水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系の制御*

小 菅 一 弘^{*1}, 奥 田 実^{*2}, 大久保 秀明^{*2}
福 田 敏 男^{*1}, 新 井 史 人^{*1}

Control of Manipulator/Vehicle System on Water

Kazuhiro KOSUGE, Minoru OKUDA, Hideaki OHKUBO,
Toshio FUKUDA and Fumihito ARAI

The manipulator/vehicle system floating on water consists of a vehicle and a manipulator attached to it. Similar to the space manipulator/vehicle system, the system on water is not fixed to an inertial coordinate system. Moreover, the external forces affect the motion of the system, and the interaction of motions among the vehicle, the manipulator and water causes vibration of the system. This paper discusses the control issues of a manipulator/vehicle system floating on water and proposes an algorithm to control both the endpoint trajectory of the manipulator and the vibration of the vehicle simultaneously using redundant actuators. We develop the basic kinematic equations and then derive the equation, which describes the dynamic relation between the system and the external forces/moments applied to it, then propose a simultaneous control algorithm of the manipulator endpoint trajectory and the vibration of the vehicle. Simulation results illustrate the effectiveness of the proposed control algorithm.

Key Words: Robotics, Manipulator/Vehicle System, Redundant Actuator, Dynamic Control, Trajectory Control, Vibration Control, Nonlinear Feedback Control

1. は じ め に

近年,さまざまな環境下でロボットが利用されるようになってきた。本論文では,船舶の整備などのアプリケーションを想定し,水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系(図1)を提案し,その制御について考える。水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系は,宇宙マニピュレータと同様,ビークルが慣性座標系に固定されていないため,マニピュレータの反力の影響をビークルが受け,マニピュレータが運動すると,ビークルも運動してしまう。宇宙マニピュレータの制御問題に関する研究は数多くなされており,マニピュレータの運動によるビークルの反動の影響をいかに取除き,慣性座標系でのマニピュレータのエンド・エフェクタの軌道を制御するかという問題が議論されてきた^{(1)~(5)}。

水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系では,さらに,重力および浮力などの外力がシステムに働くことになり,特に,浮力はビークルの位置および姿勢

に依存する。例えば,システムの重心と浮心が一致しないと回転モーメントがシステムに働き,システムは傾くことになるが,システムが傾くと,今度はビークルには復元モーメントが働くので,システムは回転振動をすることになる。並進運動を考えてみても,鉛直方向は,ビークルの位置によって浮力が変化するので振動し,水平方向は,ビークルの運動に伴う水からの抵抗が,システムへの回転モーメントとして働くことになる。

水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系では,このように,宇宙マニピュレータとは異なるさまざまな複雑な外力の影響を受け,マニピュレータとビークルと外力の動的な相互干渉を,いかに制御するかということが問題となる。そこで,本論文では,水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系の制御問題について議論し,静水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系におけるマニピュレータのエンド・エフェクタの軌道制御問題について考える。なお,マニピュレータの質量が,ビークルの質量に比べて十分小さければ,マニピュレータの運動がビークルに与える影響は無視できるが,それは現実的ではないし,宇宙マニピュレータのように,ビークルの反動の影響を考えてエンド・エフェクタの軌道を制御することも可能ではあるが,

* 原稿受付 平成3年10月25日。

^{*1} 正員,名古屋大学工学部(〒464-01 名古屋市中千区不老町1)。^{*2} 学生員,名古屋大学大学院。

ビークルの姿勢が大きく変化すると、ビークルが転覆する危険もあるため、こうした制御方法は好ましくない。

本論文では、まず、水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系の運動方程式を求め、冗長アクチュエータを用いて、マニピュレータのエンド・エフェクタの軌道とシステム全体の振動とを同時に制御するアルゴリズムを提案する。そして、簡単なシミュレーションで、提案するアルゴリズムの有効性を説明する。

