

# 浮遊型水中用マニピュレータの運動制御法に 関する研究（第1報）

— 運動方程式の構築 —

田 口 幹・川 島 豪

Motion Control of Manipulator for Floating Underwater Robot (1st Report)  
— Equations of Motion —

Kan TAGUCHI and Takeshi KAWASHIMA

## Abstract

In this paper, the authors describe the control problems for the manipulator of floating underwater robot. Moving manipulator in water, the fluid force should cause to change the position and posture of the floating underwater robot itself. The authors are searching the fundamental control rule that can avoid the influence of fluid force.

In this report, the equations of motion for the manipulator of floating underwater robot are described. And using these equations of motion some simulations for the motion of manipulator of floating underwater robot are taken place on a personal computer.

## 1. は じ め に

近年、ロボットは工場から出て、宇宙空間や海中のような人間にとって行動が困難な特殊環境に進出をしつつある。このような環境でのロボットの制御には単なる環境の物理的な差異のみならず、環境に固有の問題が存在する。

本報告では、水中という特殊な環境で浮遊しつつ作業を行う比較的小型のロボットマニピュレータの制御問題に注目し、マニピュレータが水中を動くことにより流体から受ける力学的影響および、アクチュエータ駆動に伴う反力を、あらかじめ制御系の内部で補正し、マニピュレータの運動がロボットの絶対的な位置や姿勢に影響を与えず、目標物体を捕捉できるような制御法を確立することを目的とする。本報告においては静水中の問題に限りその基本的な問題点を明らかにするとともに、運動方程式の確立およびシミュレーションによる基本的な問題点の解明を行う。

本報告は近い将来に必要な小型水中作業用ロ

ボットのマニピュレータの制御に着目し、アクチュエータの反作用と、流体からの反力（流体力）を補償する制御則を求めるための基礎的研究である。

本報告では、マニピュレータの運動を静水中の水平面内の2次元運動に限定し、次の2点に関して得られた知見を報告する。

(1) マニピュレータが水中を運動する際に受ける力学的影響のうち特にマニピュレータでは必ず現れる回転加速度運動中の抗力について計算しうる流体力学モデルを構築する。そのためにまず、マニピュレータに似た円柱状の試験体を水中で回転運動させてそこに働く力をモデル化し、水中におけるマニピュレータの流体力学的挙動のモデル化を試みる。

(2) 重力と浮力がバランスしている無重量状態のロボットがマニピュレータを動かすとき、その運動の反作用によってロボット本体の絶対的な位置や姿勢に影響がおよぶが、本報告では流体からの力学的影響が無い場合とある場合についてそれぞれの影響を、コンピュータシミュレーションにより求める。

現在進行中の通産省の大型プロジェクト「極限作業ロボット」研究でも小型の海中作業ロボットがテーマ

の一つに挙げられているが、このプロジェクトにおける海中ロボットの開発の主眼は水中での移動や姿勢、位置の制御でありマニピュレータの制御の問題は扱われていない。

本学機械システム工学科・石綿研究室ではマニピュレータでの運動を想定して流体中で円柱がその軸と直角な軸の回りを回転する場合の流体抗力を計測している<sup>1)</sup>。

また、東京理科大学の福田ら<sup>2)</sup>は、水中に小型の2節のマニピュレータを設置し、水上からこれを駆動し、マニピュレータのアーム部に加わる流体力を補償し、アームを高速で運動させる制御則を研究している。東京工業大学の広瀬<sup>3)</sup>らは多関節ロボットの応用として、水中においてはマニピュレータをその軸に垂直方向に運動させることの不利をモレイ制御というマニピュレータ全体を本体から伸縮させる制御法を提案し、必要なエネルギーを小さくできることを示している。

しかし、これらの研究では全てロボット本体は固定されている場合を考えており、本研究のようなロボット本体が浮遊している場合の研究はなされていない。

## 2. 運動方程式

### 2.1 問題設定

水中でのマニピュレータの運動を考える場合、水中という環境の影響を考慮した運動方程式が必要となる。水中では重力に加えて浮力が働く。したがって設計をうまく行えば浮力と重力をバランスさせることができ、等価的に宇宙空間と同じような無重力環境とすることができる。しかし、水中では宇宙空間における無重力空間と異なりロボットやマニピュレータが運動することにより、周囲の水から流体力を受ける。この流体力は速度に比例する成分と加速度に比例する成分があることが知られている。ここではまず周囲に流体のない場合の運動方程式を立て、次に流体を考慮した運動方程式を立てる。また、ロボットやマニピュレータの水との比重量は、等しいものとし流体抗力や付加質量は非保存力として考え、無重力下での浮遊物体の運動方程式を、ラグランジェ法により求める。

