

未知潮流環境中における海洋構造物の軌道制御

正員 鈴木 英 之* 正員 吉 田 宏一郎*
 学生員 戚 涛**

Tracking Controller of Offshore Structure under Unknown Disturbances

by Hideyuki Suzuki, *Member* Koichiro Yoshida, *Member*
 Qi Tao, *Student Member*

Summary

When a offshore structure is constructed from several part-structures, the construction operations, such as mating, positioning and transportation of those structures to the objective point, must be carried out under various disturbances. This paper presents learning trajectory tracking control when the structures are repeatedly transported along the objective trajectory under unknown steady state disturbance.

Corresponding to premise mentioned above, a learning controller which consists of both feedback controller and feedforward controller is proposed. The controller improves its feedforward control force every time it tracks the same objective trajectory by learning unknown disturbances from the difference between the objective trajectory and previously realized trajectory.

In this study, simulation and basin test, using a model of a semi-submersible are conducted. The learning controller showed good performance in both results of simulation and basin test in the field of unknown disturbances.

1. は じ め に

海洋構造物の大型化及び大水深化により、海上及び海中における構造部材、機器などの運搬作業を遠隔操作で行うニーズが増えてくることが予想される。また、これらの作業を様々な外乱のある海上あるいは海中で効率よく遂行するには、人間の直接操作に頼らずに構造物自身が、スラスタなどアクチュエーターを用いて外乱に対応しながら、自動的に運動を行うシステムが有効であると期待される¹⁾²⁾。例えば、超大型の海洋構造物を海上に組立てる際に、個々のユニット及び部材を設置場所まで運搬する作業では自動化による効率の向上は著しいものと思われる。また、水中作業ロボットによる水中検査、修理、採取及び調査・

計測のために海底基地周辺で行われる巡回作業などのように、与えられた軌道に沿って何回も行われる作業においても自動化の必要性は高いと考えられる。

以上のような自動化は軌道追従制御によって実現されるが、実際の海中や海上での作業においては、潮流など軌道上の外乱に関する情報を広範囲で精度よく計測するのが困難であるため、外乱を未知として軌道制御を行う手法の開発が必要である。

本研究では、このような未知外乱環境中に与えられた同一目標軌道を何回も繰り返して通過する軌道制御問題に対して、Fig. 1 に示すようなフィードバックとフィードフォワードを合わせた制御系を考案した。この手法では、まず最適フィードバック制御系を構成して、軌道追従制御を行う³⁾。得られた「目標軌道に近い実際の軌道」と目標軌道との誤差より、広義ニュートン法⁴⁾によって、フィードバック制御力を零に近づけるよう軌道追従のフィードフォワード制御力の修正と外乱の学習を行い、フィードフォワード制御力を修正し、次の制御を行うものである。このような繰り返しの結果、制御がフィードバック制御からフィー

* 東京大学工学部船舶海洋工学科

** 東京大学大学院船舶海洋工学科

原稿受理 平成 7 年 7 月 10 日

秋季講演会において講演 平成 7 年 11 月 16, 17 日

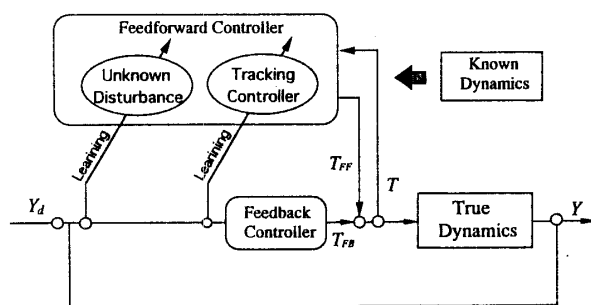


Fig. 1 Algorithm of Control System

ドフォワード制御へ移行するように、制御力を改善していく。

本研究では、このような制御手法の定式化を行うとともに性能を考察するために、半潜式コラムフーティング式浮体を考察対象とし、浮体の未知外乱環境中における軌道制御のシミュレーションを行うと共に水槽実験により実環境中における手法の検証を行った。

2. 運動方程式の定式化

Fig. 2 に考察対象となる半潜式コラムフーティング式の浮体の形状を示す。スラスタと位置計測用超音波送信機をそれぞれ3基ずつ浮体に配置してある。

浮体の運動方程式の定式化に当たっては、Fig. 3 に示すように、空間固定座標系を $O-XYZ$ 、構造物の重心に固定された物体固定座標系を $o-xyz$ とする。軌道制御という性格を考慮した上で、運動方程式を空間固定座標系で定式化する³⁾。目標軌道は空間座標系で計画しておき、求めた軌道に構造物を追従させる制御力を空間固定座標系から物体固定座標系に変換してアクチュエータに出力する。

本研究では、構造物の水平面に於ける運動を対象として6自由度の剛体運動方程式⁴⁾から、surge, sway, yaw の水平面内の運動を取り出して考察を行った。但し後に示すよ

