複数のマニピュレータによる物体の協調的操り*

杉江 俊治**・隈下 恭介***・小野 敏郎****

Coordinative Manipulation by Multiple Manipulators*

Toshiharu SUGIE**, Kyosuke KUMASHITA*** and Toshiro ONO****

This paper is concerned with a coordinative manipulation problem by multiple robot manipulators in the three dimensional space. First, taking account of not only the dynamics of manipulators but also the dynamics of object motion, we derive a basic equation of a coordinative manipulation system by three manipulators in the three dimensional space, which is a suitable form for designing a position control system. Second, based on this equation, a positioning servo system is designed which achieves the desired command response and has some robustness to cope with the modeling error. Also, a potential is introduced to achieve a firm grasp. Finally, a simulation result is given to show the validity of our method.

1. はじめに

近年ロボットは様々な分野で活躍するようになったが、それに伴い、より高度な機能がロボットに対して要求されるようになった。ことに従来より用いられているロボットは、塗装ロボットなどに代表されるように1本のマニピュレータであったが、生産ラインの組立工程や、原子炉内、深海などにおける極限作業にロボットを用いるために、1つの対象物体に対し複数のマニピュレータを協調させて操りを行なうことが必要となった。また、ロボットハンドに目を向けてみると、これも多指により物体を操ることが要求されているが、本質的には上記の問題と同様の問題である。

物体の操りに関しては従来より数多くの研究がなされてきているが¹⁻⁴、多くの場合、マニピュレータの先端位置を制御し、その結果として物体を制御しており、制御入力に物体の質量・慣性モーメントなどは考慮されて

いない。ところが物体を把持したままそれを操る場合には、マニピュレータは、物体の動きに矛盾なく先端を移動させるとともに、対象物体が所望の運動をするのに必要な力を加える必要がある。そのため、正確に素速い動きで物体を操るためには単なるマニピュレータの位置制御では不十分であり、対象物体の運動を考慮にいれて操り制御を行なうことが必要となる。

対象物体の運動を考慮にいれた操りに関しては、最近では、中村らの操りの定式化に基づくコンプライアンス制御や⁵、古田らの力フィードバックを用いた制御の研究がある⁶。これらの研究では物体の操りを力制御で実現する立場に立っているが、一般に力制御は位置制御に比べて高精度の制御は困難である。また操りとは、物体の位置、姿勢を制御するのが目的であるから、対象物体の位置制御系として操りを行なうのが合理的であると思われる。このため、安定かつ正確な操りを実現するには、対象物体と複数のマニピュレータから成る操り系を位置制御系の設計に適した形式で定式化し、かつモデル化誤差を吸収できる操り制御法を確立する必要がある。

先に筆者らは、このような考えに基づいて操り制御について考察したが⁷、そこでは物体の運動は2次元平面内に限定されており、制御則も複雑なものであった。本論文ではこれを3次元空間内の操りに拡張し、3本のマニピュレータによる物体の操りを対象とした操り系の記述と、その制御についての考察を行なう。まず、対象物

* 原稿受付 1987. 12. 25

** 京都大学 工学部 Automation Research Laboratory, Kyoto University : Uji, Kyoto 611, JAPAN

*** ㈱東芝 Toshiba Ltd. : Minatoku, Tokyo 105, JAPAN

**** 大阪府立大学 工学部 Department of Mechanical Engineering, University of Osaka Prefecture : Sakai, Osaka 591, JAPAN

Key Words : robot manipulator, robot hand, coordinative manipulation, position control, coordinative control.