2. 冗長アクチュエータを用いた制御

本論文で取扱う、水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系の概念図を図1に示す。本システムは、水上に浮遊するビークルと、その上に取付けられているマニピュレータから構成され、マニピュレータの各関節は、それぞれ独立のアクチュエータで駆動されるとする。本システムは水上に浮遊しているために、マニピュレータが駆動すると、その反力がビークルに加わり、ビークルは振動することになる。この振動は、エンド・エフェクタの軌道制御を行う際に、大きな障害となるため、ビークルの振動を制御する必要がある。

ビークルの振動を制御する一つの方法に、冗長マニピュレータを用いることが考えられる。この場合、6自由度の振動を制御するには、6自由度の冗長自由度が必要である。Burdickが指摘しているように、冗長自由度を有するマニピュレータには無数の解が存在するが、それらは、共通要素を持たない有限個の有界で連続な Self-motion マニホールドにグルーピングされる⁽¹⁰⁾。したがって、マニピュレータのエンド・エフェクタがある位置と姿勢を保ったままで可能なマニピュレータの連続的な Self-motion は、現在そのマニピュレータが属している一つの Self-motion マニホールド上に限られるので、冗長性を有するマニピュレータの解は無数に存在するが、実際の運動はかなり制限を受けることになる。システムの振動を、一つの Self-motion マニホールド上の Self-motion だけで制御で

図1 水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系

きるかどうかはわからない。そこで、本論文では、冗長マニピュレータではなく、マニピュレータとは別の冗長なアクチュエータで振動を制御することを考える。いろいろなアクチュエータが考えられるが、議論を簡単にするため、ここでは、一種のアクティブ・マス・ダンパとリアクション・ホイールを使用し、システムを制御することを考える。アクティブ・マス・ダンパ系は、ビークルに取付けられているとし、質点が、ビークルの中を自由に移動できると仮定する。また、リアクション・ホイール系は、ビークルの重心に取付けられているとする。

3. 水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系のモデリング

図2に示すように、本システムのマニピュレータは n 自由度を有し、各リンクは剛体であるとする。ビークルも含めて考えると、マニピュレータ/ビークル系は、 $n+1$ 個の剛体からなるシステムで、ビークルから順に番号を付け、ビークルを第0剛体、ビークルに接続されるリンクを第1剛体とし、エンド・エフェクタを第 n 剛体とする。座標系としては、慣性座標系、ビークルの重心を原点とするビークルの重心座標系、各リンクに Denavit-Hartenberg の方法⁽⁴⁾ で定義するリンク座標系を考える。システムに外力が働く宇宙マニピュレータのモデリングについては Longman⁽⁴⁾ や Nakamura⁽⁵⁾ らが考察しており、本論文でも、彼らと同様の方法を用いてモデル化する。すなわち、まず、系の運動量を計算し、その時間微分が、システムに加わる外力に等しいことを利用し、システムの外力に対する運動方程式を求めることにする。

3.1 マニピュレータ/ビークル系の運動量 マニピュレータ/ビークル系の並進運動量 P と、角運動量

図2 座標系

L は次式 (付録参照) で表せる.

$$\begin{bmatrix} P \\ L \end{bmatrix} = [H_1, H_2] \begin{bmatrix} \dot{q}_v \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (1)$$

ただし,

q_v : ビークルの重心の位置と姿勢を慣性座標系で記述したベクトル $q_v = [r_0^T, \theta_0^T]^T$

q_m : $q_m = [q_1, \dots, q_n]^T$ は, リンクの関節座標ベクトル

H_1, H_2 : マニピュレータとビークルの質量と慣性テンソルで表される行列

3.2 冗長アクチュエータの運動量

3.2.1 アクティブ・マス・ダンパ系の運動量

アクティブ・マス・ダンパ系を図3に示す. 質点が, ビークルの中を自由に動くこのシステムの並進運動量 P_1 と角運動量 L_1 は, 次式で計算できる.