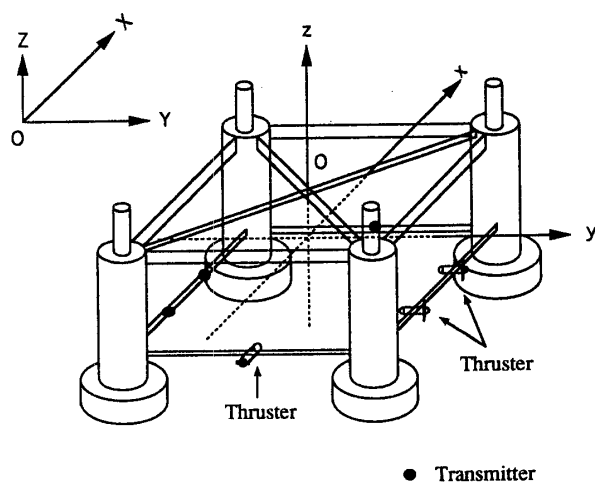


Fig. 2 Coordinate System, Transmitter and Thruster Arrangement

うに、本制御手法は6自由度の運動への適用に当たって理論上の制約はない。

構造物の位置 (X, Y) と姿勢 ψ を用いて空間座標系で記述する運動方程式は、次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} (M+m)\ddot{X} - \frac{1}{2}\rho C_d A \sum_{i=1}^4 |W_i| (V \cos \alpha - \dot{X} + R_i \dot{\psi} \sin \mu_i) &= T_x \\ (M+m)\ddot{Y} - \frac{1}{2}\rho C_d A \sum_{i=1}^4 |W_i| (V \sin \alpha - \dot{Y} - R_i \dot{\psi} \cos \mu_i) &= T_y \\ (I+I')\ddot{\psi} - \frac{1}{2}\rho C_d A \sum_{i=1}^4 |W_i| [R_i \cos \mu_i (V \sin \alpha - \dot{Y} - R_i \dot{\psi} \cos \mu_i) - R_i \sin \mu_i (V \cos \alpha - \dot{X} + R_i \dot{\psi} \sin \mu_i)] &= N_z \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ただし、 R_i は構造物の重心 o から i 番目のコラムの中心位置までの距離である。 M は構造物の質量、 m は付加質量、 I, I' はそれぞれ鉛直軸まわりの構造物の慣性モーメント及び付加慣性モーメントである。角度 μ_i, β_i, ψ と α は Fig. 3 に示すように定義する。 V は浮体位置における潮流の速度、コラムに作用する流体力は Morison 式により評価した。 ρ, C_d と A はそれぞれ流体密度、粘性抵抗係数とコラムの水線下の側投影面積であり、 $|W_i|$ は i 番目のコラムの中心位置における相対速度の大きさであり、次式で求められる。

$$|W_i| = \sqrt{(V \cos \alpha - \dot{X} + R_i \dot{\psi} \sin \mu_i)^2 + (V \sin \alpha - \dot{Y} - R_i \dot{\psi} \cos \mu_i)^2} \quad (2)$$

制御力は Fig. 3 に示すように構造物に配置された3つのスラスタにより出力する。3つのスラスタの出力をそれぞれ F_1, F_2, F_3 とする。空間固定座標系における構造物に働く制御力の X, Y 軸方向成分を T_x, T_y, Z 軸まわりの制御力のモーメント N_z とすれば、それらの関係は次式のようにになる。

$$\begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ N_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \psi & -\sin \psi & -\sin \psi \\ \sin \psi & \cos \psi & \cos \psi \\ 0 & -x_{s2} & x_{s3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \end{bmatrix} \quad (3)$$

ここに、 x_{s2} と x_{s3} は物体固定座標系におけるスラスタ

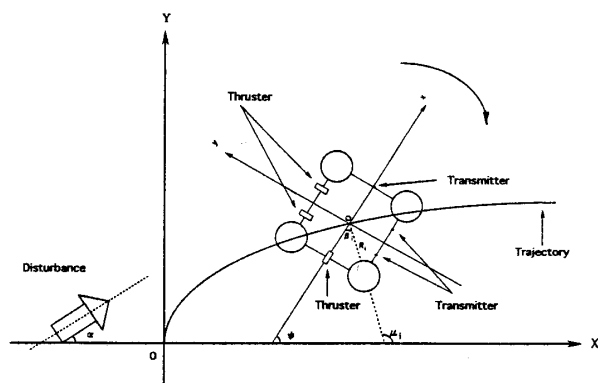


Fig. 3 Coordinate System in Horizontal Plane

の x 軸の座標である。

次に得られた運動方程式を行列で記述する。下付き t は真の値を表すものとする。 M_t を質量行列, $X=(X, Y, \phi)^T$ を変位ベクトル, $R_t(X, \dot{X}, V, t)^T$ を粘性抵抗ベクトル, $T=(T_x, T_y, N_z)^T$ を空間座標系における制御力ベクトルとすると, (1)式で表す運動方程式は

$$M_t \ddot{X} - R_t(X, \dot{X}, V, t) = T \quad (4)$$

のように書き換えられる。さらに関数 $f_t(X, \dot{X}, \ddot{X}, V, t)$ を次のように

$$f_t(X, \dot{X}, \ddot{X}, V, t) = M_t \ddot{X} - R_t(X, \dot{X}, V, t) \quad (5)$$

