

## 復原力を利用した水上に浮遊するロボットの力制御

### Force Control of Robot Floating on the Water Utilizing Vehicle Restoring Force

○梶田尚志\*, 小菅一弘\*\*

○Hisashi Kajita\*, Kazuhiro Kosuge\*\*

\*東北大学大学院, \*\*東北大学

\*Graduate School of Tohoku University, \*\*Tohoku University

キーワード: ロボット (Robot), 移動ロボット (Mobile Robot), 移動マニピュレータ (Mobile Manipulator), 船舶 (Vessel), 力制御 (Force Control)

連絡先: 〒980-77 仙台市青葉区荒巻字青葉 東北大学工学部機械知能工学科 小菅研究室  
梶田尚志, Tel.&Fax.: (022)217-6917 E-mail: kajita@irs.mech.tohoku.ac.jp

#### 1. はじめに

本研究では、水上に浮遊するビークルとマニピュレータから構成された、図1のようなシステムの力制御を考える。このような水上ロボットは、貨物の運搬、ダム湖の清掃、人命救助などの水上での作業への応用が期待されている。しかし、宇宙マニピュレータや水中ロボットなどの他の浮遊型ロボットと同様に慣性座標系に固定されていないため、マニピュレータ部の正確な制御が難しく、また、重力・流体の粘性摩擦・浮力など様々な外力を受け、さらには、マニピュレータ、ビークル、流体の間の相互干渉により、振動を誘発してしまう場合もある[1]-[6]。これまで、このシステムに関して、厳密なモデルに基づくマニピュレータとビークルの協調運動制御アルゴリズムや、ビークルのスラスト配置の評価法が提案されてきた[7]-[10]。

一方、より一般的な作業にこのシステムを応用

するためには、環境との干渉を考慮した制御方法を用いる必要がある。このような制御方法として、これまでに、ハイブリッド制御、インピーダンス制御などの力制御アルゴリズムが多くの研究者によって研究されている。しかし、水上ロボットの力制御に関する研究は、ほとんど行われていない。浮遊型ロボットの力制御の場合、エンドエフェクタが受ける反力がマニピュレータを介してビークルへ伝播するため、ビークルが移動し、作業対象との接触が維持出来ない。そこで、作業対象との接触を維持するため、本論文では、マニピュレータから反力として加わる力/モーメントを補償する方法を考える。

本論文では、ビークル部に働く復原力を利用して、反力を補償する方法を提案する。提案する方法を用いることによって、通常の船舶と同様な、特別なアクチュエータをビークルに装備しないロボットでも力制御を行うことができる。また、反

力の補償に必要とされるエネルギーの消費量も抑えることが可能である。以下、第2章で反力の補償の方法について述べ、第3章で作業の反力を補償するための、アクチュエータ出力を導出し、第4章においてエンドエフェクタで発生できる力の範囲を計算する。ここでは力の範囲を視覚的に表現することにより、提案した方法によって全方向に力制御が実現できることを示す。第5章では、シミュレータを用いて行った力制御の実験結果を報告する。

## 2. 反力の補償方法

作業対象との接触を維持するための、作業対象からマニピュレータに加わる力/モーメントの補償方法について考える。尚、水面は慣性系に対して静止しており、また水平であるものと仮定する。さらに、波や風はなく、システムは静水上に静止しているものとする。

まず準備として、2つの座標系を定義する。図2のように、慣性座標系  $o-xyz$  の  $x$  軸  $y$  軸を水面に平行に、且つ互いに垂直に定義し、また、 $z$  軸を  $xy$  両軸に対して垂直で鉛直上向きになるように定義する。次に、ビークルに固定されたビークル座標系  $o_v-x_vy_vz_v$  を図2のように定義する。尚、ビークルが傾斜していない場合、 $x$  と  $x_v$ 、 $y$  と  $y_v$ 、 $z$  と  $z_v$  が一致するものとする。一般に、 $x_v$  方向の並進運動をサージ、 $x_v$  軸回りの回転運動をローリング、 $y_v$  方向の並進運動をスウェイ、 $y_v$  軸回りの回転運動をピッチング、 $z_v$  方向の並進運動をヒービング、 $z_v$  軸回りの回転運動をヨーイングと呼ぶことが多いので、本論文でもその呼称に従う。

1章で述べたように、環境との接触を維持するためには、任意の方向に力/モーメントを発生する必要がある。しかし、現在一般的に用いられている船舶は、サージ、スウェイ、ヨーの方向に