Fig. 2-1 のようにロボットマニピュレータ系をモデル化する。ロボット本体を球及び2節のマニピュレータを円柱形であるとし、それらは剛体とする。絶対座標系から見たそれぞれの重心の座標を  $(X, Y)$ ,

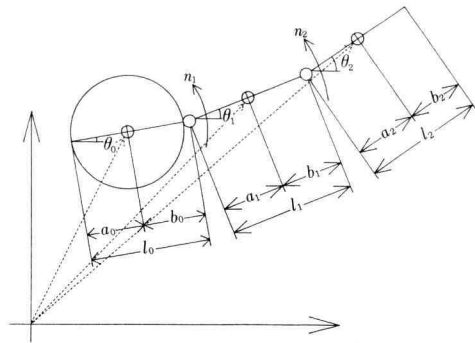


Fig. 2-1. Model of robot manipulator

$(x_1, y_1), (x_2, y_2)$  とする。また、各ジョイントに働くトルクアクチュエータの内力を  $n_1, n_2$ , 自由度を  $X, Y, \theta_0, \theta_1, \theta_2$  の5自由度とする。

### 2.2 流体力を考慮しない場合の運動方程式

このロボット系が運動したときのラグランジェ法による運動方程式は、

$$d(\partial L / \partial \dot{q}_i) / dt - \partial L / \partial q_i = Q_i \quad (2-1)$$

となる。

一般的にラグランジェ関数  $L$  は、運動エネルギー  $T$  と位置エネルギー  $U$  との差であるが、本報告では、二次元平面内での平面運動を考えているので、位置エネルギー  $U$  は0となりラグランジェ関数  $L$  は、運動エネルギー  $T$  のみとなる。運動エネルギー  $T$  は、具体的には次のようになる。

$$\begin{aligned} T = & I_0 \dot{\theta}_0^2 / 2 + I_1 \dot{\theta}_1^2 / 2 + I_2 \dot{\theta}_2^2 / 2 \\ & + m_0 (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) / 2 + m_1 (\dot{x}_1^2 + \dot{y}_1^2) / 2 \\ & + m_2 (\dot{x}_2^2 + \dot{y}_2^2) / 2 \end{aligned} \quad (2-2)$$

ただし、 $m_0, m_1, m_2$  はそれぞれ本体、アーム1, 2の質量  $I_0, I_1, I_2$  はそれぞれ本体、アーム1, 2の重心回りの慣性モーメントである。

それぞれの重心の座標  $(X, Y), (x_1, y_1), (x_2, y_2)$  は、幾何学的拘束条件から以下の関係式が成り立つ。

$$x_1 = X + b_0 \cos \theta_0 + a_1 \cos \theta_1 \quad (2-3)$$

$$y_1 = Y + b_0 \sin \theta_0 + a_1 \sin \theta_1 \quad (2-4)$$

$$\begin{aligned} x_2 = & X + b_0 \cos \theta_0 \\ & + (a_1 + b_1) \cos \theta_1 + a_2 \cos \theta_2 \end{aligned} \quad (2-5)$$

$$\begin{aligned} y_2 = & Y + b_0 \sin \theta_0 \\ & + (a_1 + b_1) \sin \theta_1 + a_2 \sin \theta_2 \end{aligned} \quad (2-6)$$

また、速度や加速度については(2-3)～(2-6)式を時間微分したものとなる。

(2-1)式の $q_i$ は上式での $\theta_0, \theta_1, \theta_2, X, Y$ に対応するので、以下の方程式が得られる。

$$\begin{aligned} q_i = \theta_0: \\ I_0 \ddot{\theta}_0 + m_1 b_0 (-\ddot{x}_1 \sin \theta_0 + \ddot{y}_1 \cos \theta_0) \\ + m_2 b_0 (-\ddot{x}_2 \sin \theta_0 + \ddot{y}_2 \cos \theta_0) = -n_1 \end{aligned} \quad (2-7)$$

$$\begin{aligned} q_i = \theta_1: \\ I_1 \ddot{\theta}_1 - m_1 a_1 (-\ddot{x}_1 \sin \theta_1 + \ddot{y}_1 \cos \theta_1) \\ + m_2 (a_1 + b_1) (-\ddot{x}_2 \sin \theta_1 + \ddot{y}_2 \cos \theta_1) = n_1 \\ - n_2 \end{aligned} \quad (2-8)$$

$$\begin{aligned} q_i = \theta_2: \\ I_2 \ddot{\theta}_2 + m_2 a_2 (-\ddot{x}_2 \sin \theta_2 + \ddot{y}_2 \cos \theta_2) = n_2 \end{aligned} \quad (2-9)$$

$$\begin{aligned} q_i = X: \\ m_0 \ddot{X} + m_1 \ddot{x}_1 + m_2 \ddot{x}_2 = 0 \end{aligned} \quad (2-10)$$

$$\begin{aligned} q_i = Y: \\ m_0 \ddot{Y} + m_1 \ddot{y}_1 + m_2 \ddot{y}_2 = 0 \end{aligned} \quad (2-11)$$