定義すると(4)式はまた(6)式のように書き換えられる。

$$f_t(X, \dot{X}, \ddot{X}, V, t) = T \quad (6)$$

(4)式あるいは(6)式が浮体の運動を厳密に記述する真の運動方程式とし, さらに外乱を未知とする浮体の運動に関する知り得る運動方程式は, 次のように定義することができる。

$$M \ddot{X} - R(X, \dot{X}, 0, t) = T \quad (7)$$

あるいは

$$f(X, \dot{X}, \ddot{X}, 0, t) = T \quad (8)$$

即ち, 外乱はゼロでないが未知であるために, まず, 1次近似としてゼロとしたものを知り得る運動方程式とする。その後制御系の繰り返し学習により未知外乱に対応する制御力を求めてゆく。

また, 繰り返し制御の回数を上付き n で示すと, $n+1$ 回目の運動方程式は次式で表すことができる。

$$M \ddot{X}^{n+1} - R(X^{n+1}, \dot{X}^{n+1}, 0, t) = T^{n+1} \quad (9)$$

あるいは

$$f(X^{n+1}, \dot{X}^{n+1}, \ddot{X}^{n+1}, 0, t) = T^{n+1} \quad (10)$$

2. 学習制御の方法

前述のように, 本研究に用いる制御系はフィードバックとフィードフォワードを合わせた学習制御系である。即ち, $n+1$ 回目の全制御力 T^{n+1} は,

$$T^{n+1} = T_{FB}^{n+1} + T_{FF}^{n+1} \quad (11)$$

で表すことができる。

ここに T_{FB}^{n+1} と T_{FF}^{n+1} はそれぞれ $n+1$ 回目のフィードバック制御力の成分とフィードフォワード成分である。フィードバック制御力 T_{FB}^{n+1} は, 最適制御則によって求め, フィードフォワード制御力 T_{FF}^{n+1} は広義ニュートン法によって求める。次にこれらの成分について具体的に説明する。

2.1 フィードバック制御力

フィードバック成分 T_{FB}^{n+1} は(12)式に示すように, 最適制御則によるものである。ゲイン K_x と $K_{\dot{x}}$ をそれぞれ位置, 速度に関するゲインとし, これらは状態量と制御力に対する重み行列 Q と R を適切に選択することによって求めるものとする。 X_d と X をそれぞれ目標軌道及び実際に通過した軌道とする。その結果フィードバック制御力は次式のように得られる。

$$T_{FB}^{n+1} = K_x(X_d - X^{n+1}) + K_{\dot{x}}(\dot{X}_d - \dot{X}^{n+1}) \quad (12)$$

2.2 広義ニュートン法によるフィードフォワード制御力

広義ニュートン法は次のように説明することができる。まず, 関数 $y=f(x)$ に対して, $y_d=f(x_d)$ となる y_d を求めたい時に, 次式によって, y_d の逐次近似 y_n を求めるのがニュートン法である。

$$y_{n+1} = y_n - f'(x)|_{x=x_n}(x_n - x_d) \quad (13)$$

しかし, $f'(x)$ は, $y=f(x)$ が既知でないといえられぬ。このような場合, $g'(x)$ が $f'(x)$ の近似となり, 繰り返し計算を縮小写像とする別の関数 $y=g(x)$ で f を置き換えてもよい。

$$y_{n+1} = y_n - g'(x)|_{x=x_n}(x_n - x_d) \quad (14)$$

上式を用いて, 繰り返し計算を行う逐次近似の方法が広義ニュートン法である。

ここで, 本繰り返し制御問題に対して広義ニュートン法を適用するには, まず一次関数式である(14)式をベクトルで書き換え, さらにその中の x_n を n 回目の実際の軌道ベクトル, x_d を目標軌道ベクトル, 関数 g を(10)式で表される知り得る運動方程式, 関数 f を(4)式あるいは(6)で表される真の運動方程式, y_{n+1} と y_n がそれぞれ $n+1$ 回目のフィードフォワード制御力 T_{FF}^{n+1} 及び n 回目制御力ベクトル T^n とする。微分値を目標軌道上 $X=X_d$ の値で置き替えると, 広義ニュートン法による $n+1$ 回目のフィードフォワード制御力は(10)と(14)式から,

$$\begin{aligned} T_{FF}^{n+1} = T^n &+ \frac{\partial f}{\partial \ddot{X}}|_{X=X_d}(\ddot{X}_d - \ddot{X}^n) \\ &+ \frac{\partial f}{\partial \dot{X}}|_{X=X_d}(\dot{X}_d - \dot{X}^n) \\ &+ \frac{\partial f}{\partial X}|_{X=X_d}(X_d - X^n) \end{aligned} \quad (15)$$