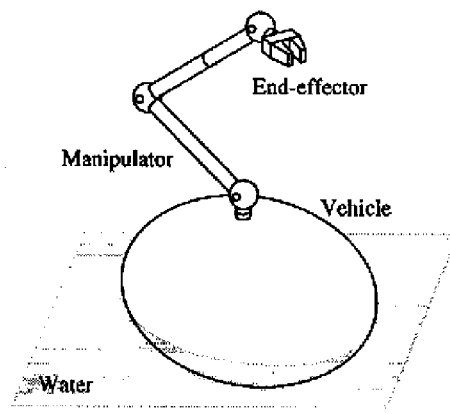


Fig. 1 Robot floating on the water

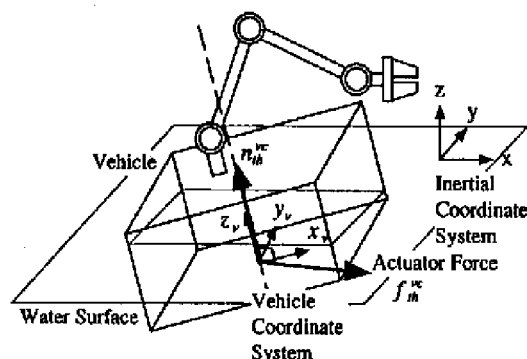


Fig. 2 Vehicle actuator force/moment

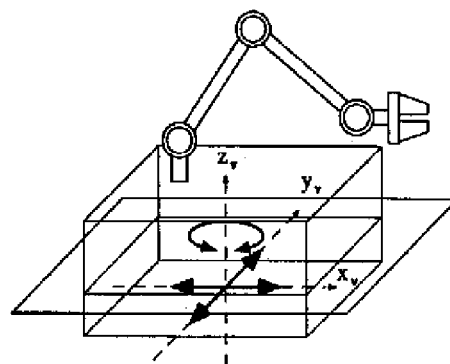


Fig. 3 Force/moment generated by vehicle actuator

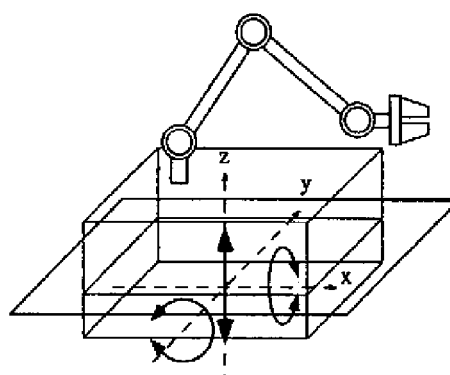


Fig. 4 Restoring force/moment

力/モーメントを発生することはできても、ヒープ、ロール、ピッチ方向には力/モーメントを発生することができない(図3)。そこで、本論文では、マニピュレータから加わる力/モーメントの補償手段として、ブイクルに加わる復原力と、アクチュエータによって発生する力/モーメントを併用する。

図4にブイクルに働く復原力と復原モーメントを示す。復原力が働く方向の力/モーメントは、ブイクルのアクチュエータを使用しなくても、常に復原力によって補償される。一方、復原力が働かない方向については、マニピュレータ部から加わる力/モーメントと釣り合うように、アクチュエータによって力/モーメントを発生させる必要がある。

ただし、ブイクルが傾斜するため、アクチュエータが力/モーメントベクトルを発生する方向は、要求される力/モーメントの方向に完全には一致しない。次章では、この点を考慮しながら、反力を補償するためのアクチュエータの出力を求める。

### 3. スラスト出力

ここでは、ブイクルがアクチュエータとしてスラストを備えているものと仮定する。また、マニピュレータからブイクルの重心に加わる力とモーメントを  $f_m^{vc}, n_m^{vc} \in R^3$  とし、スラストによってブイクルに加えられる力とモーメントを  $f_{ih}^{vc}, n_{ih}^{vc} \in R^3$  とする。

アクチュエータの出力は、反力を補償するための釣り合い条件と、アクチュエータの出力方向に関する条件を、同時に満たす必要がある。反力を補償するための釣り合い条件は、 $f_m^{vc}$  と  $f_{ih}^{vc}$ 、 $n_m^{vc}$  と  $n_{ih}^{vc}$  の復原力の影響を受けない方向成分が釣り合っていることである。 $f_m^{vc}$ 、 $n_m^{vc}$ 、 $f_{ih}^{vc}$  と  $n_{ih}^{vc}$  の復原力の影響を受けない方向成分を、 $f'_m$ 、 $n'_m$ 、