したがって、(2-7)～(2-11)式でマニピュレータの運動が記述されることになる。

## 2.3 流体力

### 2.3.1 アーム上任意点における速度

各アームを動かすことによって生じる流体の流体力を求めるためには、アーム1、アーム2の表面上の任意の点での流体との相対速度 $V_i$ を求める必要があり、ここでは、速度分解法を用いて求める。以下に各アーム任意点における絶対座標及び速度を示す。

① アーム1の表面上任意の点での流体との相対速度

アーム1の重心から長さ $r_1$ の任意の点の座標は、絶対座標系で次のように表される。

$$(x_1 + r_1 \cdot \cos \theta_1, y_1 + r_1 \cdot \sin \theta_1)$$

よって、速度は

$$V_x(r_1) = \dot{x}_1 - r_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \sin \theta_1 \quad (2-12)$$

$$V_y(r_1) = \dot{y}_1 + r_1 \cdot \dot{\theta}_1 \cdot \cos \theta_1 \quad (2-13)$$

$$V_1 = \sqrt{V_x(r_1)^2 + V_y(r_1)^2} \quad (2-14)$$

となる。

② アーム2の表面上任意の点での流体との相対速度

アーム2の重心から長さ $r_2$ の任意の点の座標は、絶対座標系で次のように表される。

$$(x_2 + r_2 \cdot \cos \theta_2, y_2 + r_2 \cdot \sin \theta_2)$$

である。

よって、速度は、

$$V_x(r_2) = \dot{x}_2 - r_2 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (2-15)$$

$$V_y(r_2) = \dot{y}_2 + r_2 \cdot \dot{\theta}_2 \cdot \cos \theta_2 \quad (2-16)$$

$$V_2 = \sqrt{V_x(r_2)^2 + V_y(r_2)^2} \quad (2-17)$$

となる。

### 2.3.2 球に働く流体力

球の流体抗力は、Fig. 2-2に示すようにレイノルズ数 $Re$ が、高い範囲では速度の2乗に比例し、その比例係数である流体抗力係数 $C_{DS}$ は、レイノルズ数に無関係に $C_{DS}=0.44$ となる。

本報告では、球の流体抗力係数を

$$C_{DS}=0.44$$

レイノルズ数の使用範囲を、

$$Re=3 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$$

の場合に問題を限定し、かつ並進運動のみによる流体力として考える。

以上より、直径が $D_0 (=a_0+b_0)$ の球に働く流体力は一般式<sup>5)</sup>より次の式となる。

$$\begin{aligned} F_S = (C_{DS}/2) \cdot \rho_w \cdot D_0^2 \cdot (\pi/4) \\ \cdot (\dot{X}^2 + \dot{Y}^2) \end{aligned} \quad (2-18)$$

### 2.3.3 単位長さの円柱に働く流体力

円柱が流れに垂直に運動するときの流体抗力係数 $C_D$ は、レイノルズ数に対しFig. 2-3のように変化する

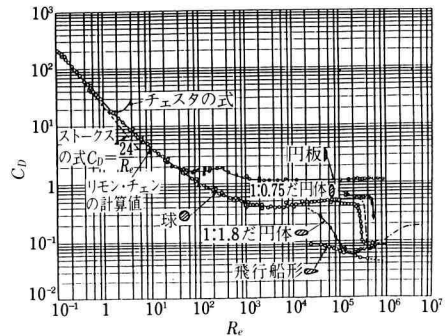
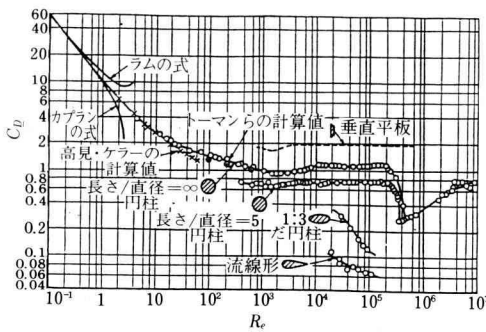