となる。即ち, n 回目の全制御力 T^n を $n+1$ 回目のフィードフォワード制御力の主たる部分とし, n 回目の軌道が目標軌道からずれていることを補正する項をさらに付加して全体のフィードフォワード制御力とする。

ここで, フィードフォワード制御力の修正量 ΔT_{FF}^{n+1} が次式で定義される。

$$\begin{aligned} \Delta T_{FF}^{n+1} = &\frac{\partial f}{\partial \ddot{X}}|_{X=X_d}(\ddot{X}_d - \ddot{X}^n) + \frac{\partial f}{\partial \dot{X}}|_{X=X_d}(\dot{X}_d - \dot{X}^n) \\ &+ \frac{\partial f}{\partial X}|_{X=X_d}(X_d - X^n) \end{aligned} \quad (16)$$

従って, 前回制御を行ったとき制御対象に入力した制御力と目標軌道からのずれを学習して, 今回のフィードフォワード制御力を作り出してフィードフォワード制御力に加えることが分かった。これらの制御力の成分の間の関係は Fig. 4 にまとめてある。

実際に制御を実施する場合は, 初回 $n=1$ の時にはフィードバック成分, 及びその修正量は $\Delta T_{FF}^1 = T_{FF}^1 = 0$ とする。すなわち, 1 回目にはフィードバックのみの制御を行う。

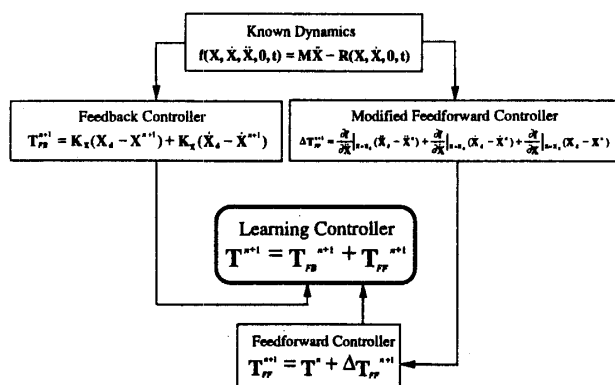


Fig. 4 Components of Learning Controller

真の運動方程式(4)式に, (11)式, (12)式, (15)式と(16)式を代入することより全体の支配方程式が得られる。

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{FF}^{n+1} = & \mathbf{T}^n + \frac{\partial f}{\partial \ddot{\mathbf{X}}} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_d} (\ddot{\mathbf{X}}_d - \ddot{\mathbf{X}}^n) \\ & + \frac{\partial f}{\partial \dot{\mathbf{X}}} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_d} (\dot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{X}}^n) + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_d} (\mathbf{X}_d - \mathbf{X}^n) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{T}_{FF}^{n+1} = & \frac{\partial f}{\partial \ddot{\mathbf{X}}} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_d} (\ddot{\mathbf{X}}_d - \ddot{\mathbf{X}}^n) + \frac{\partial f}{\partial \dot{\mathbf{X}}} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_d} (\dot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{X}}^n) \\ & + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_d} (\mathbf{X}_d - \mathbf{X}^n) \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{M}_t \ddot{\mathbf{X}}^{n+1} - \mathbf{R}_t(\mathbf{X}^{n+1}, \dot{\mathbf{X}}^{n+1}, \mathbf{V}, t) \\ = & \mathbf{K}_x(\mathbf{X}_d - \mathbf{X}^{n+1}) + \mathbf{K}_v(\dot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{X}}^{n+1}) + \mathbf{T}^n \\ & + \frac{\partial f}{\partial \ddot{\mathbf{X}}} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_d} (\ddot{\mathbf{X}}_d - \ddot{\mathbf{X}}^n) + \frac{\partial f}{\partial \dot{\mathbf{X}}} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_d} (\dot{\mathbf{X}}_d - \dot{\mathbf{X}}^n) \\ & + \frac{\partial f}{\partial \mathbf{X}} \Big|_{\mathbf{X}=\mathbf{X}_d} (\mathbf{X}_d - \mathbf{X}^n) \end{aligned} \quad (17)$$

この運動方程式を時間領域で解くことにより, 繰り返し学習制御の応答が計算される。

広義ニュートン法は初期値の適切さにより, 収束性が影響されるため, 本研究には, フィードバックのゲインは知り得る動特性に基づいて, 安定性の保証もある最適制御によるものを用いた。

4. 軌道計画

軌道は作業の目的を想定し, 作業の目的を果たせるよう通過点の座標(X, Y), 姿勢 ϕ と通過時刻を定めるものとした。スラスターの最大出力によって決まる最大速度と最大加速度を越えないように通過点の座標と通過時刻を決定する必要がある。

