理想的な筋運動感覚を与えるマスタ・スレーブ マニピュレータのバイラテラル制御

横小路 泰 義*・吉 川 恒 夫*

Bilateral Control of Master-Slave Manipulators for Ideal Kinesthetic Coupling

Yasuyoshi YOKOKOHJI* and Tsuneo YOSHIKAWA*

The way to control master-slave manipulators affects considerably to the maneuverability of the master-slave systems. The ideal state of master-slave systems can be regarded that the operator can operate the system as if he were directly manipulating the object which is actually existing at the remote site. In other saying, the system must be coupled with the operator to give the ideal kinesthetic sense so that he can perceive the object. So far, several researches discussed about the ideal states of master-slave systems in their own descriptions. However, there is few exact discussion about how close the ideal state can be achieved actually or what kind of control scheme should be designed in order to achieve it. In this paper, we propose a control scheme which can achieve the ideal kinesthetic coupling with the operator and realize three ideal responses which were previously defined by the authors. Secondly, we show the stability of the system controlled by the proposed scheme by using the concept of passivity. We then discuss about the system stability when the sensor signals are pass through the filters. Lastly, the validity of the proposed scheme is confirmed by simulations.

Key Words: master-slave manipulator, bilateral control, teleoperation, kinesthetic coupling, maneuverability

1. はじめに

近年、原子炉、海底、宇宙といったいわゆる極限環境での作業を遂行するために、マスタ・スレーブマニピュレータによる遠隔操縦を中心としたロボットシステムの研究開発が注目されている¹⁾。このようなマ

スタ・スレーブシステムの操作性の向上は重要な課題であるが、制御策としては実際には対称形、力逆送形、力帰環形などの従来からのいわゆる直感的な制御方策が用いられる場合が多く、現在のシステムの操作性は必ずしも満足のものではない。

最近になってシステムの解析を行った研究が行われるようになり、また操作性の向上を目指した新たな制御方策もいくつか提案されている。Raju^{2),3)} はオペレータと環境とを含めたモデル化を行い、それを二端子対網の電気回路に置き換えてインピーダンス行列の正実性による安定性の解析を行った。またHannaford^{4),5)} はシステムの特性をハイブリッド行列で表現することにより、特性の測定や評価が見通しよく行えることを示し、またシステムの安定性を解析する上でアームのみならず対象物やオペレータの特性も含めた全体のシステムを考慮することが重要であることを指摘している。Dudragne ら⁶⁾ はシステムの受動性に着目し、対称形を拡張した制御法を提案している。さらに仮想内部モデルを用いた古田ら⁷⁾、適応制御を用いた藤井ら⁸⁾、並列制御方式による宮崎ら⁹⁾の方法などが提案されている。これら提案された制御方策は、安定性が厳密に示されていないものやシステム全体の応答特性が明確でないなどの問題点が挙げられるが、とりわけオペレータにとっての操作性をいかに向上させるかについてはあまり考慮されていなかった。

マルチ・スレーブシステムのための制御方策を設計する上で、マスタ・スレーブシステムの理想状態を考えることは重要である。オペレータがあたかも直接作業をしているかのように遠隔より対象物を認識するためには、オペレータとシステムとは理想的な筋運動感覚を与える結合をしている必要がある。Dudragne らは、システムが見かけ上なるべく質量が小さく剛性の高いロッドと同じ挙動を示すことが望ましいとし⁶⁾、Hannaford⁵⁾と同様、ハイブリッド行列がある特定の

* 京都大学工学部 宇治市五ヶ庄

* Faculty of Engineering, Kyoto University, Uji

(Received March 30, 1990)

(Revised September 5, 1990)

値をとる場合を理想状態としている。しかしこれらの研究では、理想状態がどこまで実現可能なのかといったような考察は具体的にはなされていない。これに対し館ら¹⁰⁾は、マスタ、スレーブ両アームに適当なインピーダンスを実現させることにより、操作性の向上をねらったインピーダンス制御型の手法を提案し、この目標インピーダンスを小さく設定するほど理想的な応答に近くできるとした。一方、筆者ら^{11)~13)}は先にマスタ・スレーブシステムの三つの理想応答を定義し、これらの理想応答の実現度でシステムの性能を評価する方法を示した。また最終的な理想状態を実現するためには、両アームの加速度信号が必要であることも示した。

本論文では、先の結果をもとにして理想応答を実現するような、すなわち理想的な筋運動感覚が得られるような制御方策を構成することを考える。本論文の構成は以下の通りである。まずマスタ・スレーブシステムの理想応答について簡単にまとめた後、理想応答を実現するような制御方策を設計する。つぎに設計したシステムの安定性を、システムの受動性に着目して考察する。最後にシミュレーションにより提案する制御策の有効性を検証する。