Fig. 2-2. Fluid drag force coefficient of sphere<sup>4)</sup>

Fig. 2-3. Fluid drag force coefficient of cylinder<sup>5)</sup>

る。そして、図よりレイノルズ数  $Re$  が  $Re=10^3 \sim 2 \times 10^5$  の範囲の時、流体抗力係数  $C_D$  は  $C_D=1.1$  とほぼ一定になる。このときのレイノルズ数  $Re$  は、前節の球における抗力係数一定時のレイノルズ数の範囲  $Re=3 \times 10^3 \sim 2 \times 10^5$  を含む。従って、ここで扱うアームのレイノルズ数の範囲は

$$Re=10^3 \sim 2 \times 10^5$$

とする。また、円柱物体の抗力係数は、Table 2-1 のアスペクト比により大きく変化する。本報告では、カルマン渦やアームの振動が発生する範囲のアスペクト比

では、抗力係数が軽減される事や、また抗力係数がある範囲のアスペクト比においては 1 に近似できる事などから、アームのアスペクト比を 10:1 とする。

ただし、この設定では、上記のアスペクト比の円柱で円周方向の速度が、軸方向の速度の  $\sqrt{10}$  倍より大きいならば軸方向の揚力を無視できなくなってしまう。これらの事をふまえた上で、単位長さ当りの円柱の流体力を求める式は、以下の Morison の式<sup>7)</sup>を用いるものとする。

$$f_i = (C_D/2) \cdot \rho_w \cdot d_i \cdot V_i^2 + \left(\frac{\pi}{4}\right) \rho_w d_i^2 (\ddot{x}_i \sin \theta_i - \ddot{y}_i \cos \theta_i) \quad (2-19)$$

(2-19) 式は、第 1 項が流体抗力を表し第 2 項が付加質量を表している。本報告では付加質量は、本体と各アームの質量に加えて計算する事とするので結局流体力は次のようになる。

$$f'_i = (C_D/2) \rho_w d_i V_i \cdot \sin \alpha \mid V_i \cdot \sin \alpha \mid \quad (2-20)$$

$$V_i \cdot \sin \alpha = V_X(r_i) \cdot \sin \theta_i - V_Y(r_i) \cdot \cos \theta_i \quad (2-21)$$

$$f_{iX} = f'_i \cdot \sin \theta_i \quad (2-22)$$

$$f_{iY} = -f'_i \cdot \cos \theta_i \quad (2-23)$$

Table 2-1. アスペクト比と流体抗力係数<sup>6)</sup>

物 体	寸法の割合	基準面積 'A	レイノルズ数	$C_0$
	$\delta=0.01d$	$\frac{\pi d^2}{4}$	$9.6 \times 10^5$	1.12
	$\frac{d}{D}=0.2$ 0.4 0.6 0.8 $\delta=0.01d$	$\frac{\pi(D^2-d^2)}{4}$	$3.6 \times 10^5$	1.16 1.20 1.22 1.78
	$\frac{l}{d}=0.5$ 1.0 2.0 4.0 6.0 7.0	$\frac{\pi d^2}{4}$	$3.6 \times 10^5$	1.00 0.84 0.76 0.78 0.80 0.88
	$\frac{l}{d}=1$ 2 5 10 20 40	$ld$	$0.9 \times 10^5$	0.64 0.68 0.76 0.80 0.92 0.98

Table 2-2. 形状と付加質量 (1)<sup>8)</sup>

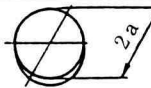

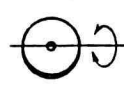
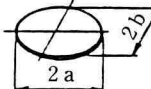


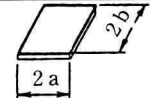

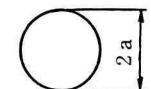

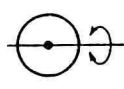









形 状	付加質量	付加慣性モーメント
用 板 	 $\frac{8}{3}\rho a^3$	 $\frac{16}{45}\rho a^3$
だ 円 板 	 $\rho a b^2 K_4$	 $\rho a^2 b^2 K_5$
長方形板 	 $\pi \rho a^2 b K_6$	
球 	 $\frac{2}{3}\pi \rho a^3$	 0