目標軌道を記述するために, 次のような時間 t の n 次多項式 $P_i(t)$ を用いることとした⁷⁾。

$$P_i = c_{0i} + c_{1i}t + c_{2i}t^2 + \dots + c_{ni}t^n \quad (18)$$

$P_i(i=1, 2, 3)$ はそれぞれ構造物の位置座標(X, Y), 姿勢 ϕ の時刻歴に対応する。ただし, n, t はそれぞれ通過点の箇数と通過時間である。浮体の運動は加速—等速—減速という単純な運動を仮定し, 通過点の通過時刻は加速—等

速—減速の手順から速度と加速度をスラスターの最大出力による最大速度と加速度を越えず, かつ運動の時刻歴が滑らかになるように多項式の係数を逆算した。

5. シミュレーション及び実験

5.1 シミュレーション

5.1.1 実験模型

Fig. 5に実験構造物の寸法を示す。質量 $M=13.7$ kg, 慣性モーメント $I=2.42$ kgm², 喫水面以下の1つのコラムの投影面積 $A=0.0194$ m²である。

スラスターの位置は $F1(-0.29$ m, 0 m, 0.18 m), $F2(-0.1$ m, 0.29 m, 0.18 m), $F3(0.1$ m, 0.29 m, 0.18 m)である。スラスター最大有効出力を 0.4 kgf とすると, 最大速度と加速度がそれぞれ 0.08 m/s と 0.05 m/s²となる。

5.1.2 軌道計画

本研究には, 作業の内容に対応して, 3種類の基本的な軌道を用いた。

- 直線軌道
- 円軌道

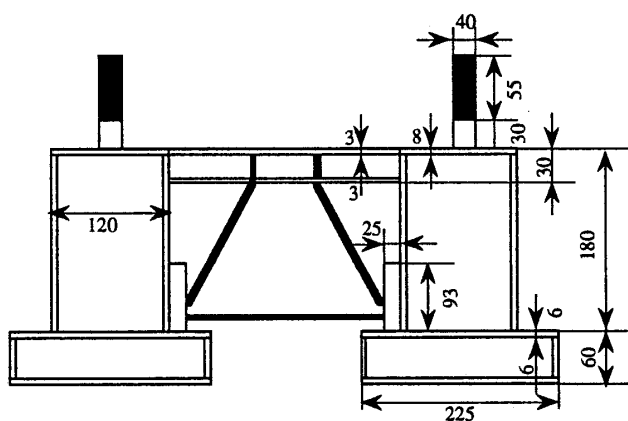
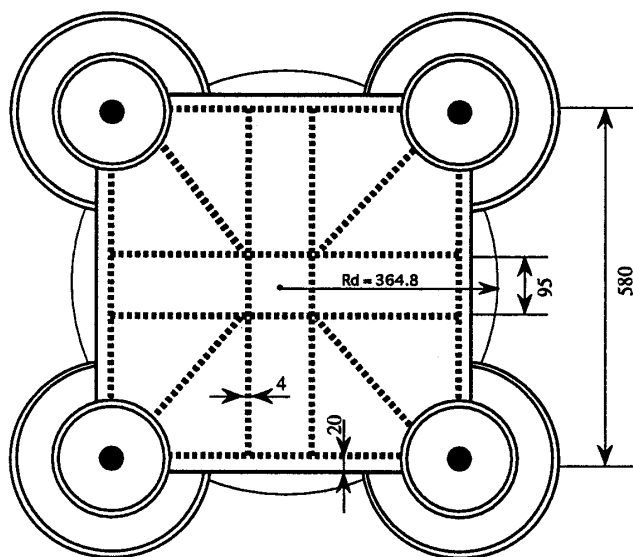


Fig. 5 Model for Simulation and Experiment

c. 正弦軌道

直線軌道は、新たな位置まで移動する時に、移動距離を最短とする最も基本的な軌道である。

円軌道は、海洋構造物を洋上に組立時、個々のユニットを設置場所まで運搬し、さらに方向を変えるために円あるいは円の一部を運搬軌道とすることが考えられる。

正弦軌道は、障害物が存在した場合を想定して、障害物を回避するための軌道の1つの曲線軌道の例として、作成した。

5.1.3 外乱設定

シミュレーションを行うために一様流と分布流という2種類の外乱を設定した。

一様流は流速を V 、 X 軸との角を α として、一様流の X 方向成分を $V \cos \alpha$ 、 Y 方向成分を $V \sin \alpha$ に設定した。

分布流は流れが水平面の位置に依存することを仮定し、 X, Y を座標、 V を流速の最大値とし、潮流の X, Y 方向成分をそれぞれ $V \sin(\pi X/0.9)$ と $V \cos(\pi Y/0.9)$ になるようにして作成した。

5.1.4 シミュレーションの手法

定式化された(17)式を時間領域で解くために、Newmark β 法を用い、本研究では $\beta=1/3$ とした。速度の2乗に比例する非線形流体力が存在するために時間積分の計算は繰り返し計算となった。

