水中浮遊ロボットの作業領域と動的可操作性

足 達 康 行* 吉 田 和 夫*

Workspace and Dynamic Manipulability of Unconstrained Robot Manipulator in Water

Yasuyuki Adachi* and Kazuo Yoshida*

Since the working environment in ocean is very severe for human being, the development of underwater robot has been demanded. The influence of fluid surrounding a robot and its unconstrained state are characteristic of the underwater robot. As a first step of the study for the underwater robot, this paper investigates the workspace and the dynamic manipulability measure, which are used for the standards to evaluate the manipulator performance, for the manipulator mounted on a unconstrained robot in water and furthermore compares them to those of the space robot manipulator.

The workspace of underwater robot which is called the straight-pass workspace is smaller than the space robot in the condition of the model used in this paper. However its workspace depends on the shape of robot and manipulator. The tendency of dynamic manipulability at the position of the hand is almost the same as that of the space robot, but the dynamic manipulability measure is smaller because of the influence of the added mass and added inertia.

Key Words: Underwater robot, Work space, Generalized Jacobian matrix, Fluid force, Dynamic Manipulability Measure

1. 緒 言

従来より、海洋における資源、エネルギーあるいは空間利用といったさまざまな形で海洋開発が積極的に進められてきたが、その作業環境は宇宙空間と同様に人間にとって非常に厳しいものである。とくに、作業水深が深くなってくると潜水士の安全のために水中における作業時間は非常に短くなり作業効率は極端に低下する。このため、水中での作業ロボットの重要性は高く、近年水中ロボットに関する研究が盛んに行われている。

水中ロボットの大きな特徴としては、空気中や宇宙空間と異なり、周囲の流体の影響が大きく、それを無視できないこと、及び宇宙ロボットと同様に浮遊状態での作業が可能なことである。一方、マイクロロボットのように、小型で超軽量のロボットが開発された場合においては、流体の影響はさらに重要な問題となってくることが予想される。

水中マニピュレータに関する研究としては、五百井らによるモデリングとシミュレーションに関する研究[1]、福田らの運動制御に関する研究[2]がある。これらの研究は、マニピュレータの台座が固定されたモデルである。ロボットが浮遊した

状態でのマニピュレータの研究としては、川島らによるアームの位置決め制御の研究[3]、あるいは小菅らによる水上に浮上するマニピュレータ/ビークル系の制御に関する研究[4]がある。

一方、宇宙開発の分野においても、それを支援する作業ロボットの開発が必要である。とくに、宇宙空間で浮遊しながら作業するマニピュレータに関する基礎研究として、Vafa らの「仮想マニピュレータ」[5]や吉田らの「一般化ヤコビ行列」[6][7][8]を用いた研究があり、これらの研究を基礎とした宇宙マニピュレータの作業領域及び可操作性に関する研究、あるいはマニピュレータの軌道制御に関する研究が近年活発に行われており、多くの研究成果が得られている。

一般にマニピュレータの性能を評価する基準としては、機構性能性、制御性、安全性及び信頼性などが考えられるが、中でも機構性能はとくに重要である[9]。この機構性能を評価する基準として、マニピュレータの「作業領域」、「可操作性」及び「動的可操作性」があるが、水中浮遊ロボットに搭載されたマニピュレータについてのこのような評価はこれまで見当たらない。そこで本論文では、水中浮遊ロボットに搭載されたマニピュレータの制御に関する研究の第一歩として、まず、宇宙ロボットのように運動量が保存される場合に定式化されてきた分解速度法を、運動量が保存されない水中浮遊ロボットに拡張す

原稿受付 1993年7月14日

*慶應義塾大学理工学部

*Faculty of Science & Technology, Keio University

る。次に、得られた制御則を用いてマニピュレータの軌道制御を行い、その「作業領域」を求める。さらに、吉川らが定義したマニピュレータの「動的可操作性」及び「動的可操作度」[9]を水中浮遊ロボットに搭載されたマニピュレータに適用し、その検討を行う。

2. モデリング及び運動方程式

2.1 モデルの設定及び仮定

問題の複雑化を避けるために、Fig. 1 に示すように2自由度の回転関節を持つマニピュレータを搭載した水中ロボットモデルを考える。また図に示すように、ロボット本体(リンク0)に抵抗板を取り付け、その効果についても検討を行う。

本論文で使用する座標系及び主要な変数を以下のように定義する。

Σ_U : 慣性座標系

Σ_0 : ロボット本体(リンク0)の重心を原点とし、リンク0に固定した座標系

Σ_i : 関節*i*を原点としてリンク*i*に固定した座標系 (*i*=1, 2)

jR_k : 各座標系間の回転行列 (*j*=U, 0, 1 *k*=0, 1, 2)

r_i : 慣性系から見たリンク*i*の重心の位置ベクトル (*i*=0, 1, 2)

E : 慣性系から見たハンドの位置ベクトル

$\dot{p}_i$: 各リンク座標系から見た関節位置の速度ベクトル (*i*=0, 1, 2)