Table 2-3. 形状と付加質量 (2)<sup>8)</sup>

断面形状	付加質量	付加慣性モーメント (袖まわりの同転)	備 考																		
円 	 $\pi \rho a^2$	 0																			
だ 円 	 $\pi \rho a^2$  $\pi \rho b^2$	 $\frac{\pi}{8} \rho (a^2 - b^2)^2$																			
長方形 	 $\pi K_1 \rho n^3$	<table><tr><td><math>b/a</math></td><td>0</td><td>0.1</td><td>0.2</td><td>0.5</td><td>1</td><td>2</td><td>5</td><td>10</td></tr><tr><td><math>K_1</math></td><td>1.00</td><td>1.14</td><td>1.21</td><td>1.36</td><td>1.51</td><td>1.70</td><td>1.98</td><td>2.23</td></tr></table>	$b/a$	0	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10	$K_1$	1.00	1.14	1.21	1.36	1.51	1.70	1.98	2.23	
$b/a$	0	0.1	0.2	0.5	1	2	5	10													
$K_1$	1.00	1.14	1.21	1.36	1.51	1.70	1.98	2.23													

ただし,  $i=1, 2$  で  $a$  はアームの進行方向と軸のなす角である。

### 2.3.4 付加質量

前節で触れたように付加質量は, 本体やアームの加速度項に比例する流体力である。付加質量によって影響を受けるのは, 慣性モーメントと質量の項である。

#### ① 本体部の付加質量による変化

本体部は球状であり, 重心回りの回転運動を行うため Table 2-2, 2-3 より慣性モーメントには変化はないが, 付加質量により計算上の質量は増えるため以下のよう表される。

$$m'_0 = m_0 + \pi \cdot \rho_w \cdot D_0^3 / 12 \quad (2-24)$$

#### ② アームの付加質量による変化

アームは, 円柱状のため Table 2-2, 2-3 より慣性モーメントが変化しその増分も考慮した式は, 以下の通りである。

$$I'_i = I_i + \rho_w \cdot d_i^2 \cdot (\pi/12) \cdot (a_i^3 + b_i^3) \quad (2-25)$$

また, アームの並進運動に起因する付加質量による流体力は,

$$F_{ai} = (\pi/4) \rho_w \cdot d_i^2 (a_i + b_i) (\ddot{x}_i \sin \theta_i - \ddot{y}_i \cos \theta_i) \quad (2-26)$$

ただし,  $i=1, 2$   
となる。

## 2.4 流体力を考慮した浮遊物体の運動方程式

これまで述べてきた流体力や付加質量の問題を、先に示した運動方程式に代入し、流体中での運動方程式の確立を行う。その際、アームである円柱の長さ方向に積分した全流体力と本体である球に働く流体力を非保存力として加え、付加質量の発生に伴う慣性モーメントや質量の変化量を考慮した運動方程式を以下に示す。

$$\begin{aligned}
 q_i &= \theta_0 : \\
 I_0 \ddot{\theta}_0 &+ b_0 (-m_1 \ddot{x}_1 \sin \theta_0 + m_1 \ddot{y}_1 \cos \theta_0 \\
 &- F_{a1} \cos (\theta_1 - \theta_0)) \\
 &+ b_0 (-m_2 \ddot{x}_2 \sin \theta_0 \\
 &+ m_2 \ddot{y}_2 \cos \theta_0 - F_{a2} \cos (\theta_2 - \theta_0)) \\
 &+ b_0 \left\{ \int_{-a_1}^{b_1} (-f_{1x} \sin \theta_0 + f_{1y} \cos \theta_0) dr \right. \\
 &\left. + \int_{-a_2}^{b_2} (-f_{2x} \sin \theta_0 + f_{2y} \cos \theta_0) dr \right\} = -n_1
 \end{aligned} \quad (2-27)$$

$$\begin{aligned}
 q_i &= \theta_1 : \\
 I_1 \ddot{\theta}_1 &- a_1 m'_0 (-\ddot{X} \sin \theta_1 + \ddot{Y} \cos \theta_1) \\
 &+ b_1 (-m_2 \ddot{x}_2 \sin \theta_1 + m_2 \ddot{y}_2 \cos \theta_1 \\
 &- F_{a2} \cos (\theta_2 - \theta_1)) \\
 &- a_1 \{ -F_s \ddot{X} \sin \theta_1 / \sqrt{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)} \\
 &+ F_s \dot{Y} \cos \theta_1 / \sqrt{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)} \} \\
 &- \int_{-a_1}^{b_1} f'_1 r dr + b_1 \int_{-a_2}^{b_2} (-f_{2x} \sin \theta_1 \\
 &+ f_{2y} \cos \theta_1) dr = n_1 - n_2
 \end{aligned} \quad (2-28)$$