$f'_{ih}$ 、 $n'_{ih}$  とすると、これらは次式を満たしている必要がある(図5, 図6)。

$$f'_{ih} + f'_m = 0 \quad (1)$$

$$n'_{ih} + n'_m = 0 \quad (2)$$

この  $f'_m$  と  $n'_m$ 、 $f'_{ih}$  と  $n'_{ih}$  は、それぞれ水平面  $xy$  への正射影、 $z$  軸への正射影にあたるので、次のように計算できる。

$$f'_m = (xx^T + yy^T)f_m^{vc} \quad (3)$$

$$f'_{ih} = (xx^T + yy^T)f_{ih}^{vc} \quad (4)$$

$$n'_m = zz^T n_m^{vc} \quad (5)$$

$$n'_{ih} = zz^T n_{ih}^{vc} \quad (6)$$

ここで、 $x \in R^3$  は水平方向の単位ベクトル、 $y \in R^3$  は  $x$  に直交する水平面上の単位ベクトル、 $z \in R^3$  は  $z = x \times y$  で表される単位ベクトルである。これらを図5のように置かれた慣性座標系で

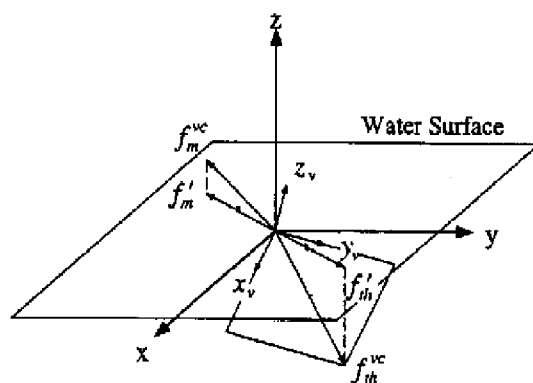


Fig. 5 Balance of force

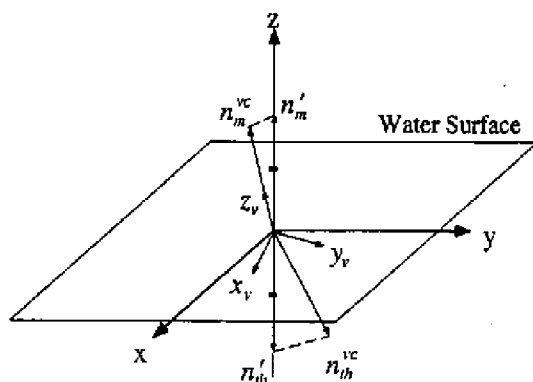


Fig. 6 Balance of moment

$$x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (7)$$

$$y = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$z = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}^T \quad (9)$$

と記述した場合には、条件式(1)の  $x$ ,  $y$  成分、条件式(2)の  $z$  成分から次のようなアクチュエータの出力の釣り合い条件が求められる。

$$f_{ihx}^{vc} = -f_{mx}^{vc} \quad (10)$$

$$f_{ihy}^{vc} = -f_{my}^{vc} \quad (11)$$

$$n_{ihz}^{vc} = -n_{mz}^{vc} \quad (12)$$

尚、添字  $x$ ,  $y$ ,  $z$  はそれぞれ  $x$ ,  $y$ ,  $z$  成分を表す。

次に、アクチュエータの出力方向の条件式をもとめる。アクチュエータの出力の方向はビークルの姿勢によって定まる。アクチュエータが発生する力ベクトルは、図5、図6の  $x_v y_v$  平面上に限定されており、つねに  $z_v$  軸に垂直である。また、モーメントベクトルは  $z_v$  軸に平行である。そこで、ビークル座標系の各軸の方向ベクトルを、慣性座標系で  $x_v, y_v, z_v \in R^3$  と記述すると、並進力に関する条件は次のように表される。

$$z_v^T f_{ih}^{vc} = 0 \quad (13)$$

(13)式と(10)式、(11)式から、慣性座標系で表されたスラスト出力  $f_{ih}^{vc}$  は次のように求められる。

$$f_{ih}^{vc} = \Phi_f f_m^{vc} \quad (14)$$

ただし、 $\Phi_f$  は次のような行列である。

$$\Phi_f = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ -\frac{z_{vx}}{z_{vz}} & -\frac{z_{vy}}{z_{vz}} & 0 \end{bmatrix} \quad (15)$$