体の運動を考慮にいれて、操り制御を行なうためのシステム全体の運動方程式を導出する。次にこの基礎方程式に基づいて、モデル化誤差に対してロバストな制御系を設計し、最後にシミュレーションによって本制御法の妥当性を検討する。

2. 運動方程式

本章では、対象物体の運動を考慮にいれた上で、3本の多自由度マニピュレータによる物体の操り問題を定式化する。なお、以下の話を進めていく上で次の仮定を設けることにする。

- (1) 対象物体とマニピュレータとの接触は摩擦のある点接触である。
- (2) 物体上のマニピュレータとの接触点の位置は、物体固定座標からみて移動しない。

2.1 基礎方程式

一般に、物体の運動方程式は次のように書くことができる。

$$F = m_o(\ddot{\phi}_G - g) \quad (1)$$

$$n_G = I_G \dot{\omega} + \dot{I}_G \omega \quad (2)$$

ここで、 F ：物体に加わる合力

n_G ：物体に加わる重心回りの合成モーメント

m_o ：物体の質量

I_G ：物体の重心回りの慣性テンソル

ϕ_G ：物体の重心の位置ベクトル

ω ：物体の回転角速度

g ：重力加速度を表わすベクトル

である。ここでは3本のマニピュレータによる物体の操りについて考えているので、 F は各マニピュレータが接触点で物体に加える力 f_i により、

$$F = \sum_{i=1}^3 f_i$$

と表わすことができる。なお本論文を通じて、ベクトルは、特に断わりのない限り基準座標系に関するものである。次にマニピュレータシステムの運動方程式は、物体に力を加えることを考えると

$$M_P(\theta)\ddot{\theta} + B_P(\theta, \dot{\theta})\dot{\theta} + G_P(\theta) + J_P^T f = \tau \quad (3)$$

と書くことができる。ここで、

$$M_P = \begin{bmatrix} M_1 & 0 & 0 \\ 0 & M_2 & 0 \\ 0 & 0 & M_3 \end{bmatrix} \quad B_P = \begin{bmatrix} B_1 & 0 & 0 \\ 0 & B_2 & 0 \\ 0 & 0 & B_3 \end{bmatrix}$$

$$G_P = \begin{bmatrix} G_1 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix} \quad \theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix} \quad \tau = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix}$$

$$J_P = \begin{bmatrix} J_1 & 0 & 0 \\ 0 & J_2 & 0 \\ 0 & 0 & J_3 \end{bmatrix} \quad f = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix}$$

M_i ： i 番目のマニピュレータの慣性行列

B_i ： i 番目のマニピュレータの遠心力およびコリオリ力の項を表わす行列

G_i ： i 番目のマニピュレータの重力項を表わすベクトル

θ_i ： i 番目のマニピュレータの関節角ベクトル

τ_i ： i 番目のマニピュレータの入力トルク

J_i ： i 番目のマニピュレータの基準座標系に関するヤコビ行列

である。ただし、 $(\cdot)^T$ は行列の転置を表わす。これら(1)～(3)式を連立させて考えることにより、対象物体とマニピュレータとを合わせた操りシステム全体の運動を表わすことができる。すなわち、(1)～(3)式が操り系の運動方程式を導出する上での基礎方程式である。

2.2 対象物体の運動方程式

前節の物体の運動方程式(2)において、姿勢に関する変数として ω が用いられているが、この場合姿勢を表わす量は $\int \omega dt$ となり、その物理的な意味が理解しにくい。そこでFig.1に示すようなベクトル h_a, h_b を考え、これらによって物体の姿勢を表わすことを考える。このベクトル h_a, h_b を所望の姿勢を表わすベクトルに一致するように制御することにより、物体の姿勢を制御するだけでなく、指先間距離をも制御することができる。次に制御系設計の立場からすると、物体の運動方程式も直接制御できる関節角 θ を変数とする式に変換する必要がある。そこで以下では、まず変数を関節角 θ に統一しやすいように、重心に関して記述されている運動方程式(1)、(2)を3つの接触点の幾何学的重心 P (後述の(12)式参照)についての方程式に書き直し(step 1)、次に姿勢を表わす変数をベクトル h として($h = [h_a^T; h_b^T]^T$)書きかえ(step 2)、最後に関節角ベクトル θ に関する方程式に変換する(step 3)。

(step 1)