$$\begin{aligned}
 q_i &= \theta_2 : \\
 I_2 \ddot{\theta}_2 &- a_2 m'_0 (-\ddot{X} \sin \theta_2 + \ddot{Y} \cos \theta_2) \\
 &- a_2 (-m_1 \ddot{x}_1 \sin \theta_2 + m_1 \ddot{y}_1 \cos \theta_2 \\
 &- F_{a1} \cos (\theta_2 - \theta_1)) \\
 &- a_2 \{ -F_s \ddot{X} \sin \theta_2 / \sqrt{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)} \\
 &+ F_s \dot{Y} \cos \theta_2 / \sqrt{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)} \} \\
 &- a_2 \int_{-a_1}^{b_1} (-f_{1x} \sin \theta_2 + f_{1y} \cos \theta_2) dr \\
 &- \int_{-a_2}^{b_2} f'_2 r dr = n_2
 \end{aligned} \quad (2-29)$$

$$\begin{aligned}
 q_i &= X : \\
 m'_0 \ddot{X} &+ m_1 \ddot{x}_1 + F_{a1} \sin \theta_1 + m_2 \ddot{x}_2 + F_{a2} \sin \theta_2 \\
 &+ F_s \ddot{X} / \sqrt{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)} + \int_{-a_1}^{b_1} f_{1x} dr \\
 &+ \int_{-a_2}^{b_2} f_{2x} dr = 0
 \end{aligned} \quad (2-30)$$

$$q_i = Y :$$

$$\begin{aligned}
 m'_0 \ddot{Y} &+ m_1 \ddot{y}_1 - F_{a1} \cos \theta_1 + m_2 \ddot{y}_2 - F_{a2} \cos \theta_2 \\
 &+ F_s \dot{Y} / \sqrt{(\dot{X}^2 + \dot{Y}^2)} + \int_{-a_1}^{b_1} f_{1y} dr \\
 &+ \int_{-a_2}^{b_2} f_{2y} dr = 0
 \end{aligned} \quad (2-31)$$

ただし、上記の運動方程式では、軸方向の流体力は、0 に近似している。

## 3. シミュレーション結果

本報告におけるシミュレーションは一軸の運動とし、先に述べたアスペクト比の問題や質量比による流体の影響を考慮し、各部の寸法を以下のように決めた。

$$\begin{aligned}
 \text{本体の直径} \quad D_0 &= 1.0 \quad (\text{m}) \\
 \text{アームの直径} \quad D_1 &= 0.15 \quad (\text{m}) \\
 \text{アームの全長} \quad L_1 &= 1.5 \quad (\text{m})
 \end{aligned}$$