5.2 実験

実験は東京大学工学部船舶海洋工学科構造強度実験室の小型水槽で行った。水槽は長さ5.9 m、幅3.3 m、深さ1 mで、中央部に深さ1.2 m、幅2.2 mの溝がある。Fig. 6に示すように、実験装置をセットした。

Fig. 7に示すように、超音波位置計測装置を用いて、位置計測を行い、さらに巡回型デジタルフィルターを用いて状態量の時間微分を求めた。制御アルゴリズムによる制御力はスラスターで実現した。スラスターは回転数制御のプロペラ型である。外乱として小型の船外機を用いて潮流を発生させた。整流格子により潮流の調節を行った。

6. 結果及び考察

6.1 シミュレーションの内容とその結果

制御系の性能を確かめるために、Table 1に示した内容のシミュレーションを行った。ここに、符号 S, L, C はそれぞれ目標軌道が正弦軌道、直線軌道、円軌道であることを意味する。外乱の設定は5.1.3節に従うものとする。動特性パラメータの値は全て真値との比である。

まず、シミュレーションの結果について説明する。3種類の軌道为目标として5.1.3節で設定した2種類の外乱中においてそれぞれ軌道制御を行った。一様流中で目標軌道を円軌道とする場合の軌道制御の過程をFig. 8に示

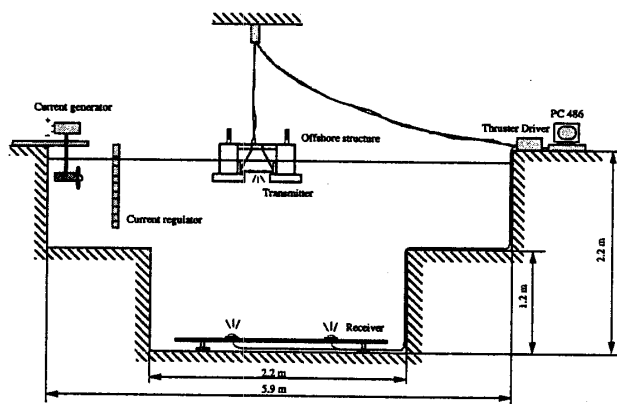


Fig. 6 Experimental Set up

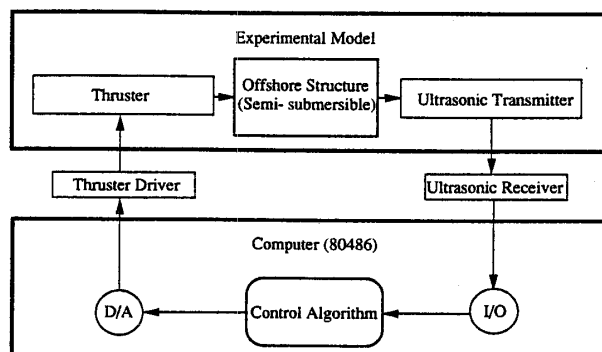


Fig. 7 Block Diagram of Experiment System

Table 1 Condition of Simulation

Case	Current			Dynamics Parameters	
	Constant Current		Distributed Current (m/s)	Mass Measured / True	C.of Viscous Used / True
	Speed (m/s)	Direction			
L-2	0.04	90	-	1.0	1.0
C-2	0.06	30	-	1.0	1.0
S-2	0.1	45	-	1.0	1.0
L-3	-	-	0.04	1.0	1.0
C-3	-	-	0.06	1.0	1.0
S-3	-	-	0.1	1.0	1.0
C-4	-	-	0.06	0.8	1.0
C-5	-	-	0.06	1.0	1.2
C-6	-	-	0.06	0.8	1.2
C-7	-	-	0.03	1.0	1.0
C-8	-	-	0.03 - 0.06	1.0	1.0
C-9	-	-	0.03	0.8	1.2

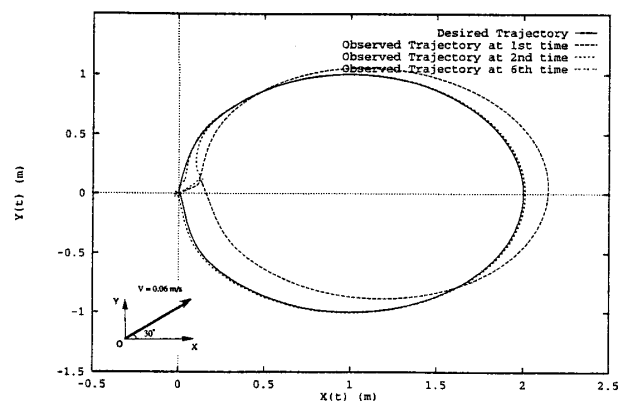


Fig. 8 Performance of Learning Controller in the case of C-2

す。繰り返し制御が4回程度で、目標軌道に収束することが分かった。

Fig. 9には、ケースC-8即ち軌道追従制御4回目から分布流の最大値を0.03 m/sから0.06 m/sに変化させて得られた結果を示す。外乱の変化に対して再び目標軌道に収束することから、本制御手法が長周期の外乱変動に対して、有効であることが示された。