$$P_1 = m_a \dot{r}_a \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$L_1 = I_a \omega_0 + r_a \times m_a \dot{r}_a \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\dot{r}_a = \dot{r}_0 + \omega_0 \times q_a + R_v \dot{q}_a = S_a \dot{q}_v + R_v \dot{q}_a \quad \dots\dots (4)$$

$$S_a = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & q_{a3} & -q_{a2} \\ 0 & 1 & 0 & -q_{a3} & 0 & q_{a1} \\ 0 & 0 & 1 & q_{a2} & -q_{a1} & 0 \end{bmatrix} \quad \dots\dots (5)$$

ここで,

m_a : 移動質点の質量

r_a : 慣性座標系で記述した, 慣性座標系から見た質点の重心の位置ベクトル

I_a : 慣性座標系で記述した移動質量の重心回りの慣性行列

q_a : 慣性座標系で記述した, ビークル座標系から見た移動質点の位置ベクトル

式(2), (3)を書き直すと,

$$\begin{bmatrix} P_1 \\ L_1 \end{bmatrix} = [H_{a1}, H_{a2}] \begin{bmatrix} \dot{q}_v \\ \dot{q}_a \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (6)$$

$$H_{a1} = \begin{bmatrix} m_a S_a \\ [0, I_a] + m_a R_a S_a \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (7)$$

$$H_{a2} = \begin{bmatrix} m_a R_v \\ m_a R_a R_v \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (8)$$

3.2.2 リアクション・ホイールの運動量

ビーク

ルの重心に取付けられたリアクション・ホイールシステムの並進運動量 P_2 と角運動量 L_3 は, 次式で表せる.

$$P_2 = m_r \dot{r}_0 = m_r S_0 \dot{q}_v \quad \dots\dots\dots (9)$$

$$L_2 = I_r (\omega_0 + \dot{q}_r) + r_0 \times m_r \dot{r}_0 \\ = [m_r R_0, I_r] \dot{q}_v + I_r \dot{q}_r \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし,

m_r : リアクション・ホイール・システムの質量

I_r : 慣性座標系で記述した, リアクション・ホイール・システムの慣性行列

$\dot{q}_r$: リアクション・ホイール・システムの角速度ベクトル

式(9), (10)を書き直すと,

$$\begin{bmatrix} P_2 \\ L_2 \end{bmatrix} = [H_{r1}, H_{r2}] \begin{bmatrix} \dot{q}_v \\ \dot{q}_r \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (11)$$

$$H_{r1} = \begin{bmatrix} m_r S_0 \\ [m_r R_0, I_r] \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (12)$$

$$H_{r2} = \begin{bmatrix} 0 \\ I_r \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (13)$$

3.3 水面上でのシステムの運動方程式

式(1), (6), (11)を用いると, 冗長アクチュエータを持つマニピュレータ/ビークル系の運動量は,

$$\begin{bmatrix} P^* \\ L^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P + P_1 + P_2 \\ L + L_1 + L_2 \end{bmatrix} = [H_1^*, H_2^*, H_3^*, H_4^*] \begin{bmatrix} \dot{q}_v \\ \dot{q}_m \\ \dot{q}_a \\ \dot{q}_r \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots (14)$$

$$H_1^* = H_1 + H_{a1} + H_{r1} \quad \dots\dots\dots (15)$$

$$H_2^* = H_2 \quad \dots\dots\dots (16)$$

$$H_3^* = H_{a2} \quad \dots\dots\dots (17)$$

$$H_4^* = H_{r2} \quad \dots\dots\dots (18)$$

となる. 式(14)を時間に関して微分すると, システム全体に働く外力である u に等しくなるから,

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} P^* \\ L^* \end{bmatrix} = u \quad \dots\dots\dots (19)$$

となる. 式(19)を計算すると, 次式を得る.

$$H_1^* \dot{q}_v + H_2^* \dot{q}_m + H_3^* \dot{q}_a + H_4^* \dot{q}_r + \dot{H}_1^* q_v \\ + \dot{H}_2^* q_m + \dot{H}_3^* q_a + \dot{H}_4^* q_r = u \quad \dots\dots\dots (20)$$

式(20)は, 水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系の運動の拘束条件を記述している.