尚、 $z_{vx}, z_{vy}, z_{vz}$  はそれぞれベクトル  $z_v$  の  $x, y, z$  成分を表す。一方、スラストが発生するモーメント  $n_{ih}^{vc}$  は、常に  $z_v$  に平行であることから、

$$n_{ih}^{vc} = |n_{ih}^{vc}| z_v \quad (16)$$

と書ける。この関係を用いると、(2)式は次のように変形できる。

$$|n_{ih}^{vc}| = -\frac{z_v^T n_m^{vc}}{z_v^T z_v} \quad (17)$$

両辺に  $z_v$  を掛けて(7)(8)(9)式を代入すれば、マニピュレータから加わるモーメントを補償するスラストモーメント  $n_{ih}$  は次のように計算できる。

$$n_{ih}^{vc} = \Phi_n n_m^{vc} \quad (18)$$

ただし、

$$\Phi_n = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{z_{vx}}{z_{vz}} \\ 0 & 0 & -\frac{z_{vy}}{z_{vz}} \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix} \quad (19)$$

である。尚、ビークル座標系によるスラスト出力  ${}^v f_{ih}^{vc}, {}^v n_{ih}^{vc}$  は行列  $\Psi = \begin{bmatrix} x_v & y_v & z_v \end{bmatrix}$  を用いて次のように求められる。

$${}^v f_{ih}^{vc} = \Psi^T \Phi_f f_m^{vc} \quad (20)$$

$${}^v n_{ih}^{vc} = \Psi^T \Phi_n n_m^{vc} \quad (21)$$

ここで、第4章の計算のために、一般化力ベクトル  $u_{ih} \in R^6, u_m \in R^6$  を使って(14)式と(18)式を次のようにまとめる。

$$u_{ih} = \Phi u_m \quad (22)$$

ただし、

$$u_{ih} = \begin{bmatrix} f_{ih}^{vcT} & n_{ih}^{vcT} \end{bmatrix}^T$$

ビークルのアクチュエータによって、(22)式で求められた力とモーメントが発生すれば、復原力を利用してエンドエフェクタが受ける任意の方向の反力を補償できる。

## 4. 発生可能な力

エンドエフェクタが発生できる力/モーメントは、スラストの性能や、ビークルが採りうる位置/姿勢の範囲により制限される。そこで、本章ではエンドエフェクタで発生できる力/モーメントの範囲を求める。

マニピュレータ／ビークル系の場合，マニピュレータの姿勢によって，マニピュレータ部の重心位置や，作業対象から加わる力／モーメントの作用点の位置が変化する．そのため，これらの影響を考慮して力の範囲を計算する必要がある．まず，これらのパラメータ間の関係式を導出する．以下，エンドエフェクタに加わる一般化力を  $u_e \in R^6$ ，ビークルに働く浮力を  $u_b \in R^6$ ，システムに働く重力を  $u_g \in R^6$ ，ビークルのスラストの推進力を  $u_{th} \in R^6$  とする．また，ビークルの位置 ( $p_v \in R^3$ ) / 姿勢 ( $\theta_v \in R^3$ ) とマニピュレータ部の関節変位をそれぞれ，  $q_v = [p_v^T \ \theta_v^T]^T \in R^6$ ，  $q_m \in R^6$  のように一般化ベクトルで表す．

このシステムの運動方程式は，次のように表されることが分かっている [8]．

$$\dot{H}_1 \dot{q}_v + H_1 \ddot{q}_v + \dot{H}_2 \dot{q}_m + H_2 \ddot{q}_m = u \quad (23)$$

$$u = u_e + u_b + u_g + u_f + u_{th} \quad (24)$$

$H_1$ ，  $H_2$  は  $6 \times 6$  の慣性行列である．尚，一般化力に含まれるモーメントは，全てビークルの重心回りで記述してある．ここで，全ての速度と加速度が 0 の場合には，(23) 式の右辺は 0 であり，(24) 式の流体の摩擦抵抗  $u_f$  も 0 であるから，次のような力／モーメントの釣り合いの式が得られる．

$$u_e + u_b + u_g + u_{th} = 0 \quad (25)$$

マニピュレータのエンドエフェクタに加わる力／モーメントを計算するために，それぞれのパラメータを作用点回りの力／モーメントに変換する．作業対象からエンドエフェクタに働く力  $f_e$ ，モーメント  $n_e$ ，浮力の中心に働く浮力  $f_b$ ，ビークルに働く重力  $f_{gv}$ ，リンク  $i$  に働く重力  $f_{gi}$  を使って，これらの一般化力を記述すると次のようになる．

$$u_e = S_e \begin{bmatrix} f_e \\ n_e \end{bmatrix} \quad (26)$$

$$u_b = S_b \begin{bmatrix} f_b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (27)$$