制御過程におけるフィードバック制御力成分の時刻歴をFig. 10に示す。フィードバック制御力を零に近づけるよう軌道追従のフィードフォワード制御力と外乱の学習を行い、制御が最初のフィードバックのみであった状態から、フィードフォワード制御へ移行させるアルゴリズムの機能が確認できる。

本制御手法においては、一旦目標軌道に収束すると、アルゴリズムによって、未知潮流を逆算することができる。運動方程式のパラメータが全て真値と異なるとしたケースC-9の場合に、制御のアルゴリズムによって未知潮流を逆算した。検出した潮流を設定値とともにFig. 11に示す。設定値とほぼ一致する結果が得られており、制御系の学習機能が有効に機能していることが確認された。

また、ケースC-4、C-5、C-6とC-3との比較により、制御対象となる構造物の動特性に関するパラメータの不確実性に対して、目標軌道への収束性能が少々落ちたが、最終

的には5回程度で目標に収束することが判った。パラメータの不確実性に対して、これで、制御系がロバスト性を持つことが明らかになった。

6.2 実験結果及び考察

水槽実験では、半径0.4 mの円軌道を追従する実験を行った。2回目の制御軌道は1回目より目標に接近していることがほとんどの実験結果で見られる。Fig. 12に一つの実験結果が示されている。シミュレーションで示された高い制御効果がかかなり実現されており、本研究に用いられた制

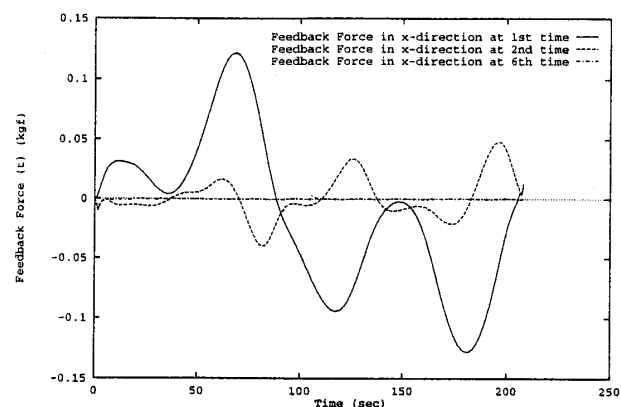


Fig. 10 Variation of Feedback Force during Learning Course (case C-7)