次に, 系全体に働く外力 u について考える. 外力としては, 重力, 浮力, ビークルと水との間に働く摩擦力があり, これらの外力によって, 系全体の重心回りにモーメントが生じる. また, 空気抵抗と風の影響は無視できるとする.

系に働く重力とそのモーメント u_g は, 次のように

図3 アクティブ・マス・ダンパ系

求められる。

$$\mathbf{u}_g = \sum_{i=0}^n \left(m_i \begin{bmatrix} \mathbf{g} \\ 0 \end{bmatrix} \right) \dots\dots\dots (21)$$

ここで、 $\mathbf{g}$ は 3×1 の重力加速度ベクトルである。また重心の定義により、重力による系の重心回りのモーメントは零であることに注意したい。

ビークルに働く浮力は、ビークルの排水容積に比例する。排水容積と浮心は、ビークルの形状がわかれば、ビークルの位置と姿勢によって計算できるので、浮力とそのモーメント $\mathbf{u}_b$ は次のように計算できる。

$$\mathbf{u}_b = \begin{bmatrix} \rho g v_b(\mathbf{q}_v) \\ \{ \mathbf{r}_b(\mathbf{q}_v) - \mathbf{r}_c \} \times \rho g v_b(\mathbf{q}_v) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (22)$$

ここで、

ρ : 水の密度

$v_b(\mathbf{q}_v)$: ビークルの排水容積

$\mathbf{r}_b(\mathbf{q}_v)$: 慣性座標系で記述したビークルの浮心の位置ベクトル

$\mathbf{r}_c$: 慣性座標系で記述した、系全体の重心の位置ベクトルで、次のように求められる。

$$\mathbf{r}_c = \left(\sum_{i=0}^n m_i \mathbf{r}_i \right) / \sum_{i=0}^n m_i \dots\dots\dots (23)$$

ビークルと水との間の摩擦力は、ビークルの並進速度の二乗と浸水表面積に比例する⁽¹¹⁾。ビークルの形状がわかれば、浸水表面積はビークルの位置と姿勢で計算できる。また、摩擦力の中心が浮心に働くとすれば、摩擦力による系全体の重心回りのモーメントは計算できる。これらにより、系全体に働く摩擦力とそのモーメント $\mathbf{u}_f$ は、次のように求められる。

$$\mathbf{u}_f = \begin{bmatrix} -\frac{1}{2} \rho c_f \dot{\mathbf{r}}_0^2 s_f(\mathbf{q}_v) \\ -\{ \mathbf{r}_b(\mathbf{q}_v) - \mathbf{r}_c \} \times \frac{1}{2} \rho c_f \dot{\mathbf{r}}_0^2 s_f(\mathbf{q}_v) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (24)$$

ここで、

c_f : 摩擦抵抗係数

$s_f(\mathbf{q}_v)$: ビークルの浸水表面積

式(21), (22), (24)から、系全体に働く外力/モーメント $\mathbf{u}$ は次のようになる。

$$\mathbf{u} = \mathbf{u}_g + \mathbf{u}_b + \mathbf{u}_f \dots\dots\dots (25)$$

4. 制御アルゴリズム

本章では、マニピュレータのエンド・エフェクタの軌道とシステムの振動を同時に制御する問題を考える。振動を制御するには、システムの動特性を考える必要があり、本章では、分解加速度制御⁽⁹⁾の考え方に基づく制御アルゴリズムを提案する。

分解加速度制御では、まず、エンド・エフェクタの軌

道が、目標軌道に収束するように、エンド・エフェクタの加速度を設計し、続いて、エンド・エフェクタが設計された加速度で運動するように、その加速度を分解してマニピュレータの各アクチュエータの加速度を求め、マニピュレータの動特性に基づいて、求めた加速度が発生するように、各アクチュエータへの入力を計算するものである。マニピュレータが慣性座標系に固定されていなくても、アクチュエータへの入力はマニピュレータのベースの加速度を用いて、Newton-Euler法で計算できる⁽⁹⁾。したがって、本章では、マニピュレータの軌道が目標軌道に収束し、かつ、ビークルの振動が漸近安定となるような、マニピュレータの各関節の加速度ならびに冗長アクチュエータの加速度を求める問題のみを考えることにする。