また、アーム先端の最大速度が最大レイノルズ数を

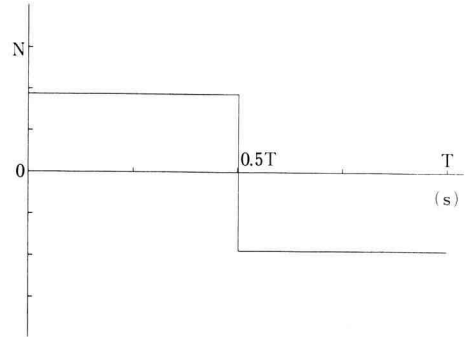


Fig. 3-1. Torque for simulation

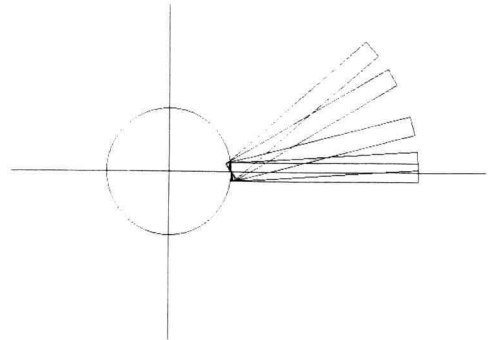


Fig. 3-2. Simulation result in case of fixed manipulator

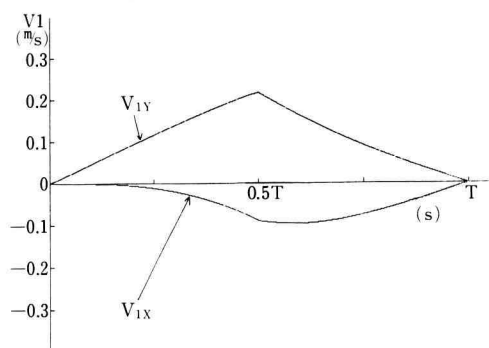


Fig. 3-3. Velocity of arm in case of fixed manipulator

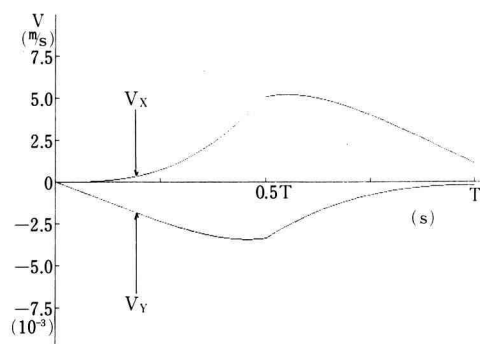


Fig. 3-6. Velocity of body in case of space manipulator

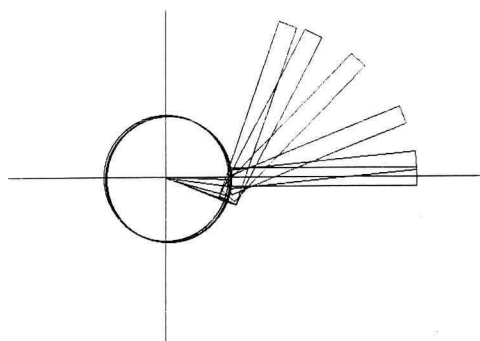


Fig. 3-4. Simulation result in case of space manipulator

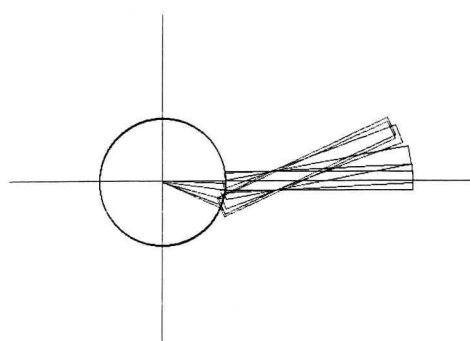


Fig. 3-7. Simulation result in case of underwater manipulator

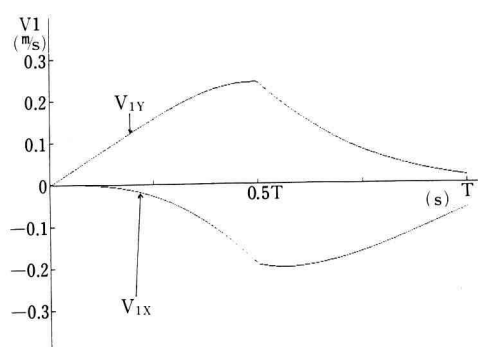


Fig. 3-5. Velocity of arm in case of space manipulator

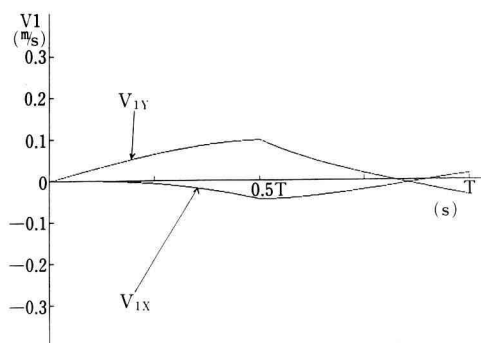


Fig. 3-8. Velocity of arm in case of underwater manipulator

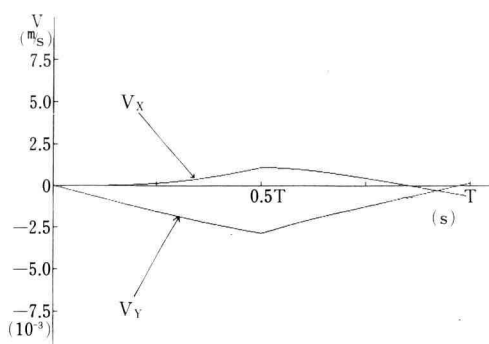


Fig. 3-9. Velocity of body in case of underwater manipulator

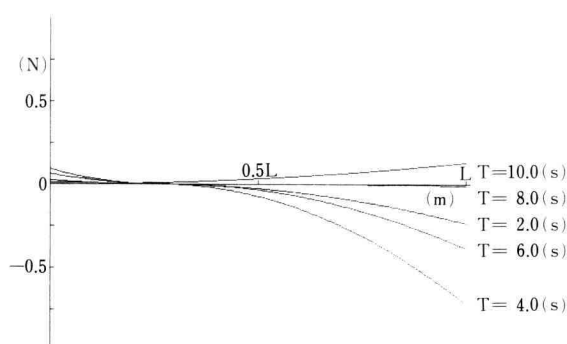


Fig. 3-12. Distribution of fluid drag force in case of underwater manipulator

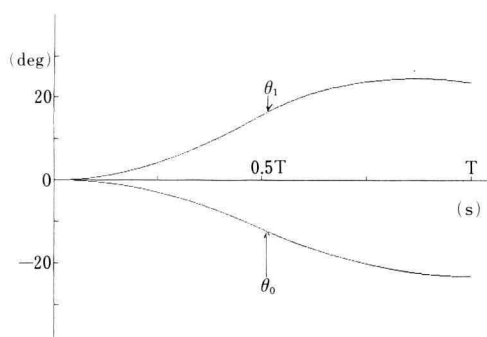


Fig. 3-10. Angular displacements of body and arm in case of underwater manipulator