いま、原点が物体の重心に一致し、その X 軸、 Y 軸の向きがベクトル h_a, h_b の向きと一致するような物体固定座標系を考える(Fig.1参照)。この時、基準座標系から物体固定座標系への変換行列を A 、 P 点の位置ベクトルを ϕ_P 、物体固定座標系で表わした重心から P 点に至るベクトルを ϕ_G とすると、 ϕ_G は

$$\phi_G = \phi_P - A\zeta$$

と表わすことができる。ここで、 A は

Fig. 1 Coordinate system

$$A = \left[\frac{h_a}{\|h_a\|} : \frac{h_b}{\|h_b\|} : \frac{1}{\|h_a\|\|h_b\|} (h_a \times h_b) \right]$$

である。なお、 $\times$ は外積を表わし、 $\|\cdot\|$ はベクトルの2乗ノルムを表わす。 ζ は明らかに不変であるから、これより

$$\ddot{\phi}_G = \ddot{\phi}_P - \ddot{A}\zeta \quad (4)$$

を得る。いま、 $h_a = [h_{ax} h_{ay} h_{az}]^T$, $h_b = [h_{bx} h_{by} h_{bz}]^T$, $\zeta = [\zeta_x \zeta_y \zeta_z]^T$ とし、仮定(2)より $\|h_a\|$, $\|h_b\|$ が不変であることを考慮にいと

$$\ddot{A}\zeta = Z\ddot{h} + \dot{Z}\dot{h} \quad (5)$$

と整理することができる。ただし Z は

$$Z = \begin{bmatrix} \frac{\zeta_x}{\|h_a\|} & \frac{\zeta_z h_{bz}}{\|h_a\|\|h_b\|} & \frac{-\zeta_z h_{by}}{\|h_a\|\|h_b\|} \\ \frac{-\zeta_z h_{bz}}{\|h_a\|\|h_b\|} & \frac{\zeta_x}{\|h_a\|} & \frac{\zeta_z h_{bx}}{\|h_a\|\|h_b\|} \\ \frac{\zeta_z h_{by}}{\|h_a\|\|h_b\|} & \frac{-\zeta_z h_{bx}}{\|h_a\|\|h_b\|} & \frac{\zeta_x}{\|h_a\|} \\ \frac{\zeta_y}{\|h_b\|} & \frac{-\zeta_z h_{az}}{\|h_a\|\|h_b\|} & \frac{\zeta_z h_{ay}}{\|h_a\|\|h_b\|} \\ \frac{\zeta_z h_{az}}{\|h_a\|\|h_b\|} & \frac{\zeta_y}{\|h_b\|} & \frac{-\zeta_z h_{ax}}{\|h_a\|\|h_b\|} \\ \frac{-\zeta_z h_{ay}}{\|h_a\|\|h_b\|} & \frac{\zeta_z h_{ax}}{\|h_a\|\|h_b\|} & \frac{\zeta_y}{\|h_b\|} \end{bmatrix}$$

である。したがって、(4), (5)式より、重心に関する物体の運動方程式(1), (2)は、次のように P 点に関する運動方程式に書き直すことができる。

$$F = m_O(\ddot{\phi}_P - Z\ddot{h} - \dot{Z}\dot{h} - g) \quad (6)$$

$$n_P = I_P \dot{\omega} + \dot{I}_P \omega \quad (7)$$

ただし、 n_P : 物体に加わる P 点回りのモーメント

I_P : 物体の P 点回りの慣性テンソル

である。

(step 2)

姿勢を表わすベクトル h_a , h_b と回転角速度 ω との間には、 $\dot{h}_a = \omega \times h_a$, $\dot{h}_b = \omega \times h_b$ なる関係が成り立つ。したがって、

$$Y = [Y_A^T : Y_B^T]^T$$

$$Y_A = \begin{bmatrix} 0 & h_{az} & -h_{ay} \\ -h_{az} & 0 & h_{ax} \\ h_{ay} & -h_{ax} & 0 \end{bmatrix}$$

$$Y_B = \begin{bmatrix} 0 & h_{bz} & -h_{by} \\ -h_{bz} & 0 & h_{bx} \\ h_{by} & -h_{bx} & 0 \end{bmatrix}$$