マニピュレータのエンド・エフェクタの軌道が、慣性座標系で $\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}_d(t)$ と与えられるとしよう。まず、エンド・エフェクタが、与えられた軌道を追従するように、エンド・エフェクタの加速度を、文献(8)と同様に、次式のように設計することにする。

$$\ddot{\mathbf{x}} = \boldsymbol{\alpha} \dots\dots\dots (26)$$

$$\boldsymbol{\alpha} = \ddot{\mathbf{x}}_d + \mathbf{K}_1(\dot{\mathbf{x}}_d - \dot{\mathbf{x}}) + \mathbf{K}_2(\mathbf{x}_d - \mathbf{x}) \dots\dots\dots (27)$$

ここで、 $\mathbf{K}_1$ と $\mathbf{K}_2$ はゲイン行列である。ビークルの振動は、ビークルの加速度を次式を満足するように制御すれば、安定化することができる。

$$\ddot{\mathbf{q}}_v = \boldsymbol{\beta} \dots\dots\dots (28)$$

$$\boldsymbol{\beta} = -\mathbf{K}_3 \dot{\mathbf{q}}_v - \mathbf{K}_4 \mathbf{q}_v \dots\dots\dots (29)$$

ここで、 $\mathbf{K}_3$ と $\mathbf{K}_4$ はゲイン行列である。式(28)を式(20)に代入し書き直すと、

$$\begin{bmatrix} \mathbf{H}_2^* & \mathbf{H}_3^* & \mathbf{H}_4^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{q}}_m \\ \ddot{\mathbf{q}}_a \\ \ddot{\mathbf{q}}_r \end{bmatrix} = \mathbf{u} - \mathbf{H}_1^* \boldsymbol{\beta} - (\dot{\mathbf{H}}_1^* \dot{\mathbf{q}}_v + \dot{\mathbf{H}}_2^* \dot{\mathbf{q}}_m + \dot{\mathbf{H}}_3^* \dot{\mathbf{q}}_a + \dot{\mathbf{H}}_4^* \dot{\mathbf{q}}_r) \dots\dots\dots (30)$$

となる。

いま、エンド・エフェクタの位置と姿勢が、慣性座標系の中で、

$$\mathbf{x} = \mathbf{h}(\mathbf{q}_v, \mathbf{q}_m) \dots\dots\dots (31)$$

で与えられるとする。式(31)を時間に関して2階微分すると、

$$\ddot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}_v \ddot{\mathbf{q}}_v + \mathbf{J}_m \ddot{\mathbf{q}}_m + \dot{\mathbf{J}}_v \dot{\mathbf{q}}_v + \dot{\mathbf{J}}_m \dot{\mathbf{q}}_m \dots\dots\dots (32)$$

$$\mathbf{J}_v = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{q}_v} \dots\dots\dots (33)$$

$$\mathbf{J}_m = \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial \mathbf{q}_m} \dots\dots\dots (34)$$

の関係を得る。式(26), (28)を式(32)に代入し書き直すと、

$$[J_m, 0, 0] \begin{bmatrix} \ddot{q}_m \\ \ddot{q}_a \\ \ddot{q}_r \end{bmatrix} = \alpha - J_v \beta - \dot{J}_v \dot{q}_v - \dot{J}_m \dot{q}_m \cdots (35)$$