ω_i : 各リンクの回転角速度

m_i, M_{ai} : 各リンクの質量及び付加質量テンソル

I_i, I_{ai} : 各リンクの重心回りの慣性テンソル及び付加慣性テンソル

また、本論文においては以下の仮定を設定する。

- (1) 各リンクはすべて剛体とする。
- (2) ロボットの運動はX-Y平面内の二次元運動とし、Z方向の運動は生じないものとする。
- (3) ロボット及びアームの各密度は周囲の流体の密度と等しい。
- (4) ロボット及びアームの各質量中心と付加質量の作用中心

Fig. 1 Model of Robot

は一致する。

- (5) アームの軸方向に作用する流体抗力は小さいものとして無視する。
- (6) 周囲の流体は静止している。
- (7) アームは円柱とし、本体は半径 b_0 、高さ H_0 の円盤とする。

2.2 流体力

流体中で物体が運動するとき、その物体には周囲の流体より反力を受ける。二次元運動の場合、この流体力は物体の移動加速度に比例した慣性力と物体の移動速度の二乗に比例した流体抗力の和で与えられる。

物体の移動加速度に比例する慣性力において、その比例定数を付加質量といい、完全流体中で物体が加速度運動する場合の速度ポテンシャルより求めることができる。例えば円柱物体であれば付加質量は物体が排除した流体の質量に等しく、球形物体であれば物体が排除した流体の質量の1/2に等しい。また、付加慣性モーメントはこの付加質量の回転中心に関する分布より計算される。このように付加質量の値は、運動方向に対する物体の形状に依存するためテンソルとしての扱いが必要となる。

一方、アームに作用する単位長さあたりの流体抗力及び関節回りの抗力モーメントは、それぞれ次式で与えられる。

$$d f_{ai} = \frac{\rho}{2} C_{Di} D_i |\dot{p}_i + \omega_i \times \hat{x}_i| (\dot{p}_i + \omega_i \times \hat{x}_i) dx_i \quad (1)$$

$$d t_{ai} = \frac{\rho}{2} C_{Di} D_i \hat{x}_i \times |\dot{p}_i + \omega_i \times \hat{x}_i| (\dot{p}_i + \omega_i \times \hat{x}_i) dx_i \quad (2)$$

ここで、 ρ , C_{Di} , D_i , $\hat{x}_i$ はそれぞれ流体密度、抗力係数、アームの直径及び各座標原点からアームの任意の位置までの位置ベクトルである。抗力係数は、レイノルズ数の関数であり、レイノルズ数が小さい場合、すなわち移動速度が非常に遅い場合はストークスの抵抗則によって理論的に求めることができるが、通常のマニピュレータの運動速度を考えた場合のレイノルズ数は比較的大きく、一般的には実験により求めることになる。代表的な形状に対する抗力係数の値は、例えば機械工学便覧[10]に示されている。

上式より、関節に作用する流体抗力及びそれによる抗力モーメントは上式をアームの全長に渡って積分することにより以下のように与えられる。

$$f_{ai} = \frac{\rho}{2} C_{Di} D_i \int_0^{l_i} |\dot{p}_i + \omega_i \times \hat{x}_i| (\dot{p}_i + \omega_i \times \hat{x}_i) dx_i$$

$$t_{ai} = \frac{\rho}{2} C_{Di} D_i \int_0^{l_i} \hat{x}_i \times |\dot{p}_i + \omega_i \times \hat{x}_i| (\dot{p}_i + \omega_i \times \hat{x}_i) dx_i$$

2.3 運動学方程式及び運動方程式

まず、慣性座標系 Σ_U から見た本体の重心の位置ベクトルを $r_0 = [X_0, Y_0, 0]^T$ とすると、各リンク座標系から見たリンク0の重心及び関節1, 2の速度、加速度、角速度及び角加速度はそれぞれ以下のように与えられる。

リンク0の重心;

$$\dot{p}_0 = ({}^U R_0)^T \dot{r}_0 \quad \ddot{p}_0 = ({}^U R_0)^T \ddot{r}_0$$

$$\omega_0 = [0, 0, \dot{\phi}_0]^T \quad \dot{\omega}_0 = [0, 0, \ddot{\phi}_0]^T$$

リンク1(関節1);

$$\dot{p}_1 = ({}^0 R_1)^T [\dot{p}_0 + \omega_0 \times \hat{b}_0]$$

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{p}}_1 &= ({}^0\mathbf{R}_1)^T [\dot{\mathbf{p}}_0 + \dot{\boldsymbol{\omega}}_0 \times \bar{\mathbf{b}}_0 + \boldsymbol{\omega}_0 \times (\boldsymbol{\omega}_0 \times \bar{\mathbf{b}}_0)] \\ \omega_1 &= [0, 0, \dot{\phi}_0 + \dot{\phi}_1]^T \quad \dot{\omega}_1 = [0, 0, \ddot{\phi}_0 + \ddot{\phi}_1]^T\end{aligned}$$

リンク 2 (関節 2) ;