2. マスタ・スレーブシステムの理想 応答とその条件¹³⁾

2.1 自由度系でのモデル化

本節では、これまでに得られた結果を簡単にまとめることにする。扱う対象は簡単のために1自由度系とする。まずマスタおよびスレーブアームの動特性は次式で与えられる。

$$\tau_m + f_m = m_m \ddot{x}_m + b_m \dot{x}_m \quad (1)$$

$$\tau_s - f_s = m_s \ddot{x}_s + b_s \dot{x}_s \quad (2)$$

ここに x_m , x_s はそれぞれマスタアーム、スレーブアームの変位であり、 m_m , m_s はそれぞれのアームの質量、 b_m , b_s はそれぞれのアームの粘性係数である。また f_m はオペレータがマスタアームへ加える力であり、 f_s はスレーブアームが対象物へ加える力である。 τ_m , τ_s は、それぞれのアームのアクチュエータ駆動力である。

スレーブアームと接触する対象物のダイナミクスは、次式のような線形モデルで与えられるものとする。

$$f_s = m_w \ddot{x}_s + b_w \dot{x}_s + c_w x_s \quad (3)$$

ここに、 m_w , b_w , c_w はそれぞれ対象物の質量、粘性係数、バネ係数である。またオペレータ自身の動特性は、次式で与えられるものとする。

$$\tau_{op} - f_m = m_{op} \ddot{x}_m + b_{op} \dot{x}_m + c_{op} x_m \quad (4)$$

m_{op} , b_{op} , c_{op} はそれぞれオペレータの腕の質量、粘性係数、バネ係数である。また τ_{op} は、オペレータの筋の合力である。

一方それぞれのアームのアクチュエータ駆動力を決定する制御方策を次式のような一般形で表現する。

$$\begin{aligned} \tau_m &= \left[K_{mpm} + K'_{mpm} \frac{d}{dt} + K''_{mpm} \frac{d^2}{dt^2} \right] K_{mf_m} \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} \\ &\quad - \left[K_{mps} + K'_{mps} \frac{d}{dt} + K''_{mps} \frac{d^2}{dt^2} \right] K_{mf_s} \begin{bmatrix} x_s \\ f_s \end{bmatrix} \\ \tau_s &= \left[K_{spm} + K'_{spm} \frac{d}{dt} + K''_{spm} \frac{d^2}{dt^2} \right] K_{sf_m} \begin{bmatrix} x_m \\ f_m \end{bmatrix} \\ &\quad - \left[K_{sps} + K'_{sps} \frac{d}{dt} + K''_{sps} \frac{d^2}{dt^2} \right] K_{sf_s} \begin{bmatrix} x_s \\ f_s \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

ここに K_{mpm} , K'_{mpm} , K''_{mpm} , K_{mf_m} は、それぞれ τ_m を決定するためのマスタアームの位置、速度、加速度、力のゲインであり、他のゲインも同様に定義される。ここでは、マスタとスレーブの間の信号のやりとりには時間遅れのない理想な場合を想定している。

2.2 二端子対網によるシステムの表現

ここでは式の表現を簡単にするために、2.1 節で得たモデルを二端子対網の電気回路表現に置き換える²⁾。Fig. 1 に示すような、二端子対網の両端子にそれぞれ電源と負荷を接続したものを考える。ここでオペレータを電源、対象物を負荷、マスタ・スレーブシステムを二端子対網とみなせば、Fig. 1 の回路表現と2.1 節で行ったモデル化とは、つぎのような対応関係が成立する。

$$\dot{x}_m, \dot{x}_s \longleftrightarrow \text{電流 } I_m, I_s$$

$$\tau_{op} \longleftrightarrow \text{電圧 } V_{op}$$

$$f_m, f_s \longleftrightarrow \text{電圧 } V_m, V_s$$

対象物とオペレータは(3), (4)式をもとにつぎのインピーダンスで表わされる。

$$Z_L = m_w s + b_w + c_w / s \quad (7)$$

$$Z_G = m_{op} s + b_{op} + c_{op} / s \quad (8)$$

さらに τ_m , τ_s をそれぞれ電圧 T_m , T_s に対応させ

Fig. 1 Representation of master-slave system by electric circuit

ると、(1), (2), (5), (6)式はつぎのように s -領域に変換できる。

$$T_m + V_m = (m_m s + b_m) I_m \triangleq Z_m I_m \quad (9)$$

$$T_s - V_s = (m_s s + b_s) I_s \triangleq Z_s I_s \quad (10)$$

$$T_m = [P_m \ Q_m] \begin{bmatrix} I_m \\ V_m \end{bmatrix} - [R_m \ S_m] \begin{bmatrix} I_s \\ V_s \end{bmatrix} \quad (11)$$

$$T_s = [P_s \ Q_s] \begin{bmatrix} I_m \\ V_m \end{bmatrix} - [R_s \ S_s] \begin{bmatrix} I_s \\ V_s \end{bmatrix} \quad (12)$$

