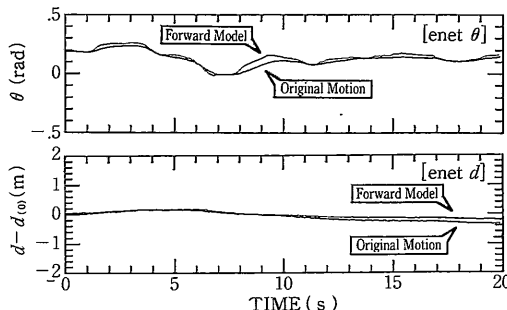


Fig. 9 Output of Forward Model Network

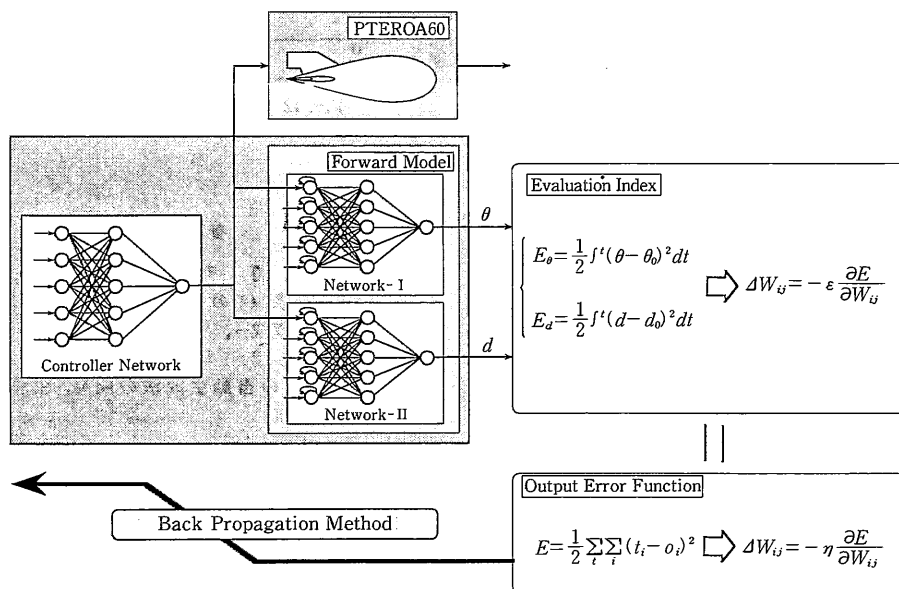


Fig. 10 Adaptation System of Controller Network

研究速報

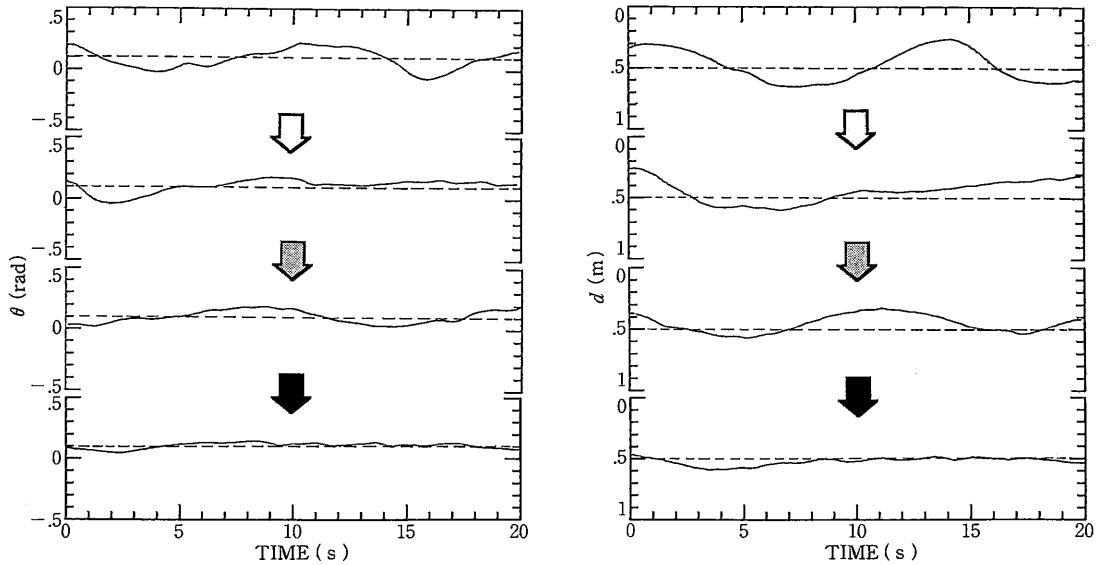


Fig. 11 Progress of Adaptation of Controller Network

以上の実験結果から、本方法を用いることにより、事前に運動特性に関する情報が得られていない条件下においても、艇を目標深度で水平航行させることが可能なコントローラが得られることが確認された。

7. おわりに

本論では、潜水艇の運動特性に関する情報が全くない状態から、簡単なファジー制御を出発点として、段階的に、ある深度の目標値に艇を操縦できるようなコントローラを得る方法を実際の潜水艇に適用し、実験においてその有効性を確認した。本方法では運動に関して非常に簡単な評価しか行っていない。今後改良すべき点としては、コントローラをさらに最適化しうるような他の運動評価の条件を加えることが考えられる。たとえば運動の評価関数に次のような値、

$$E_{\dot{\theta}} = \frac{1}{2} \int \dot{\theta}^2 dt \quad (4)$$

を加えることにより運動の滑らかさを考慮することもできる。

本研究により、複雑な制御面群を持つ艇体や、流れ場のある複雑な環境に対応できるコントローラを自動的に生成することが可能になった。

(1990年5月18日受理)

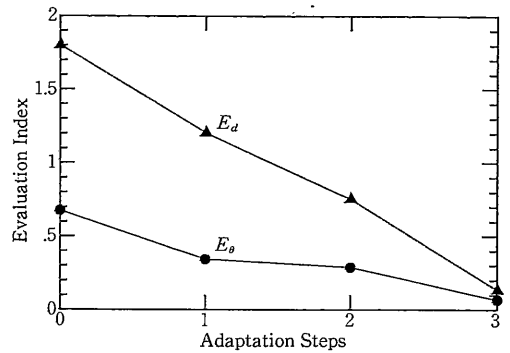


Fig. 12 Decrease of Evaluation Indexes

参考文献

- 1) 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 (その1) - オフライン学習によるネットワークの構成 -, 生産研究, Vol. 41-12 (1989)
- 2) 藤井輝夫, 浦 環: ニューラル・ネットを用いたコントローラの自動生成法の開発, 生産研究, Vol. 42-8 (1990)
- 3) 浦 環, 藤井輝夫: 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 -, 生産研究, Vol. 41-9 (1989)