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{p}}_2 &= ({}^1\mathbf{R}_2)^T [\dot{\mathbf{p}}_1 + \omega_1 \times \bar{\mathbf{l}}_1] \\ \dot{\mathbf{p}}_2 &= ({}^1\mathbf{R}_2)^T [\dot{\mathbf{p}}_1 + \dot{\boldsymbol{\omega}}_1 \times \bar{\mathbf{l}}_1 + \omega_1 \times (\omega_1 \times \bar{\mathbf{l}}_1)] \\ \omega_2 &= [0, 0, \dot{\phi}_0 + \dot{\phi}_1 + \dot{\phi}_2]^T \quad \dot{\omega}_2 = [0, 0, \ddot{\phi}_0 + \ddot{\phi}_1 + \ddot{\phi}_2]^T\end{aligned}$$

Fig. 1 において慣性座標系から見たハンドの位置ベクトル $\mathbf{E}$ を時間 t で微分して整理すると次式が得られる.

$$\dot{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{E}_y \end{bmatrix} = \mathbf{A} \begin{bmatrix} \dot{X}_0 \\ \dot{Y}_0 \end{bmatrix} + \mathbf{B} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_1 \\ \dot{\phi}_2 \end{bmatrix} = \mathbf{A}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\dot{\boldsymbol{\Phi}} \quad (3)$$

式(3)はハンドの移動速度と本体の位置・姿勢の速度及び関節角速度との関係を示す式である.

次に, 流体の付加質量及び付加慣性モーメントを含んだロボット全体の並進運動量及びリンク 0 の重心まわりの角運動量は次式で与えられる.

$$\mathbf{Q} = \sum_{i=0}^2 [{}^U\mathbf{R}_i(m_i\mathbf{I} + \mathbf{M}_{ai})\dot{\mathbf{s}}_i] \quad (4)$$

$$\mathbf{L} = \sum_{i=0}^2 (\mathbf{I}_i + \mathbf{I}_{ai})\omega_i + \sum_{i=1}^2 (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_0) \times [{}^U\mathbf{R}_i(m_i\mathbf{I} + \mathbf{M}_{ai})\dot{\mathbf{s}}_i] \quad (5)$$

ここで, $\mathbf{I}$ は単位行列であり, $\dot{\mathbf{s}}_i$ はリンク座標系から見た各リンクの重心位置の速度ベクトルで次式で与えられる.

$$\dot{\mathbf{s}}_i = \dot{\mathbf{p}}_i + \omega_i \times \bar{\mathbf{s}}_i$$

ただし, $\bar{\mathbf{s}}_i$ はリンク座標系の原点からリンク重心までの位置ベクトルである. これらの式に, 先に示した速度及び角速度を代入して, 整理すると次式を得る.

$$\begin{bmatrix} \dot{\mathbf{Q}} \\ \dot{\mathbf{L}} \end{bmatrix} = \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}} + \mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\Phi}} \quad (6)$$

宇宙空間においては, ロボット本体の位置及び姿勢を制御しない場合, ロボットに作用する外力は存在しないため, 上式で与えられた各運動量は保存されるが, 水中浮遊ロボットの場合にはマニピュレータの運動により先に示した流体抗力が外力として作用するために, 式(6)で与えられる各運動量は保存されない. そこで, 運動量の時間微分が系に作用する外力, すなわち流体抗力に等しいことから次式が得られる.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{L} \end{bmatrix} = [F_{Dx}, F_{Dy}, T_0]^T \quad (7)$$

ここで F_{Dx} , F_{Dy} は各リンクに作用する流体抗力の合力を慣性座標系で示したものであり, T_0 はリンク 0 の重心回りの流体抗力による合モーメントである. 式(7)の両辺を時間 $t=0$ から $t=t_n$ まで積分すると

$$\begin{aligned}\begin{bmatrix} \mathbf{Q} \\ \mathbf{L} \end{bmatrix}_{t=t_n} &= \mathbf{C}\dot{\mathbf{X}}_{t=t_n} + \mathbf{D}\dot{\boldsymbol{\Phi}}_{t=t_n} \\ &= \left[\int_0^{t_n} F_{Dx} dt, \int_0^{t_n} F_{Dy} dt, \int_0^{t_n} T_0 dt \right]^T\end{aligned} \quad (8)$$

となる. ただし $t=0$ における初期の並進運動量及び角運動量はそれぞれゼロとしている.

式(8)と先に求めた式(3)より本体の並進速度及び姿勢角速度を消去すると

$$\dot{\mathbf{E}} = \begin{bmatrix} \dot{E}_x \\ \dot{E}_y \end{bmatrix} = \mathbf{J}^* \boldsymbol{\Phi}_{t=t_n} + \mathbf{A}\mathbf{C}^{-1} \left[\int_0^{t_n} F_{Dx} dt, \int_0^{t_n} F_{Dy} dt, \int_0^{t_n} T_0 dt \right]^T \quad (9)$$

$$\text{ただし, } \mathbf{J}^* = \mathbf{B} - \mathbf{A}\mathbf{C}^{-1}\mathbf{D} \quad (10)$$

が得られる. ここで, $\mathbf{J}^*$ は流体抗力の項を無視し, 付加質量及び付加慣性モーメントを考慮した, いわゆる完全流体中における一般化ヤコビ行列である.