とすると

$$\dot{h} = Y\omega$$

となる。これより、

$$\omega = Y^* \dot{h} \quad \text{ただし } Y^* = (Y^T Y)^{-1} Y^T \quad (8)$$

が得られる。同様に

$$\ddot{h} = Y\dot{\omega} + Y\dot{\omega} \quad \text{より}$$

$$\dot{\omega} = Y^*(\ddot{h} - \dot{Y}Y^*\dot{h}) \quad (9)$$

である。(8), (9)式を(7)式に代入すれば、回転の運動方程式は次のように書ける。

$$n_P = I_P Y^*(\ddot{h} - \dot{Y}Y^*\dot{h}) + \dot{I}_P Y^*\dot{h} \quad (10)$$

この式と並進の運動方程式(6)をまとめると、姿勢をベクトル h で表わした次式のような運動方程式が得られる。

$$M_m \begin{bmatrix} \ddot{\phi}_P \\ \ddot{h} \end{bmatrix} + B_m \begin{bmatrix} \dot{\phi}_P \\ \dot{h} \end{bmatrix} - G_m = Wf \quad (11)$$

ただし

$$M_m = \begin{bmatrix} m_0 E_3 & -m_0 Z \\ 0 & I_P Y^* \end{bmatrix}$$

$$B_m = \begin{bmatrix} 0 & -m_0 \dot{Z} \\ 0 & \dot{I}_P Y^* - I_P Y^* \dot{Y} Y^* \end{bmatrix}$$

$$G_m = \begin{bmatrix} m_0 g \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$W = \begin{bmatrix} E_3 & E_3 & E_3 \\ P_1 & P_2 & P_3 \end{bmatrix}$$

$$P_i = \begin{bmatrix} 0 & -p_{iz} & p_{iy} \\ p_{iz} & 0 & -p_{ix} \\ -p_{iy} & p_{ix} & 0 \end{bmatrix}$$

$$p_i (= [p_{ix} \ p_{iy} \ p_{iz}]^T) = \eta_i - \phi_P$$

η_i : i 番目のマニピュレータと物体との接触点の位置ベクトル

である。ここで、 E_3 は 3×3 の単位行列を示す。なお対象物体の P 点回りの慣性テンソル I_P は物体固定座標に関して記述された P 点回りの慣性テンソル I_{OP} と座標変換行列 A により、

$$I_P = A I_{OP} A^T$$

によって計算することができる⁸。

(step 3)

ベクトル h は、1 番目のマニピュレータと物体との接触点から 2, 3 番目のマニピュレータと物体との接触点に至るベクトルをそれぞれ η_{12} , η_{13} とすると

$$h = \begin{bmatrix} E_3 & 0 \\ -\frac{(\eta_{12} \cdot \eta_{13})}{\|\eta_{12}\|^2} E_3 & E_3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \eta_{12} \\ \eta_{13} \end{bmatrix}$$

と表わすことができる。ただし、 $(\alpha \cdot \beta)$ は、ベクトル α とベクトル β の内積を表わす。 ϕ_P , η_{12} , η_{13} は

$$\phi_P = \sum_{i=1}^3 \eta_i / 3 \quad (12)$$

$$\eta_{12} = \eta_2 - \eta_1 \quad (13)$$

$$\eta_{13} = \eta_3 - \eta_1 \quad (14)$$

であるから、よく知られている $\dot{\eta}_i = J_i \dot{\theta}_i$ なる関係を用いると

$$T_m = \begin{bmatrix} E_3 & 0 & 0 \\ 0 & E_3 & 0 \\ 0 & -\frac{(\eta_{12} \cdot \eta_{13})}{\|\eta_{12}\|^2} E_3 & E_3 \end{bmatrix}$$

$$J_m = \begin{bmatrix} J_1/3 & J_2/3 & J_3/3 \\ -J_1 & J_2 & 0 \\ -J_1 & 0 & J_3 \end{bmatrix}$$