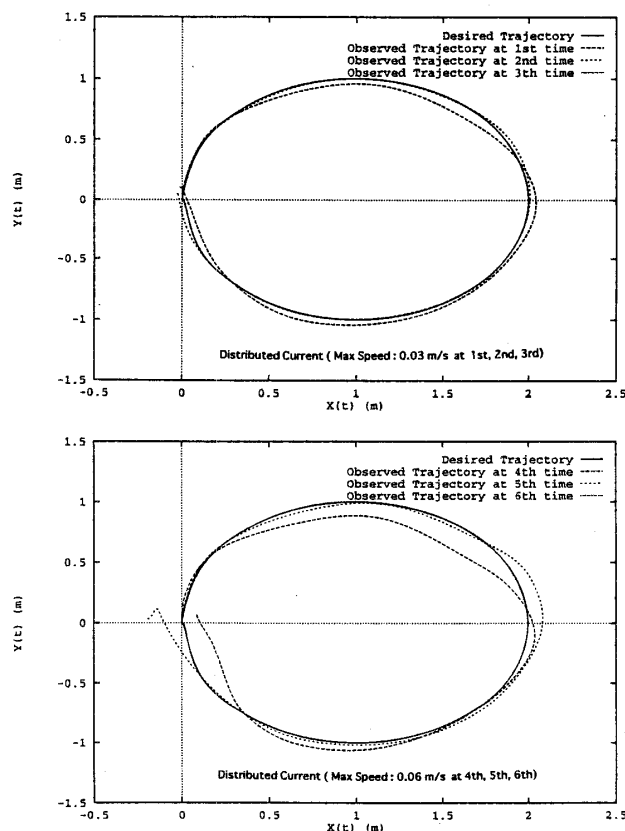


Fig. 9 Performance of Learning Controller in the case of C-8

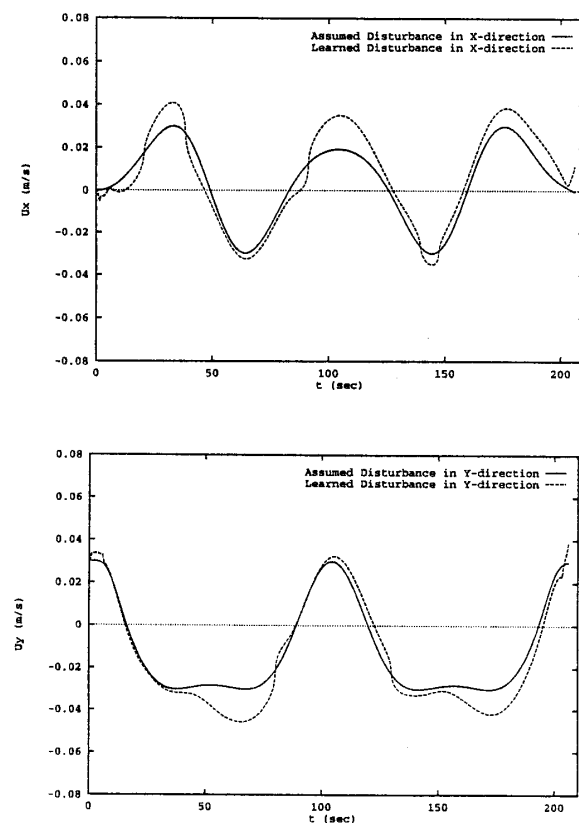


Fig. 11 Current Learned by Learning Controller (case C-9)

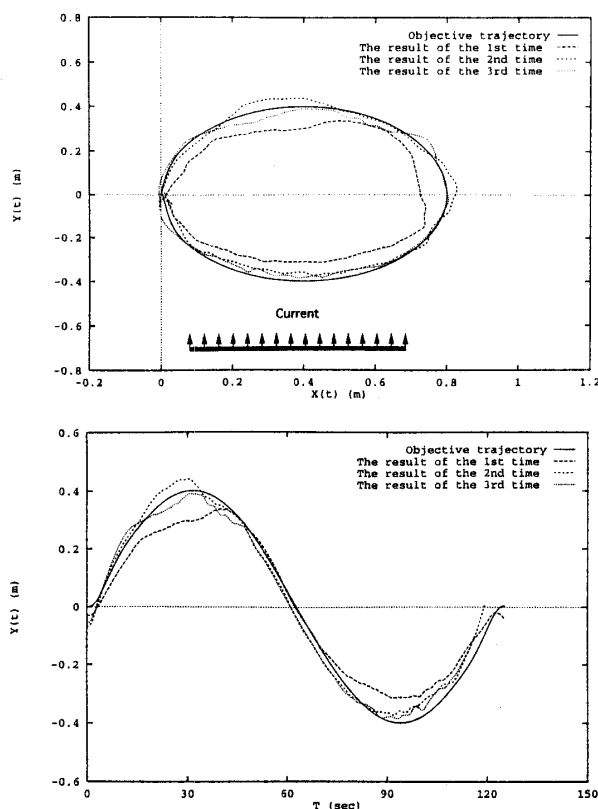


Fig. 12 Experiment Result

御系の学習機能が検証されている。

水槽実験においては、超音波位置計測センサーとスラスター用のケーブルが構造物の運動に干渉し実験結果に影響するが、アルゴリズム上は外乱として対応することができる。さらに、本研究の制御アルゴリズムにおいては、状態量の時間微分量、速度と加速度が必要とされるために、正確な速度と加速度を求めることが実験の成功に大きく関係する。今回実験に用いた巡回型デジタルフィルターによる微分操作時にノイズ除去のために適切なローパスフィルターを用いることが実験を成功させる上で重要なことが判った。

7. 結 論

本研究においては、以下の結論が得られた。

(1) シミュレーションと実験の結果により、制御系が未知外乱中における軌道制御に対して十分な学習性能を示し、更に、変動周期の長い外乱に対して有効であることが明らかになった。

(2) シミュレーションの場合には、4回程度の学習により、目標軌道に収束し良好な収束性が示された。

(3) 制御対象の動特性に関するパラメータの不確実性に対して本制御手法のロバスト性がシミュレーションにより確認された。

8. 謝 辞

本研究で実施した実験に関しては、大学院博士課程の渡辺啓介氏に実験装置の改良など技術面で多大なサポートをいただいた。また研究室の岡 徳昭助手、榎本一夫技官に実験に協力をいただきここに感謝します。

参 考 文 献

- 1) 渡辺：柔軟な海中構造物の応答制御を用いた設置に関する基礎的研究 1993年 東京大学工学部船舶海洋工学科修士論文
- 2) 南：浮体線状構造物連成系の能動制御 1994年 東京大学工学部船舶海洋工学科博士論文
- 3) 浜本, 金：[波浪中の操縦運動を記述する新しい座標系とその運動方程式] 日本造船学会論文集, 第173号 (1993) pp. 209-220
- 4) 松井, 杉浦：[n フーティング型海上作業台の位置制御に関する考察] 関西造船協会誌, 第152号 (1973) pp. 93-100
- 5) 小川原, 吉永, 種子島, 新宅：[学習型フィードフォワードコントローラによる船舶の操縦運動制御システムの研究] 西部造船会会報, 第83号 (1991) pp. 151-159
- 6) 菅田：[逆ダイナミクスモデルに基づいた腕の繰り返し学習制御] 1991年 東京大学大学院工学研究科計数工学科修士論文
- 7) John J. Craig (三浦宏文, 山下勲 訳)：[ロボティクス] 第7章軌道生成 共立出版株式会社