式(9)を $\dot{\boldsymbol{\Phi}}_{t=t_n}$ について解くことにより, 水中浮遊ロボットに対する分解速度法の制御則が次式で得られる.

$$\dot{\boldsymbol{\Phi}}_{t=t_n} = \mathbf{J}^{*-1} \dot{\mathbf{E}} - \mathbf{J}^{*-1} \mathbf{A}\mathbf{C}^{-1} \left[\int_0^{t_n} F_{Dx} dt, \int_0^{t_n} F_{Dy} dt, \int_0^{t_n} T_0 dt \right]^T \quad (11)$$

次に, Fig. 1 に示したモデルの運動方程式をニュートン・オイラー法により求める. まず, 各関節及びロボット本体の重心位置における力, モーメントのつり合いより

$${}^i\mathbf{f}_i = {}^i\mathbf{R}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1} + (m_i\mathbf{I} + \mathbf{M}_{ai})\dot{\mathbf{s}}_i + \mathbf{f}_{di} \quad (12)$$

$$\begin{aligned}{}^i\mathbf{n}_i &= {}^i\mathbf{R}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{n}_{i+1} + (\mathbf{I}_i + \mathbf{I}_{ai})\dot{\omega}_i + \omega_i \times (\mathbf{I}_i + \mathbf{I}_{ai})\omega_i \\ &\quad + \bar{\mathbf{s}}_i \times (m_i\mathbf{I} + \mathbf{M}_{ai})\dot{\mathbf{s}}_i + \bar{\mathbf{l}}_i \times ({}^i\mathbf{R}_{i+1} {}^{i+1}\mathbf{f}_{i+1}) + \mathbf{t}_{di}\end{aligned} \quad (13)$$

が得られる. ここで, $\dot{\mathbf{s}}_i$ は各リンク座標系におけるリンク重心の加速度ベクトルであり次式で与えられる.

$$\dot{\mathbf{s}}_i = \dot{\mathbf{p}}_i + \omega_i \times \bar{\mathbf{s}}_i + \omega_i (\omega_i \times \bar{\mathbf{s}}_i)$$

上式において, ロボット本体には流体抗力以外の外力が作用しないこと, また各関節に作用するトルクはアクチュエータの駆動トルクに等しいとして, ロボット本体の変位, 姿勢角及び各関節の角変位を変数とした運動方程式が得られる.

3. 作業領域

浮遊ロボットに関する作業領域について, 吉田らは無拘束作業領域には「最大到達領域」, 「直線経路到達領域」及び「到達保証領域」の三つの領域に分類できると提案しており[6], 宇宙ロボットのように運動量が保存される場合は「最大到達領域」及び「到達保証領域」は簡単に求められる. 一方, 水中浮遊ロボットの場合は, マニピュレータの運動によりシステム全体の運動量は保存されず, 流体とのエネルギーの授受があるために, アクチュエータへのエネルギーの供給があるかぎりマニピュレータの運動によってロボット本体をどこまでも移動させることが可能である. その意味においては, マニピュレータの最大到達距離は無限大であり, 水中浮遊ロボットの大きな特徴である. しかしながら, 実際の水中の作業においては, そのような流体の影響を積極的に利用した作業は少なく, 通常地上ロボットと同じようにロボット本体を静止させた状態でマニピュレータを用いた検査あるいは物体の把持等の作業を行わせることが多いと考えられる. この場合でも, ロボットの運動は流体の影響を受動的に受ける. したがって, 作業領域に対する流体の影響を明らかにすることは, 水中浮遊ロボットの設計において必要である. そこで本論文では, 作業領域内に障害や特別な制約がない場合のハンドの経路として最も合理的と考えられる「直線経路到達領域」について検討を行う.

3.1 計算条件及び計算方法

Fig. 1 に示した水中浮遊ロボットの作業領域についての計算を Table 1 に示す条件で行った. ハンドの移動速度は, $v=0.5$ [m/s] とした. 作業領域の計算は, ハンドの移動直線軌道を設定し, 式(11)で与えられる分解速度法を用いて計算を行う.

3.2 作業領域の計算結果

浮遊ロボットの作業領域（直線経路到達距離）は、ロボットの初期姿勢に依存しているため、すべての初期状態において数値シミュレーションを行う必要がある。例として、 $\phi_0=0^\circ$, $\phi_1=-60^\circ$, $\phi_2=120^\circ$ を初期姿勢とした場合の作業領域の計算結果を以下に示す。Fig. 2(a), (b)はハンドの設定軌道に対して、上記の方法でシミュレーションを行った場合の、ロボットの運動を示したもので、ロボット本体の回転による影響を見るために、それぞれ抵抗板がない場合とある場合の結果である。なお、図では本体の姿勢変化がわかりやすいように、本体の形状を矩形で示した。これらの結果より、ハンドは設定した軌道に対し精度よく追従しており、式(11)で与えられる分解速度法