とすると、結局物体の運動方程式は次のように書ける。

$$M_m T_m J_m \ddot{\theta} + (M_m T_m \dot{J}_m + B_m T_m J_m) \dot{\theta} - G_m = W f \quad (15)$$

2.3 操りシステムの定式化

(15) 式は一般に次式のように解くことができる。

$$f = W^* \{ M_m T_m J_m \ddot{\theta} + (M_m T_m \dot{J}_m + B_m T_m J_m) \dot{\theta} - G_m \} + (E_3 - W^* W) y$$

ここで、 $y (\in R^{9 \times 1})$ は任意ベクトルである。式中、右辺第 2 項は物体の運動に関係しない内力を表わす項で、マニピュレータによる把握力にあたる。そこで、この右辺第 2 項を新たに f_g とおき、上式を (3) 式に代入すれば、システム全体の運動方程式は次式のように得られる。

$$M \ddot{\theta} + B \dot{\theta} + G + J_P^T f_g = \tau \quad (16)$$

ここで、 M , B , G はそれぞれ

$$M = M_P + J_P^T W^* M_m T_m J_m$$

$$B = B_P + J_P^T W^* (M_m T_m \dot{J}_m + B_m T_m J_m)$$

$$G = G_P - J_P^T W^* G_m$$

である。この (16) 式が、対象物体の運動を考慮にいたった場合の操りシステムの運動方程式である。

3. 制御法

本章では、2. で導出した操りシステムの運動方程式に基づいて制御について考える。ここで (16) 式の f_g は物体の運動には関与しないので、ここでは入力 τ を対象物体の位置、姿勢の制御のための入力 τ_P と内力 f_g を出すための入力 τ_f とに分けて考える。

3.1 物体の位置、姿勢の制御

物体の位置および姿勢の制御に関しては、制御対象および制御量はそれぞれ

$$M \ddot{\theta} + B \dot{\theta} + G = \tau_P \quad (17)$$

$$\phi = [\phi_P^T : h^T]^T \quad (18)$$

で記述される。ここではまず、(17), (18) 式を非線形補償によって線形化し、得られた線形系に対して線形補償器を設計することにする。

θ と ϕ との間には

$$\dot{\phi} = T_m J_m \dot{\theta} \quad (19)$$

$$\ddot{\phi} = T_m J_m \ddot{\theta} + T_m \dot{J}_m \dot{\theta} \quad (20)$$

なる関係が成り立つので、これに注意して、入力 τ_P を新しい入力 u により

$$\tau_P = M (T_m J_m)^* (u - T_m \dot{J}_m \dot{\theta}) + B \dot{\theta} + G \quad (21)$$

と定めると、次式のような線形系が得られる。

$$\ddot{\phi} = u \quad (22)$$

これに対して2自由度制御系を利用して、目標値応答とロバスト性の分離設計の観点から線形補償器を設計する⁹。簡単のため、①目標値応答に関しては、 ϕ をその目標値 ϕ_d に遅れることなく追従させ（すなわち、 ϕ_d から ϕ までの伝達関数を単位行列とする）、②ロバスト性に関しては、PD制御でモデル化誤差を吸収することとすると、入力 u は

$$u = \ddot{\phi}_d + K_1(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + K_2(\phi_d - \phi) \quad (23)$$

となる（これはLuhらの加速度分解法¹⁰に対応したものである）。この時、線形化された制御系のロバスト性を計る尺度となる感度関数、相補感度関数は

$$S = (I + (K_1 s + K_2) / s^2)^{-1}$$

$$T = I - S$$

で与えられる⁹。よって、これらの尺度を基礎として、 K_1, K_2 を定めればよい。なおここでは簡単のために(23)式のような制御則にしたが、より一般的な制御則については文献9)を参照されたい。

以上をまとめると、入力 τ_p は(21)、(23)式より定まり、そのブロック線図はFig.2のようになる。これは、文献7)で用いた制御系に比較して簡単な構造であり、計算量も少なくなっている。