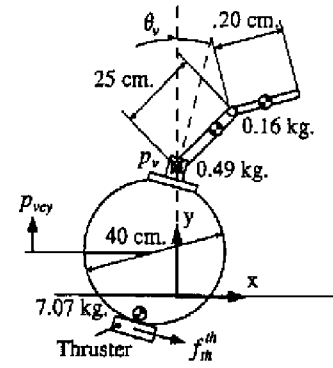


Fig. 7 Model and parameters

Table 1 Parameters of simulation model

	Min	Max
Thruster Output $f_{th}^{th}$ [N]	-20	20
Vehicle Vertical Position $p_{vcy}$ [cm]	-1.0	1.0
Vehicle Orientation $\theta_v$ [deg]	-30	30

$$u_g = S_{gv} \begin{bmatrix} f_{gv} \\ 0 \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^n S_{gk} \begin{bmatrix} f_{gk} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (28)$$

ただし

$$S_{[ ]} = \begin{bmatrix} I_3 & 0 \\ [r_{[ ]} \times] & I_3 \end{bmatrix} \quad (29)$$

$r_{[ ]}$  はビークルの重心から  $f_{[ ]}$  の作用点への慣性座標系で表されたベクトル，  $I_3$  は  $3 \times 3$  の単位行列である．これらの関係を用いると，(25) 式は次のように書ける．

$$S_e \begin{bmatrix} f_e \\ n_e \end{bmatrix} + S_{gv} \begin{bmatrix} f_{gv} \\ 0 \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^n S_{gk} \begin{bmatrix} f_{gk} \\ 0 \end{bmatrix} + S_b \begin{bmatrix} f_b \\ 0 \end{bmatrix} + u_{th} = 0 \quad (30)$$

速度，加速度が 0 の場合，マニピュレータからビークルに加わる力／モーメントは，次のように表される．

$$\begin{bmatrix} f_m \\ n_m \end{bmatrix} = S_e \begin{bmatrix} f_e \\ n_e \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^n S_{gk} \begin{bmatrix} f_{gk} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (31)$$

この関係を用いると，(22) 式は，

$$u_{th} = \Phi \left( S_e \begin{bmatrix} f_e \\ n_e \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^n S_{gk} \begin{bmatrix} f_{gk} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \quad (32)$$

となる。また、重力項は、浮力によって完全に補償されるため、 $\Phi$ による線形写像の零空間上のベクトルになる。よって、

$$\Phi \sum_{k=1}^n S_{gk} \begin{bmatrix} f_{gk} \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \quad (33)$$

となり、(32)式は次式のように書ける。

$$u_{th} = \Phi S_e \begin{bmatrix} f_e \\ n_e \end{bmatrix} \quad (34)$$

これらを(25)式に代入すると

$$\begin{aligned} & (\Phi + I_6) S_e \begin{bmatrix} f_e \\ n_e \end{bmatrix} + S_{gv} \begin{bmatrix} f_{gv} \\ 0 \end{bmatrix} \\ & + \sum_{k=1}^n S_{gk} \begin{bmatrix} f_{gk} \\ 0 \end{bmatrix} + S_b \begin{bmatrix} f_b \\ 0 \end{bmatrix} = 0 \end{aligned} \quad (35)$$

となる。 $I_6$ は $6 \times 6$ の単位行列である。ここで、浮力の項と重力の項を次のようにまとめる。

$$\begin{bmatrix} f_r \\ n_r \end{bmatrix} \equiv S_{gv} \begin{bmatrix} f_{gv} \\ 0 \end{bmatrix} + \sum_{k=1}^n S_{gk} \begin{bmatrix} f_{gk} \\ 0 \end{bmatrix} + S_b \begin{bmatrix} f_b \\ 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

この、 $\begin{bmatrix} f_r^T & n_r^T \end{bmatrix}^T$ は復原力を表すベクトルである。この項はビークルの位置/姿勢 $q_v$ とマニピュレータの姿勢 $q_m$ の関数になる。これを用いると、(35)式は次のようになり、

$$(\Phi + I_6) S_e \begin{bmatrix} f_e \\ n_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_r \\ n_r \end{bmatrix} = 0 \quad (37)$$

さらに、次のように書き換えられる。

$$-\frac{z_{vx}}{z_{vz}} f_{ex} - \frac{z_{vy}}{z_{vz}} f_{ey} + f_{ez} + f_{rz} = 0 \quad (38)$$

$$(r_e \times f_e)_x - \frac{z_{vx}}{z_{vz}} \{(r_e \times f_e)_z + n_{ez}\} + n_{ex} + n_{rx} = 0 \quad (39)$$

$$(r_e \times f_e)_y - \frac{z_{vy}}{z_{vz}} \{(r_e \times f_e)_z + n_{ez}\} + n_{ey} + n_{ry} = 0 \quad (40)$$