ここに $P_m \triangleq K'_{mvm} s + K'_{mvm} + K_{mvm}/s$, $Q_m \triangleq K_{mf} m$ であり, $R_m, S_m, P_s, Q_s, R_s, S_s$ も同様に定義される。(9)~(12)式よりマスタ・スレーブシステムのインピーダンス行列 $Z = [z_{ij}]$ は次式で表わされる。

$$Z = \begin{bmatrix} z_{11} & z_{12} \\ z_{21} & z_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{D_Z} \begin{bmatrix} N_{11} & N_{12} \\ N_{21} & N_{22} \end{bmatrix} \quad (13)$$

ただし

$$D_Z \triangleq (1 + S_s)(1 + Q_m) - S_m Q_s \quad (14)$$

$$N_{11} \triangleq (1 + S_s)(Z_m - P_m) + S_m P_s \quad (15)$$

$$N_{12} \triangleq -(1 + S_s)R_m + S_m(Z_s + R_s) \quad (16)$$

$$N_{21} \triangleq (1 + Q_m)P_s + Q_s(Z_m - P_m) \quad (17)$$

$$N_{22} \triangleq (1 + Q_m)(Z_s + R_s) - Q_s R_m \quad (18)$$

である。 Z の行列式は、次式で与えられる。

$$|Z| = \frac{(Z_m - P_m)(Z_s + R_s) + P_s R_m}{(1 + S_s)(1 + Q_m) - S_m Q_s} \triangleq \frac{D_Y}{D_Z} \quad (19)$$

2.3 理想応答の定義と実現条件

筆者らは、マスタ・スレーブシステムの理想的な応答はどうあるべきかを明確にするためにつぎのような三つの理想応答を定義した¹³⁾。

理想応答Ⅰ：オペレータがある操作力 τ_{op} を加えたとき、マスタアームとスレーブアームの位置の応答 x_m, x_s が、扱う対象物の特性によらず常に一致する。

理想応答Ⅱ：オペレータがある操作力 τ_{op} を加えたとき、マスタアームとスレーブアームの力の応答 f_m, f_s が、扱う対象物の特性によらず常に一致する。

理想応答Ⅲ：オペレータがある操作力 τ_{op} を加えたとき、マスタアームとスレーブアームの位置の応答 x_m, x_s と力の応答 f_m, f_s が、扱う対象物の特性によらず常に一致する。

特に理想応答Ⅲは、オペレータがあたかも実際に対象物を扱っているかのような感覚でシステムを操作できる状態であり、システムはオペレータに理想的な筋運動感覚を与えているといえる。これらの理想応答を実現するための条件として、以下の四つの条件が導出できる。

$$(A) \quad D_Z = 0 \quad (20)$$

$$(B) \quad N_{21} = N_{22} \neq 0 \quad (21)$$

$$(C) \quad D_Y = 0 \quad (22)$$

$$(D) \quad N_{21} = N_{11} \neq 0 \quad (23)$$

理想応答Ⅰ, Ⅱ, Ⅲを実現するためには、それぞれ(A)と(B), (C)と(D), (A)~(D)の条件を満たせばよい。

3. 理想応答を実現する制御方策の設計

3.1 理想応答Ⅲを実現する制御方策

本節では、これまでの結果をもとにして理想応答を実現する制御方策を設計する。まずはじめに、理想応答Ⅲを実現する制御方策を考える。制御方策を考える上で、次式のような基本構造を考える。

$$\tau_m = m_m u_m + b_m \dot{x}_m - k_{mf} \left(\frac{f_s - f_m}{2} \right) - \frac{f_m + f_s}{2} \quad (24)$$

$$\tau_s = m_s u_s + b_s \dot{x}_s - k_{sf} \left(\frac{f_s - f_m}{2} \right) + \frac{f_m + f_s}{2} \quad (25)$$