3.2 内力の制御

3.1で述べたように、 τ_p は物体の位置および姿勢を制御するが、各マニピュレータが物体に加える力 f_i が物体の内側を向いているという保証はない。しかしながらマニピュレータは物体を引っ張ることはできないので、 f_i は物体の内側を向いていなければならない。そこで、把握力 f_g として、物体の運動には何ら影響を与えず、なおかつ f_i が、物体の内側を向くような力を与える必要がある。そのためには、おのおのの接触点から3つの接触点の幾何学的重心 P に向かうような力を把握力とすればよい。そこで(24)式で記述されるような、接触点が P 点と一致するときに最小となる U を把握のため

のポテンシャルとして考える。

$$U = \sum_{i=1}^3 C \|\phi_P - \eta_i\|^2 \quad (24)$$

(C は把握力の大きさを決める設計パラメータ)

このポテンシャル U を用いれば、把握力 f_g は

$$f_g = \begin{bmatrix} -\partial U / \partial \eta_1 \\ -\partial U / \partial \eta_2 \\ -\partial U / \partial \eta_3 \end{bmatrix} \quad (25)$$

となり、 P 点からの距離に比例した大きさで、 P 点に向かう方向の力を把握力とすることになるので、パラメータ C を大きく選べば把握力は先に述べた条件を満たす。結局、入力 τ_f は(24)、(25)式を用いて、次式のように計算することができる。

$$\tau_f = J_P^T f_g$$

3.1, 3.2の結果を用いて、操りシステムへの入力 τ を

$$\tau = \tau_p + \tau_f$$

と定めれば、把握および操りができることになる。

4. シミュレーション

本制御法の有効性を示すために、シミュレーションを行なった。シミュレーションには、Fig.3に示すように、同構造の3関節マニピュレータを3本用い、2秒間で対象物体を X, Y, Z 方向にそれぞれ、 $\pi(\text{cm}), \pi(\text{cm}), -\pi(\text{cm})$ だけ並進運動させると同時に、 Z 軸回りに $\pi/4(\text{rad})$ 、ベクトル η_{12} の回りに $\pi/4(\text{rad})$ だけ回転運動させるような動きをさせた。目標軌道は並進、回転ともに、Fig.4に示すような、初期速度および最終速度が零で、滑らかな動きをするようなものを与えた。また、シミュレーションに用いたリンクおよび対象物体のパラメータはTable1に示すとおりで、制御系のロバスト性をみるために、質量に関しては、各リンクに対して20%、対象物体に対して30%の同定誤差があるものとしてシミュレーションを行なった。なおPD制御におけるゲイン K_1, K_2 は、閉ループ系の相補感度関数(Fig.5参照)の帯域が20 Hz程度になるように決定した。

Fig. 2 Block diagram of servo system

(a) Manipulator model

(b) Arrangement of three manipulators

Fig. 3

Table 1 Parameters

	mass (kg)	length (m)	position of the center of gravity (m)	moment of inertia (Kg · m ²)
first link	7.04×10^{-3} (8.448×10^{-3})	0.02	0.01	9.38×10^{-7} (1.1264×10^{-6})
second link	3.52×10^{-2} (4.224×10^{-2})	0.1	0.05	1.17×10^{-4} (1.408×10^{-4})
third link	2.46×10^{-2} (2.952×10^{-2})	0.07	0.035	4.02×10^{-5} (4.8216×10^{-5})
object	1.0×10^{-1} (7.0×10^{-2})			$1.0 \times 10^{-5} E_3$ ($7.0 \times 10^{-6} E_3$)

シミュレーションにより得られた結果を Fig. 6 に示す。図は横軸が時間、縦軸が目標値と系の応答との誤差ベクトルの 2 乗ノルムを示している。図より上記のような同定誤差がある場合でも、並進運動については 9×10^{-6} (m) 程度、回転運動については 6×10^{-5} (m) 程度の誤差でおさまっていることがわかり、本制御法の有効性を示す 1 つの例証となっている。シミュレーション中の操りシステムの動きは Fig. 7 のとおりである。