Table 1 Model Parameters

	Vehicle	Manipulator	
	Link 0	Link 1	Link 2
Mass m_i , [kg]	200	40	40
Moment of Inertia I_i [kgm ²]	200	30	30
b_0 [m]	1.5		
I_i [m]		2.0	2.0
Added Mass m_{ai} [kg]	289(345)	26	26
Added Inertia I_{ai} [kgm ²]	0(160)	8.6	8.6

() is the value contained with Fin

(a) Motion of Robot without Fin

(b) Motion of Robot with Fin

Fig. 2

は水中浮遊ロボットの軌道制御に有効である。また、浮遊ロボットのハンドの到達限界は、2リンクマニピュレータの特異点のひとつである $\phi_2=0^\circ$ のときに生じており、その到達限界はそのときのロボット本体の姿勢角に大きく依存している。このような計算をすべての方向について計算してハンドの到達限界を調べていくと Fig. 3(a)に示すような作業領域が得られる。この結果より、宇宙ロボットに比べ、抵抗板のない水中ロボットの作業領域は、計算したすべての方向で同等かもしくは少し狭くなっている。これは、同じ移動速度でマニピュレータを運動させた場合、宇宙に比べ水中の方が大きな関節駆動トルクを必要とするが、ロボット本体の形状を円盤としたため、その回転に対する流体抵抗がほとんど無視でき、本体の回転抵抗は宇宙と変わらないためである。したがって、ロボット本体に抵抗板をつけた場合は、本体の回転抵抗が大きいため宇宙ロボットよりも広い作業領域が得られる。またリンク1、リンク2の質量及び慣性モーメントは変えないで、本体の質量を1000[kg]、慣性モーメントを1000[kgm²]とした場合の作業領域の計算結果を Fig. 3(b)に示す。当然のことながら、本体の質量あるいは慣性モーメントを大きくすると、作業領域は台座が固定された地上マニピュレータの作業領域に近づく。このように、浮遊ロボットの作業領域はロボット本体とマニピュレータの質量及び慣性モーメントの比によって大きく変わってくる。さらに、水中浮遊ロボットの場合は、付加質量及び流体抗

(a) Calculation result of Work Space
($m_0=200$ [kg], $I_0=200$ [kgm²])

(b) Calculation result of Work Space
($m_0=1,000$ [kg], $I_0=1,000$ [kgm²])

Fig. 3

Fig. 4 Calculation result of Work Space
($v=1.0[\text{m/s}]$, $m_0=200[\text{kg}]$, $I_0=200[\text{kgm}^2]$)

力といった流体反力が存在するため、ロボット本体及びマニピュレータの形状によっても変わり、ここで示したように本体に抵抗板を取り付けることによって作業領域を広げることが可能となる。

一方、流体抗力の影響により、水中浮遊ロボットの作業領域はマニピュレータの移動速度に大きく影響されることが予想される。そこで、ロボット本体に抵抗板を取付けた場合で、ハンドの移動速度を $1.0[\text{m/s}]$ としたときの作業領域の計算結果を Fig. 4 に示す。この結果より、本論文で用いたモデルの作業領域においては、マニピュレータの移動速度は各アクチュエータの駆動トルクには大きく影響するが、作業領域に対してはほとんど影響を与えない。ただし、実際には抗力係数はレイノルズ数の関数であったり、また三次元の場合には、流体抗力のほかに揚力あるいはカルマン渦の影響等を受けたりするので、実際の作業領域は速度の影響をより受けやすくなることも考えられる。

4. 動的可操作性

作業領域のほかに、マニピュレータの性能を客観的に評価する指標のひとつに可操作性あるいは可操作度があり、これらは関節角速度とハンドの移動速度の関係を示したものである。この可操作性あるいは可操作度は、台座が固定された地上のマニピュレータの場合はヤコビ行列より求めることができ、宇宙ロボットにおいても、式(10)で流体の付加質量及び付加慣性モーメントをゼロとした一般化ヤコビ行列を用いることによって、地上のマニピュレータと同様に求めることができる[6]。一方、水中浮遊ロボットの場合には、式(9)で示されるように流体抗力の項があるために一般化ヤコビ行列だけでマニピュレータの可操作性を評価することができない。

可操作性あるいは可操作度の概念は運動学的なものであり、動力学的な要素は全く入っていないため、アクチュエータの駆動トルクを含めたマニピュレータの詳細設計を行う場合には不十分である。そこで、この動力学的な要素を取り入れて定量化した概念として、吉川らによって定義された動的可操作性(Dynamic Manipulability)あるいは動的可操作度(Dynamic Manipulability Measure; DMM)がある[9]。これは関節駆

動トルクとハンドの移動加速度の関係を示したもので、運動方程式を用いて以下のように検討することができる。

4.1 浮遊ロボットの動的可操作性の基礎理論

ハンドの移動速度は、式(3)を用いて以下のように書き換えられる。

$$\begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix}$$

ここで、上式をさらに時間 t で微分すると、

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dot{A} & \dot{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (14)$$