となり、式(30)と式(35)をまとめると

$$\begin{bmatrix} H_2^* & H_3^* & H_4^* \\ J_m & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{q}_m \\ \ddot{q}_a \\ \ddot{q}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} u - H_1^* \beta - (\dot{H}_1^* \dot{q}_v + \dot{H}_2^* \dot{q}_m + \dot{H}_3^* \dot{q}_a + \dot{H}_4^* \dot{q}_r) \\ \alpha - J_v \beta - \dot{J}_v \dot{q}_v - \dot{J}_m \dot{q}_m \\ \cdots \cdots \cdots \end{bmatrix} \quad (36)$$

と書ける。マニピュレータ自体は冗長自由度を持たない、すなわち $n=6$ と仮定し、また、一般性を失うことなく $\text{rank } J_m=6$ と仮定すると、式(36)の左辺の係数行列は正則行列となり、エンド・エフェクタの軌道を制御し、かつ系全体の振動を安定化するためのマニピュレータの関節座標の加速度ならびに、冗長アクチュエータの加速度は、

$$\begin{bmatrix} \ddot{q}_m \\ \ddot{q}_a \\ \ddot{q}_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H_2^* & H_3^* & H_4^* \\ J_m & 0 & 0 \end{bmatrix}^{-1} \cdot \begin{bmatrix} u - H_1^* \beta - (\dot{H}_1^* \dot{q}_v + \dot{H}_2^* \dot{q}_m + \dot{H}_3^* \dot{q}_a + \dot{H}_4^* \dot{q}_r) \\ \alpha - J_v \beta - \dot{J}_v \dot{q}_v - \dot{J}_m \dot{q}_m \\ \cdots \cdots \cdots \end{bmatrix} \quad (37)$$

で与えられることがわかる。マニピュレータの各関節への入力ならびに冗長アクチュエータへの入力は、Newton-Euler法で計算できる⁽⁹⁾。制御系の構成を図4に示す。なお、本章では簡単なPD制御系を考えたが、制御系の性質は、式(26)と式(28)で与えられる α 、 β の設計で決まるので、本章の方法を用いているいろいろな制御系を実現することができる。

5. シミュレーション

提案した制御アルゴリズムの有効性を説明するため、簡単な二次元モデルを用いてシミュレーションを行った。すなわち、2自由度の平面マニピュレータと、静水上に浮遊するビークルからなるシステムにおいて、マニピュレータの先端の位置を制御する問題を考える。慣性座標系は、水平に平行な方向に x 軸、鉛直方向に y 軸を考え、紙面の裏から表に向かう方向に z 軸を考え、マニピュレータ/ビークル系は、 x - y 平面内の並進運動ならびに z 軸回りの回転運動を行うものとした。

また、ビークルおよび各リンクは長方形で、その重心は長方形の図心にあるとした。また、マニピュレータの目標軌道と実際の位置・姿勢は、初期時刻 $t=0$ では一致しているとする。また、ビークルの目標位置は、

$t=0$ のときの実際の位置と一致しているとし、浮心と重心が一致していない初期条件を与えるために、ビークルの初期姿勢は10度で、目標姿勢は0度とした。表1に、シミュレーションに用いたシステムのパラメータを、図5に、シミュレーションモデルを示す。

図6、7に、シミュレーション結果を示す。図6は、ビークルの振動を制御しないで、マニピュレータの軌道制御のみを行った場合であり、図7は、提案した制御を行った場合である。図6では、ビークルが振動しているために、エンド・エフェクタが目標軌道に収束していない。図7では、ビークルの位置と姿勢が安定に制御されていることによって、エンド・エフェクタが目標軌道に収束しているのがわかる。

図8は、アクティブ・ダンパの x 座標、 y 座標の軌跡を示している。図9は、リアクション・ホイールの角運動量を示している。このとき、必要最大トルクは約 $200 \text{ N}\cdot\text{m}$ であった。これは、リアクション・ホイールの性能範囲内と考えられるが、マニピュレータをさらに速く動作させる場合には、より大きいリアクション・ホイールを用いる必要がある。