これらの条件式から、与えられたスラストの最高出力とビークルの姿勢の範囲に対して、エンドエフェクタで発生できる力の範囲を計算することができる。

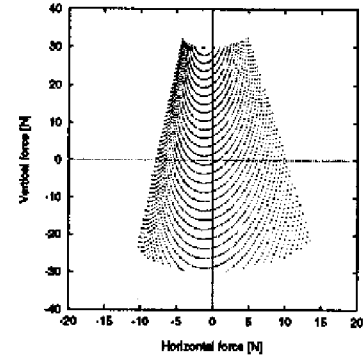


Fig. 8 Range of force

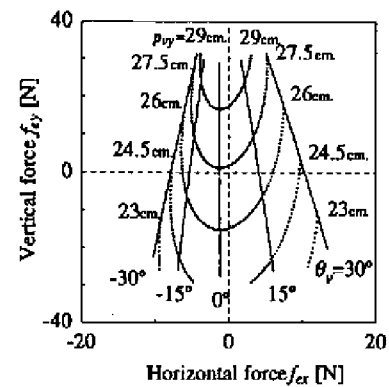


Fig. 9 Level lines of vehicle position/orientation

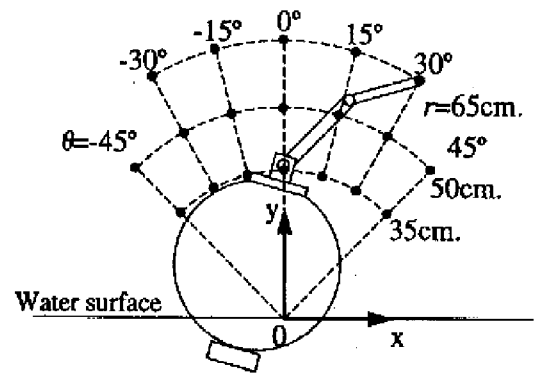


Fig. 10 Estimated end-effector positions

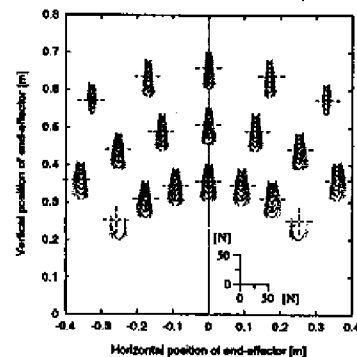


Fig. 11 Variation of range of contact force

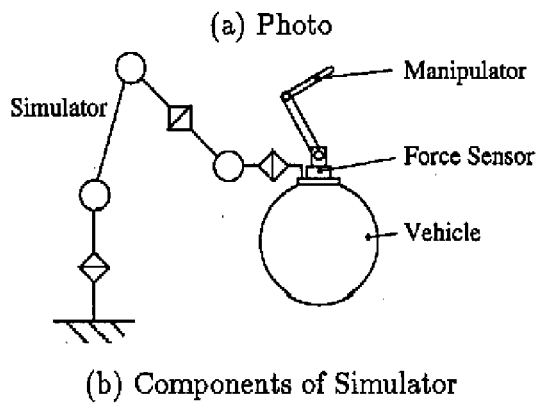
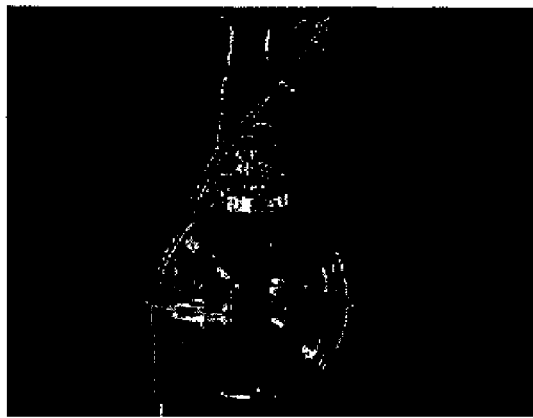


Fig. 12 Simulator of vehicle motion

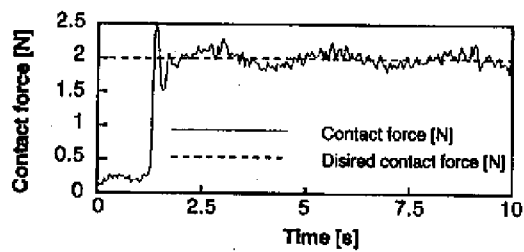
我々は、これまでに、水上ロボットのための実験機を製作しており、エンドエフェクタの位置制御について報告を行っている[11]。本論文では、その実験機によって力制御を行う場合を想定し、エンドエフェクタと作業対象の間で発生可能な力の範囲を計算する。尚、本章での計算法は一般の水上ロボットにも容易に適用可能である。ここでは、エンドエフェクタにはモーメントが働かないとし、 $n_e = 0$  の場合について考えるが、 $n_e \neq 0$  の場合にもこの計算法は適用できる。