が得られる。一方、式(12)、(13)に示した水中浮遊ロボットの運動方程式は以下のように変形できる。

$$M \begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} + b(X, \dot{X}, \phi, \dot{\phi}) + F(X, \dot{X}, \phi, \dot{\phi}) = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで、

M ; 付加質量、付加慣性モーメントを含んだ慣性行列

$b(X, \dot{X}, \phi, \dot{\phi})$; 遠心力、コリオリ力を表す項

$F(X, \dot{X}, \phi, \dot{\phi})$; 流体抗力、抗力モーメントを表す項

τ ; 関節トルク

式(14)、(15)より $[\ddot{X}, \ddot{\phi}]^T$ を消去すると次式が得られる。

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ A & B \end{bmatrix} M^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dot{A} & \dot{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} I & 0 \\ A & B \end{bmatrix} M^{-1} \{b(X, \dot{X}, \phi, \dot{\phi}) + F(X, \dot{X}, \phi, \dot{\phi})\} \quad (16)$$

ここで

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{\tau} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \tau \end{bmatrix} - \{b(X, \dot{X}, \phi, \dot{\phi}) + F(X, \dot{X}, \phi, \dot{\phi})\} + M \begin{bmatrix} I & 0 \\ A & B \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ \dot{A} & \dot{B} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{X} \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} \quad (17)$$

とおくと

$$\begin{bmatrix} \ddot{X} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I & 0 \\ A & B \end{bmatrix} M^{-1} \begin{bmatrix} 0 \\ \ddot{\tau} \end{bmatrix} \quad (18)$$

が得られる。この式を用いて、関節駆動トルクとハンドの加速度に関する動的可操作性を評価することができる。ここで慣性行列 M は

$$M = \begin{bmatrix} M_a & M_b \\ M_c & M_d \end{bmatrix} \quad (19)$$

のように部分行列で表され、それぞれ

M_a ; マニピュレータを固定した場合のロボット本体の慣性行列

M_d ; ロボット本体の変位が固定された場合のマニピュレータの慣性行列

M_b, M_c ; マニピュレータとロボット本体の動力学的干渉を表す慣性行列

を表している。したがって、その逆行列 M^{-1} は次のように表される。

$$M^{-1} = \begin{bmatrix} M_a^{-1} + M_a^{-1} M_b S^{-1} M_c M_a^{-1} & -M_a^{-1} M_b S^{-1} \\ -S^{-1} M_c M_a^{-1} & S^{-1} \end{bmatrix} \quad (20)$$

ただし、 $S = M_d - M_c M_a^{-1} M_b$

上式と式(18)より、ハンドの移動加速と関節駆動トルクの関係

は

$$\ddot{\mathbf{E}} = (-\mathbf{A}\mathbf{M}_a^{-1}\mathbf{M}_b\mathbf{S}^{-1} + \mathbf{B}\mathbf{S}^{-1})\ddot{\mathbf{r}} \quad (21)$$

で与えられる。ロボット本体の質量及び慣性モーメントを無限大にすると $\mathbf{M}_a^{-1} \rightarrow \mathbf{0}$ となり、上式は

$$\ddot{\mathbf{E}} = \mathbf{B}\mathbf{M}_a^{-1}\ddot{\mathbf{r}} \quad (22)$$

となり、台座が固定された地上マニピュレータの場合と同じ結果になる。

式(21)あるいは式(22)において、 $\|\ddot{\mathbf{r}}\| \leq 1$ を満たすような関節駆動トルクを用いて実現できるハンドの移動加速度のすべての集合を考えると、一般的には楕円体となりこれを『動的可操作楕円体』と言う。

動的可操作性を検討する際の最も基本的な場合として、ロボットが静止している状態における地上マニピュレータの動的可操作性が吉川らによって検討されている[9]。本論文においても、その結果と比較するために静止状態における水中浮遊ロボ

ットの動的可操作について以下に検討する。この場合は式(17)の右辺第2項のコリオリ力と遠心力、第3項の流体抗力及び第4項はすべてゼロとなる。しかしながら、水中浮遊ロボットのように流体抗力の影響が大きく、それが無視できない場合には、流体抗力を考慮した動的可操作性を求めない限り、水中浮遊ロボットに搭載されるマニピュレータの性能を厳密に評価することは困難である。最終的には、流体抗力を考慮した動的可操作性を定義することが必要であるが、その場合、地上マニピュレータで定義されている動的可操作性をさらに拡張したものが必要となる。

4.2 水中及び宇宙ロボットの動的可操作性

マニピュレータの姿勢を変化させて式(21)を用いて計算した動的可操作の結果を宇宙ロボットの場合を Fig. 5(a), 水中ロボットで抵抗板のない場合を Fig. 5(b)にそれぞれ示す。ロボットの諸元は作業領域の場合と同じである。ただし、最大関節駆動トルクの比を $\tau_1/\tau_2=3$ とした。抵抗板をつけた場合の動