6. 結 論

水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系は、宇宙マニピュレータと同様、慣性座標系に固定されていないので、マニピュレータの運動によって生ずる反力により、ビークルも運動してしまう。さらにこのシステムは、宇宙マニピュレータと異なり、重力、浮力などのさまざまな外力が働き、特に浮力はビークルの位置・姿勢によって変化するため、ビークルと水との間

表1 システム・パラメータ

	mass (kg)	moment of inertia (kgm ²)
link 1	70	2.5
link 2	70	2.5
vehicle	350	58.3
mass damper	350	-
reaction wheel	50	6.0

図4 制御系のブロック線図

に動的な干渉が生じ、マニピュレータの運動によって、システムの振動を誘発する。慣性座標系でのマニピュレータのエンド・エフェクタの軌道制御とともに、この動的な干渉をいかに制御するかが、水上に浮遊するマニピュレータ/ビークル系の制御問題である。

本論文では、システムの運動方程式を導出し、分解加速度制御の考え方に基づいた、マニピュレータの軌道とビークルの振動を同時に制御する制御アルゴリズムを提案した。そして簡単なシミュレーションで、その制御則の有効性を検討した。本論文では、ビークルの振動を制御するために、アクティブ・マス・ダンパと

図 5 シミュレーション・モデル

図 6 軌道制御のみを行ったシミュレーション結果

図 7 軌道制御と振動制御を行ったシミュレーション結果

(a) アクティブ・マス・ダンパの x 座標

(b) アクティブ・マス・ダンパの y 座標

図 8 アクティブ・マス・ダンパの位置

図 9 リアクション・ホイールの角速度

リアクション・ホイールをアクチュエータとして用いたが、これらのアクチュエータは、吸収可能な運動量が限られており、実際にシステムを構成するときには、ほかのアクチュエータとの併用などを考える必要がある。なお、本論文で提案した制御アルゴリズムは、ほかのアクチュエータを用いた場合にも容易に適用できる。

付 録

マニピュレータ/ビークル系の並進運動量 P と角運動量 L は、次式で計算できる。

$$P = \sum_{i=0}^n (m_i \dot{r}_i) \quad (38)$$

$$L = \sum_{i=0}^n (I_i \omega_i + r_i \times m_i \dot{r}_i) \quad (39)$$

m_i : 第 i リンクの質量

r_i : 慣性座標系で記述した、慣性座標系の原点から見た第 i リンクの重心の位置ベクトル

ω_i : 慣性座標系に関する、第 i リンクの角速度ベクトル

I_i : 第 i リンクの重心回りの慣性行列

$$\dot{r}_i = \dot{r}_0 + \omega_0 \times s_i + R_v J_i \dot{q}_m \quad (40)$$

$$\omega_i = \omega_0 + \sum_{j=1}^i t_j \dot{q}_j z_j \quad (41)$$

z_i : 第 i リンク座標系の z 軸を慣性座標系で記述したもの

t_i : 直動関節の場合には零で、回転関節の場合には 1 の値を持つ定数

s_i : ビークル座標系の原点から見た第 i 座標系の原点の位置ベクトルを慣性座標系で表したものの

$\bar{s}_i$: s_i をビークル座標系で表したもの $\bar{s}_0 = 0$

R_v : ビークル座標系で記述されたベクトルを、座標軸が慣性座標系と平行で、原点がビークル座標系と同一の座標系に変換する回転行列

$$J_i = \left[\frac{\partial \bar{s}_i}{\partial q_{m1}}, \dots, \frac{\partial \bar{s}_i}{\partial q_{mn}}, 0, \dots, 0 \right] \quad (42)$$