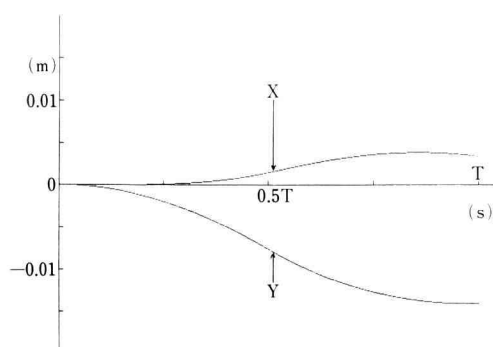


Fig. 3-11. Displacement of body in case of underwater manipulator

越えるような速度となる場合は除く事とする。

シミュレーションは次の2種について行った。

① 地上用, 宇宙用, 浮遊型水中用の3種類の各場合について, 地上用マニピュレータでアーム  $45^\circ$  回転させるトルクを関節に与える。トルクの時間的変化は, Fig. 3-1 に示すような場合についてシミュレートする。

② 浮遊型水中用マニピュレータにおいてアーム可動速度とその先端速度や流体力とアームの挙動との関係を調べる。

Fig. 3-2~Fig. 3-11 は, アーム  $45^\circ$  分駆動する時間を10秒とした時に Fig. 3-1 に示すトルク曲線を与えた地上用, 宇宙用, 浮遊型水中用の各マニピュレータの動作シミュレーションの結果である。

これらの結果から分かるように, 地上用, 宇宙用, 浮遊型水中用のそれぞれのマニピュレータでは, 同様のトルクをかけた場合, その挙動は異なる。また, Fig. 3-5, 3-6 に示すように宇宙用のマニピュレータでは, 運動量や角運動量が保存されるので, 本体の速度とアームの速度は逆向きとなり, その大きさは質量と逆比例の関係にある。しかし, Fig. 3-8, 3-9 より水中用のマニピュレータでは, この保存則が成り立たないことが分かる。

Fig. 3-10, 3-11 より, 浮遊型水中用のマニピュレータでは流体抗力が加わるためにアームの停止時直前に, 各角度  $\theta_0$ ,  $\theta_1$  及び本体の重心座標は, 逆方向に運動している。また, Fig. 3-12 より, アームに作用する流体抗力の作用中心は, ロボット本体の姿勢が変化するため時間と共に移動する。



#### 4. 結論および今後の課題

本報告ではマニピュレータの運動を静水中の水平面内の2次元運動に限定した。

(1) 地上固定型マニピュレータはトルク入力終了すると静止するが、宇宙用マニピュレータでは本体が動いてしまうために入力終了しても静止しない。

(2) 浮遊型水中用マニピュレータは、非保存力である流体抗力が加わるため入力終了直前に逆方向に動き始める。

(3) 浮遊型水中用マニピュレータに作用する流体抗力の作用中心は、ロボットの姿勢が変化するため時間とともに移動する。

今後、マニピュレータの運動を水平面内の2次元に限定しても、

(1) マニピュレータをほぼ同じ大きさの円柱からなる2節リンクにした場合、および、ロボット本体の形状を円柱とした場合について本報告と同様のシミュレーションを行う必要がある。

(2) 一様流中の場合におけるシミュレーションを行う必要がある。

(3) 制御の面では、マニピュレータ先端の軌道を与えた場合の制御についての検討が必要である。

なお、本研究を進めるに当たって協力を得た卒業研究生浅沼廉樹君に対して感謝の意を表する。

#### 参 考 文 献

- 1) 石綿, 川口: 流体中で旋回運動をする円柱に働く流体力, 神奈川工科大学研究報告B理工学編, 第13号, (1989)
- 2) 福田, 原: 水中ロボットの運動制御, 第5回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1987)
- 3) 広瀬, 馬: 多関節マニピュレータの水中作業特性, 第6回日本ロボット学会学術講演会予稿集, (1988)
- 4) 機械工学便覧, A5-98, 図205
- 5) 機械工学便覧, A5-99, 図206
- 6) 機械工学便覧, A5-103, 表34
- 7) R.D. Bievin: Flow-induced vibration, van Nostrand Reinhold Company
- 8) 機械工学便覧, A3-121