(a) Dynamic Manipulability Ellipsoid
(In Space, $m_0=200$, $I_0=200$, $\tau_1/\tau_2=3$)

(a) Dynamic Manipulability Ellipsoid
(In Space, $m_0=1000$, $I_0=1000$, $\tau_1/\tau_2=3$)

(b) Dynamic Manipulability Ellipsoid
(In Water, $m_0=1000$, $I_0=1000$, $\tau_1/\tau_2=3$)

Fig. 5

Fig. 6

動的可操作性については、抵抗板がない場合とほとんど同じ傾向であったためその結果は省略する。また、本体の質量及び慣性モーメントのみをそれぞれ $1000[\text{kg}]$, $1000[\text{kgm}^2]$ とした場合についての計算結果を Fig. 6(a), (b) に宇宙及び水中の場合についてそれぞれ示す。

これらの結果より、浮遊ロボットの動的可操作性の傾向は水中でも宇宙でもほぼ同じであり、ハンドの位置がロボット本体に近いほど、また遠くなるほど悪くなる。この傾向は $\theta=30^\circ$, 60° のとき、特に顕著である。また、本体の質量及び慣性モーメントを大きくしても、先に示した作業領域ほどの顕著な変化は見られない。

次に、ハンドの位置に対する動的可操作性の変化を見るために、関節 1 とハンドの距離 l_a を横軸に、動的可操作度 (DMM) を縦軸にとった場合の結果を Fig. 7, Fig. 8 に本体の質量及び慣性モーメントを変えた場合についてそれぞれ示す。図中の θ は Fig. 5 に示すように慣性座標系の X 軸との角度を示す。また、図中の動的可操作度は式 (22) で求めた地上マニピュレータの動的可操作度の最大値で正規化した値である。地上マニピュレータの動的可操作度は 2 リンクマニピュレータの場合、関節 1 の回転角には依存しない。これらの結果より、宇宙ロボットの動的可操作度は初期姿勢によっては地上ロボットよりも大きくなる場合があることが示されている。また、ロボット本体の

Fig. 7 Dynamic Manipulability Measure

Fig. 8 Dynamic Manipulability Measure

Fig. 9 Relation between the position of the hand and the rotation of the vehicle

Fig. 10 Relation between the position of the hand and the rotation of the vehicle

質量及び慣性モーメントを大きくすると、宇宙ロボットのDDMは地上マニピュレータのそれに近づき、動的可操作度の分布も平滑化される。そこで、宇宙ロボットの動的可操作度が地上ロボットよりも大きくなる理由を以下に考察する。

吉川[9]の報告によると、2リンクの地上マニピュレータの場合の動的可操作度が最大となる最適姿勢は、関節2の回転角度が 90° のときである。そこでまず、地上マニピュレータよりも動的可操作度が大きくなる場合として、 $\theta=0^\circ$ でハンドの位置が関節1から遠い場合及び $\theta=120^\circ$ でハンドの位置が近い場合についてみると、 $\tau_1 + \tau_2 \geq 0$ の場合はマニピュレータからの反力でロボット本体はFig. 9に示す方向に回転するが、その回転の方向はマニピュレータからみると関節2の回転角が先の最適姿勢に近づくような方向である。逆に、 $\tau_1 + \tau_2 \leq 0$ の場合は、本体の回転方向は図の方向と逆になるが、例えば $\theta=120^\circ$ の場合は本体の回転による関節1の移動方向はハンドの移動方向と同じである。したがって、全体として地上マニピュレータよりも動的可操作度が大きくなるものと考えられる。一方、地上マニピュレータよりも小さくなる場合として、 $\theta=0^\circ$ でハンドの位置が関節1から近い場合および $\theta=120^\circ$ でハンドの位置が遠い場合についてみると、 $\tau_1 + \tau_2 \geq 0$ の場合は、ロボット本体はFig. 10に示すような方向に回転するが、 $\theta=0^\circ$ では回転による関節1の移動方向とハンドの移動方向が逆であり、 $\theta=120^\circ$ では最適姿勢から遠ざかる方向である。逆に $\tau_1 + \tau_2 \leq 0$ の場合は、本体の回転は逆方向となるが、これによる関節1の移動方向は、 $\theta=0^\circ$ ではハンドの移動方向と逆となる。その結果、全体として地上マニピュレータよりも動的可操作度が小さくなるものと考えられる。このように、浮遊ロボットに搭載されたマニピュレータの動的可操作度はマニピュレータとロボット本体の動的干渉、特に本体の回転の影響によって地上マニピュレータよりも大きくなる姿勢と小さくなる姿勢が存在する。特に、本体及びマニピュレータの質量、慣性モーメントの比が小さい場合は、その影響が大きくなるため、実際の