式(40), (41)を書き直すと次式ようになる。

$$\dot{r}_i = S_i \dot{q}_v + R_v J_i \dot{q}_m \quad (43)$$

$$S_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & s_{i3} & -s_{i2} \\ 0 & 1 & 0 & -s_{i3} & 0 & s_{i1} \\ 0 & 0 & 1 & s_{i2} & -s_{i1} & 0 \end{bmatrix} \quad (44)$$

$$\dot{q}_v = [\dot{r}_0^T, \omega_0^T]^T \quad (45)$$

$$\omega_i = \omega_0 + Z_i \dot{q}_m \quad (46)$$

$$Z_i = [z_i, \dots, z_i, 0, \dots, 0]^T \quad (47)$$

$$T = \text{diag.}(t_1, \dots, t_n) \quad (48)$$

である。式(43)と式(46)を式(38)と式(39)に代入すると、

$$P = \left(\sum_{i=0}^n m_i S_i \right) \dot{q}_v + \left(\sum_{i=1}^n m_i R_v J_i \right) \dot{q}_m \quad (49)$$

$$L = \left\{ \left[0, \sum_{i=0}^n I_i \right] + \left(\sum_{i=0}^n m_i R_i S_i \right) \right\} \dot{q}_v + \left\{ \sum_{i=0}^n (I_i Z_i + m_i R_i R_v J_i) \right\} \dot{q}_m \quad (50)$$

$$R_i = \begin{bmatrix} 0 & -r_{i3} & r_{i2} \\ r_{i3} & 0 & -r_{i1} \\ -r_{i2} & r_{i1} & 0 \end{bmatrix} \quad (51)$$

となる。式(49), (50)をひとまとめにすると、マニピュレータ/ビークル系の運動量は次式で表せる。

$$\begin{bmatrix} P \\ L \end{bmatrix} = [H_1, H_2] \begin{bmatrix} \dot{q}_v \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} \quad (52)$$

$$H_1 = \begin{bmatrix} \sum_{i=0}^n m_i S_i \\ \left[0, \sum_{i=0}^n I_i \right] + \left(\sum_{i=0}^n m_i R_i S_i \right) \end{bmatrix} \quad (53)$$

$$H_2 = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n m_i R_v J_i \\ \sum_{i=0}^n (I_i Z_i + m_i R_i R_v J_i) \end{bmatrix} \quad (54)$$

文 献

- (1) Umetani, Y. and Yoshida, K., Continuous Path Control of Space Manipulators Mounted on OMV, *Acta Astronautica*, 15-12(1987), 981-986.
- (2) Yoshida, K., Control of Space Robotic Manipulators, *Ph. D Dissertation in Mechanical Engineering Science*, (1990), 15-93, Tokyo Institute of Technology.
- (3) Vafa, Z. and Dubowsky, S., On the Dynamics of Manipulators in Space Using the Virtual Manipulator

- Approach, *Proceedings of 1987 IEEE Int. Conf. Robotics Autom.*, (1987), 579-585.
- (4) Longman, R. W., Lindberg, R. E. and Zadd, M. F., Satellite - Mounted Robot Manipulators - New Kinematics and Reaction Moment Compensation, *Int. J. Robotics Res.*, **6**-3(1987), 87-103.
- (5) Nakamura, Y. and Mukherjee, R., Nonholonomic Path Planning of Space Robots, *Proc. 1989 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, (1989), 1050-1055.
- (6) Denavit, J. and Hartenberg, R. S., A Kinematic Notation for Lower Pair Mechanisms Based on Matrices, *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, **22**(1955), 215-221.
- (7) Whitney, D. E., The Mathematics of Coordinated Control of Prosthetic Arms and Manipulators, *Trans. ASME, J. Dyn. Syst., Meas. Control*, **94**-4(1972), 303-309.
- (8) Luh, J. Y. S., Walker, M. W. and Paul, R. P., Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators, *IEEE Trans. Autom. Control*, **25**-3(1980), 468-474.
- (9) Luh, J. Y. S., Walker, M. W. and Paul R. P., On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulator, *Trans. ASME, J. Dyn. Syst., Meas. Control*, **102**-2(1980), 69-76.
- (10) Burdick, J. W., On the inverse kinematics of redundant manipulators: Characterization of the self-motion manifolds, *Proc. 1989 IEEE Int. Conference on Robotics and Automation*, (1989), 264-270.
- (11) 古屋・村上・山田, 流体工学, (1986), 193, 朝倉書店.