例題として用いるシステムのパラメータを図7に示す。また、本論文では、スラスタ1基をビークルの最下部に図のように取り付けてあると仮定する。このとき、スラスタの推力の方向は、常に3章の  $x_v$  ベクトルに平行であるものとする。マニピュレータ部は回転関節のみの2自由度シリアルリンクであり、第1リンクは0.49[kg]でリンク長が25[cm]、第2リンクは0.23[kg]でリンク長が20[cm]である。計算のためのスラスタの推力  $f_{ih}^h$

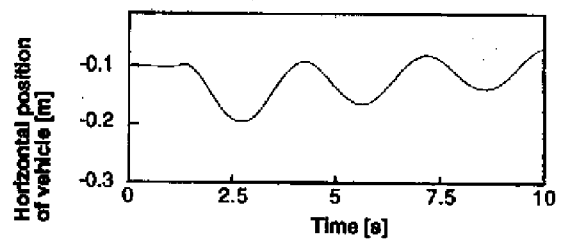
( $f_{ih}^h = x_v^T f_{ih}^{vc}$ )、ビークルの中心位置  $p_{vcy}$ 、ビークルの姿勢  $\theta_v$  の範囲を表1に示す。

ここで、エンドエフェクタの位置を表すための座標系を、図7のように定義した。x座標はエンドエフェクタのビークルに対する水平位置を表し、y座標は水面に対するエンドエフェクタの位置を表す。その結果、浮力に影響するビークルと水面との位置関係と、重力に影響するエンドエフェクタとビークルとの位置関係が、グラフに効果的に反映される。

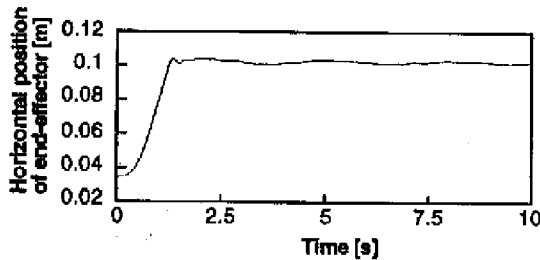
図7の座標系で  $x = 0.25[m]$ 、 $y = 0.5[m]$  にエンドエフェクタがある場合について、計算した結果が図8である。さらに、図9のグラフは、ビークルの鉛直方向の位置  $p_{vy}$  の等変位線 (1.5[cm] 毎) と、姿勢  $\theta_v$  の等変位線 (15[deg] 毎) を示したものである。図9のグラフによって、目標の力を得る場合の、ビークル位置と姿勢を調べることができる。また、この図から、ビークルが特定の位置と姿勢にある場合の、エンドエフェクタに加わる力を求めることもできる。次に、エンドエフェクタの位置によって力の範囲がどのように変化するかを調べた。図10のように19個のエンドエフェクタの位置を選び、それぞれの位置における力の範囲をプロットした。その結果が図11である。尚、各グラフの原点はそれぞれのエンドエフェクタの位置に設定した。この結果から、エンドエフェクタの位置が、ビークルから鉛直方向に離れるほど水平方向の力の範囲が狭くなり、水平方向に離れるほど鉛直方向の力の範囲が狭くなることが分かる。これは、スラスタや浮力の中心からの距離が離れるほどビークルに働くモーメントが大きくなり、ビークルを大きく傾斜させるためと考えられる。また、 $r = 0.35[m]$ 、 $\theta_v = \pm 30[deg]$  の場合、力の範囲の中心部がプロットされていないことが確認できる。これは、プロットされている大きさ/方向の力が加わっていないければ、その位置/姿勢