一方、内力に関しては、本制御法においては、3 つの

Fig. 4 Typical example of a reference signal

接触点とその幾何学的重心の位置との間の関係のみから決まるため、操りの途中で位置制御に誤差が生じたとしても、それに無関係に設定した大きさの内力が発生される。Fig. 8 に、内力を 0.5 (N) と設定した場合、内力と操り力とを合わせたマニピュレータが物体に加える力ベクトルの大きさを、Fig. 9 に、その力ベクトルが接触点における物体面の法線方向ベクトルとなす角度を示す。これにより、本シミュレーションの場合には、力ベクトルは、過大になることもなく、また十分対象物体の内向きにでていることも確認された。

なお、本論文では、位置制御系としての操り問題の定式化を主眼としているので、制御入力を決定するための計算時間については、現段階では十分考慮していない。そのため、制御系の簡素化、統合化計算¹¹ などを含めて、計算時間の短縮を図ることが、今後の課題として残されている。参考までに、操り系の運動方程式 (16) において、対象物体に起因する項を省略した場合と比較すると、シミュレーションでは約 4 倍の計算時間を要した。

( ) : nominal value

5. おわりに

本論文により得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 3 本のマニピュレータによる物体の操りを対象として、物体の運動を考慮にいたした上で、力制御系としてで

Fig. 5 Bode diagram of $\|S\|$ and $\|T\|$

Fig. 6 Simulated results

Fig. 8 Norm of the manipulators' force

Fig. 7 Motion of the manipulation system

Fig. 9 Direction of the manipulators' force

なお、マニピュレータの関節を増やすなどしてマニピュレータの自由度が残った場合に、冗長度をいかに用いるかという問題や、計算時間の短縮などが今後解決されるべき問題である。

参考文献

- 山下：機械で操作される人工の指とそのマテリアルハンドリングへの応用；計測と制御，3巻，6号，pp. 429～439 (1964)
- 浅田，花房：冗長な指をもつロボットハンドによる物体の把握と操り：計測自動制御学会論文集，15巻，5号，pp. 666～671 (1979)
- T. Okada：Computer Control of Multijointed Finger System for Precise Object Handling；IEEE Trans., Syst., Man, Cybern., Vol. SMC-12, No. 3, pp. 289～299 (1982)
- S. Arimoto, F. Miyazaki & S. Kawamura：Cooperative Motion Control of Multiple Robot Arms or Fingers；Proc. of the 1987 IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp. 1407～1412 (1987)
- 中村，永井，吉川：複数のロボット機構による協動的あやつりの力学；日本ロボット学会誌，4巻，5号，pp. 489～498 (1986)
- 古田，小菅，古屋：ロボットアームの協調制御，自動制御連合講演会予稿集；pp. 377～378 (1987)
- 隈下，杉江，小野：複数のマニピュレータによる物体の操り；第10回 Dynamical System Theory シンポジウム予稿集，pp. 265～268 (1987)
- R. P. Paul 著，吉川訳：ロボット・マニピュレータ，コロナ社，pp. 159～173 (1984)

はなく、位置制御系として操りシステムの定式化を行なった。またその際、姿勢変数としてベクトル h を用いることにより、姿勢を直観的にわかりやすく表わした。

(2) (1) で導出した操りシステムの運動方程式に基づいて制御系を設計した。また、把握のためのポテンシャルを導入し、それにより把握力を設定した。

(3) シミュレーションにより本制御法の有効性を確認した。

- 9) 杉江, 吉川, 小野 : 2 自由度系を用いたロボットマニピュレータのロバスト制御系設計 ; システムと制御, 31 巻, 8 号, pp. 613~620 (1987)
  - 10) J. Y. S. Luh, M. W. Walker, R. P. C. Paul : Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators ; IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-25, No. 3, pp. 468~474 (1980)
  - 11) 中村, 横小路, 花房, 吉川 : ロボットマニピュレータの運動学と動力学の統合化計算 ; 計測自動制御学会論文集, 23 巻, 5 号, pp. 491~498 (1987)
-