設計にあたっては十分な検討が必要である。

本論文で定義した水中浮遊ロボットの動的可操作性には流体抗力の影響が入っていないため、その傾向は宇宙ロボットとほとんど同じであるが、周囲の流体の付加質量及び付加慣性モーメントの影響により、宇宙ロボットに比べどの姿勢においてもその動的可操作度は小さくなる。したがって、水中浮遊ロボットの場合は、マニピュレータの形状を付加質量がなるべく小さくなるようにすることがその動的可操作性の向上のために有効となる。また、水中浮遊ロボットの場合、本体の慣性モーメントが小さい場合でも周囲の流体による付加慣性モーメントを大きくするような形状にすることによって、動的可操作度を平滑化することができる。このように、水中浮遊ロボットに搭載されたマニピュレータの動的可操作性は、宇宙ロボットと異なり、システム全体の質量、慣性モーメントのバランスのみで評価することができず、それらの形状まで考慮した検討が必要となる。

5. 結 言

以上、本論文ではマニピュレータの基本性能を評価するための指標である、水中浮遊ロボットの作業領域及び動的可操作性について検討を行った。

付加質量及び付加慣性モーメントを考慮した一般化ヤコビ行列を求め、さらにシステム全体に作用する流体抗力を外力とみなして時間積分した形でハンドの移動速度と関節角速度の運動学方程式を導き、これを用いて水中浮遊ロボットに搭載されたマニピュレータの軌道制御のための分解速度法を導いた。その制御則を用いて、マニピュレータの作業領域（直線経路到達領域）を計算した。この結果、ロボット本体の回転に対する流体抵抗が小さい場合は、水中浮遊ロボットの作業領域は宇宙ロボットに比べて若干狭くなること、またロボット本体に流体抵抗を大きくする抵抗板を取り付けることにより、作業領域を宇宙ロボットよりも広くできることが確認された。また、マニピュレータの移動速度による作業領域への影響は今回のモデルではほとんどないことが確認された。ただし、実際には抗力係数はレイノルズ数の関数であったり、また三次元の場合には、流体抗力のほかに揚力あるいはカルマン渦の影響等を受けたりするので、実際の作業領域は速度の影響をより受けやすくなることも考えられる。これについては今後の課題としたい。

次に、マニピュレータの操作性を示す指標のひとつである動的可操作性を水中浮遊ロボットに適用し宇宙ロボット、地上ロボットと比較した。その結果、水中浮遊ロボットの動的可操作性は宇宙ロボットの場合とほぼ同じ傾向であるが、動的可操作度は流体の付加質量、付加慣性モーメントの存在により、宇宙ロボットよりも小さくなることが明らかにされた。また、浮遊ロボットの動的可操作度は、マニピュレータとロボット本体の動的干渉により、マニピュレータの姿勢によっては地上ロボットよりも大きくなる場合があることが示された。しかしながら、本論文で定義した動的可操作性は流体抗力の影響が考慮されていないものであることから、さらに厳密に検討するためにはその影響が考慮できる拡張した動的可操作性を定義することが必要となる。

参 考 文 献

- [1] 五百井, 伊藤: “水中マニピュレータのモデリングとシミュレーション”, 日本ロボット学会誌, 6-2, pp.160-168, 1989.
- [2] 福田, 原: “水中ロボットマニピュレータの運動制御”, 日本機械学会論文集 (C) 編, 54-507, pp.2702-2706, 1988.
- [3] 川島, 下郷: “浮遊式水中アームの位置決め制御”, 日本機械学会論文集 (C) 編, 58-552, pp.2586-2592, 1992.
- [4] 小菅, 奥田, 福田, 新井: “水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系の制御”, 日本機械学会ロボティクス/メカトロニクス講演会 '92 講演論文集 (vol. B), pp.229-232.
- [5] Z.Vafa and S.Dubowsky: “On the Dynamics of Manipulators in Space Using the Virtual Manipulator Approach,” Proc. 1987 IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.579-585, 1987.
- [6] 梅谷, 吉田, “宇宙用マニピュレータの作業領域および可操作性解析”, 計測自動制御学会論文集, 26-2, pp.188-195, 1990.
- [7] 吉田: “宇宙ロボットの運動制御”, 機械の研究, 43-1, pp.183-190, 1991.
- [8] 梅谷, 吉田: “一般化ヤコビ行列を用いた宇宙用ロボットマニピュレータの分解速度制御”, 日本ロボット学会誌, 7-4, pp.327-337, 1989.
- [9] 吉川: “ロボットアームの動的可操作性”, 計測自動制御学会論文集, 21-9, pp.970-975, 1985.
- [10] 日本機械学会編: “機械工学便覧”, A 3-121, 1987.

足達康行 (Yasuyuki Adachi)

1953年6月8日生. 1978年慶應義塾大学大学院(機械工学)修士課程修了. 同年(株)東京久栄入社. 現在, 慶應義塾大学大学院後期博士課程在学中. 水中浮遊ロボットに関する研究に従事. 日本機械学会会員. (日本ロボット学会正会員)

吉田和夫 (Kazuo Yoshida)

1949年9月22日生. 1978年慶應義塾大学博士課程修了, 工学博士. 主に柔軟な構造物及びアームの制御, 振動制御の研究に従事. 現在, 慶應義塾大学理工学部機械工学科教授. 日本機械学会, 計測自動制御学会, 建築学会などの会員. (日本ロボット学会正会員)