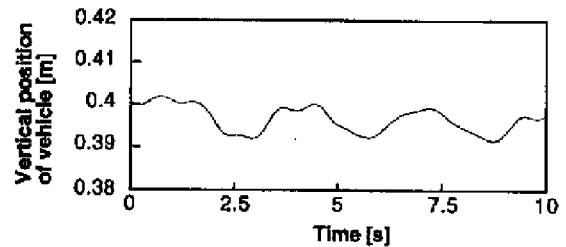
(a) Contact force



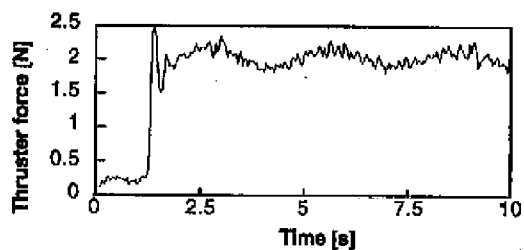
(d) Horizontal position of vehicle



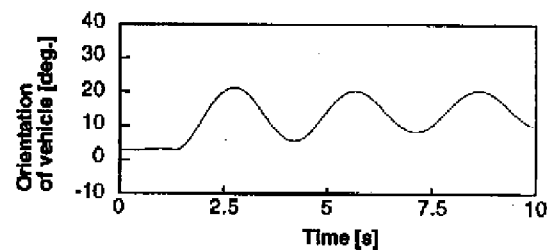
(b) Horizontal position of end-effector



(e) Vertical position of vehicle



(b) Thruster force



(e) Orientation of vehicle

Fig. 13 Experimental result

を実現できないことを示す。

## 5. シミュレータを用いた実験

実験を行うため、水上でのビークルの運動を実現するシミュレータを開発した。システムの概要を図12に示す。図のように、6軸シリアルリンクマニピュレータと水上ロボットから構成されている。このシステムは、ビークルの力学モデルを基に、ビークルの加速度を計算し、それを6軸シリアルリンクマニピュレータによって実現する。

ビークル部には、周囲の流体とマニピュレータ部から力/モーメントが加わる。周囲の流体から受ける力/モーメントは、その瞬間のビークルの状態量から計算する。マニピュレータ部から受け

る力/モーメントは、マニピュレータのベースに設けた6軸力センサによって計測する。

実験では、垂直に立てた壁面にエンドエフェクタを押しつけた。ここでは、マニピュレータの制御系にはダンピングコントロールを用い、力の目標値は2[N]とした。

実験結果を図13に示す。(a)から順に、水平方向の力、エンドエフェクタの水平位置、スラスターの目標値、ビークルの水平、鉛直位置、姿勢の変化の様子である。これらのグラフから、ビークルの運動は多少振動を伴うものの、振動は減衰しており、ビークルの位置はほぼ停止していることがわかる。また、これらの結果は、復原力を利用することにより、力制御が実現できる事を示し



ている。

## 6. まとめ

本論文では、水上ロボットの力制御問題について考察し、ビークルの復原力を利用することによって、ビークルが6自由度のアクチュエータを持たなくても力制御が可能であることを示した。また、シミュレータを用いた力制御の実験を行い、アルゴリズムの有効性を確認した。本論文で示したエンドエフェクタに加わる力の範囲の計算は、水上ロボットの作業計画などに応用できる。また、現在、実機を開発しており、今後は、実機による力制御の実験を行う予定である。

## 参考文献

- 1) Z. Vafa, S. Dubowsky "On the dynamics of manipulators in space using the virtual manipulator approach", Proc. 1984 IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.579-585, 1987
- 2) K. Yoshida, "Control of Space Robotic Manipulators", Ph.D. Dissertation in Mechanical Engineering Science, Tokyo Institute of Technology, 1990
- 3) 高橋, 岩崎, 秋園, "水中調査ロボット「アクアロボ」", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 (vol.B) pp.223-228, 1992
- 4) 藤井, 浦, 黒田, "自律海中ロボットのための汎用テストベッドの開発", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 (vol.A) pp.107-110, 1994
- 5) S. McMillan, D. E. Orin, R. B. McGhee, "Efficient Dynamic Simulation of an Underwater Vehicle with a Robotic Manipulator", IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 25, No. 8, August 1995 pp.1194-1206
- 6) 足達, 吉田, "重力と浮力を考慮した水中ロボットの運動制御", 機論, 58-551, C (1995), pp.314-321
- 7) 小菅, 奥田, 福田, "水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系の制御", 機論, 58-551, C (1992), pp.138-145
- 8) K. Kosuge, T. Fukuda and H. Ohkubo, "Control of Manipulator/Vehicle System Floating on the Water", IEEE Proc. of the 30th Conference on Decision and Control, December 1992, pp.2781-2786.
- 9) K. Kosuge, M. Okuda and T. Fukuda, "Motion Control of Manipulator/Vehicle System Floating on Water", Proc. of 2nd IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, (1992), pp.93-100.
- 10) 小菅, 奥田, 福田, "Translatibility と Rotatability に基づく水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系の解析と設計", 機論, 59-563, C (1993), pp.196-202
- 11) 小菅, 梶田, 福田, "水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系の軌道追従制御", ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集 (vol.A) pp.111-112, 1994