ここに $k_{mf}, k_{sf} \geq 0$ は力ゲインであり, u_m, u_s は新に定義された入力である。(24), (25)式は, u_m, u_s の決定に力信号を用いなければ、少なくとも条件(A)を満足するものである。上式を見てわかるように、アームのパラメータ m_m, m_s, b_m, b_s は正確にわかっているものとしている。(24), (25)式を(1), (2)式にそれぞれ代入すると次式を得る。

$$\ddot{x}_m = u_m - \frac{1}{m_m} (1 + k_{mf}) \left(\frac{f_s - f_m}{2} \right) \quad (26)$$

$$\ddot{x}_s = u_s - \frac{1}{m_s} (1 + k_{sf}) \left(\frac{f_s - f_m}{2} \right) \quad (27)$$

(26), (27)式の両辺を加えて次式を得る。

$$\ddot{x}_m + \ddot{x}_s = u_m + u_s - \left(\frac{1 + k_{mf}}{m_m} + \frac{1 + k_{sf}}{m_s} \right) \left(\frac{f_s - f_m}{2} \right) \quad (28)$$

ここで、もし仮に

$$\ddot{x}_m + \ddot{x}_s = u_m + u_s \quad (29)$$

が成り立つなら、(28)式より

$$f_m - f_s = 0 \quad (30)$$

となり、理想応答Ⅱが少なくとも実現できることになる。(29)式を実現するためには、入力に加速度信号が必要となる。つぎに(26)式から(27)式の両辺を差し引き、(30)式を考慮すると

$$\ddot{x}_m - \ddot{x}_s = u_m - u_s \quad (31)$$

を得る。ここで $e \triangleq x_m - x_s$ を両アームの位置誤差とすると、(31)式は $u_m - u_s$ で e の挙動を指定できることを表わしている。ここでは、

$$u_m - u_s = -k_1 \dot{e} - k_2 e \quad (32)$$

と置くことにする。すると

$$\ddot{e} + k_1 \dot{e} + k_2 e = 0 \quad (33)$$

となり、 k_1, k_2 を適当に選ぶことにより e は漸近的に 0 に収束し、定常状態で理想応答Ⅲが実現できることになる。(29), (32)式より、 u_m, u_s は次式で与えられる。

$$u_m = \frac{1}{2}(\ddot{x}_m + \ddot{x}_s) - \frac{1}{2}k_1\dot{e} - \frac{1}{2}k_2e \quad (34)$$

$$u_s = \frac{1}{2}(\ddot{x}_m + \ddot{x}_s) + \frac{1}{2}k_1\dot{e} + \frac{1}{2}k_2e \quad (35)$$

したがって最終的に制御方針は次式となる。

$$\tau_m = m_m[\ddot{x}_{ms} + k_1(\dot{x}_{ms} - \dot{x}_m) + k_2(x_{ms} - x_m)] \\ + b_m\dot{x}_m - k_{mf}(f_{ms} - f_m) - f_{ms} \quad (36)$$

$$\tau_s = m_s[\ddot{x}_{ms} + k_1(\dot{x}_{ms} - \dot{x}_s) + k_2(x_{ms} - x_s)] \\ + b_s\dot{x}_s + k_{sf}(f_{ms} - f_s) + f_{ms} \quad (37)$$

ただし、 $x_{ms} \triangleq (x_m + x_s)/2$, $f_{ms} \triangleq (f_m + f_s)/2$ とした。(36), (37)式は、それぞれ両アームの力の平均 f_{ms} に追従させながら、目標軌道として両アームの中点 x_{ms} に追従するような動的制御を行っていると思われることができる。ただし(30)式より力ゲイン k_{mf}, k_{sf} にかかる項は 0 となり不要となる。またここでは各アームのパラメータ m_m, m_s, b_m, b_s は正確にわかっていると仮定したが、実際にはある程度の同定誤差が含まれることになる。さらに加速度、力の信号などのノイズ、計算による入力遅れなどがシステムを不安定にする要因となりうることに注意する必要がある。

またこの制御方針が、理想応答Ⅲの条件を満たしていることは、(36), (37)式から

$$P_m = \frac{m_m}{2}(s - k_1 - k_2/s) + b_m, \quad Q_m = \frac{1}{2}(k_{mf} - 1)$$

$$R_m = -\frac{m_m}{2}(s + k_1 + k_2/s), \quad S_m = \frac{1}{2}(k_{mf} + 1)$$

$$P_s = \frac{m_s}{2}(s + k_1 + k_2/s), \quad Q_s = \frac{1}{2}(k_{sf} + 1)$$

$$R_s = \frac{m_s}{2}(-s + k_1 + k_2/s) - b_s, \quad S_s = \frac{1}{2}(k_{sf} - 1)$$

となることからわかる。

3.2 理想応答ⅠおよびⅡを実現する制御方針

前項で示した制御方針は、初期状態において $e=0$ ならば見かけ上マスタ側とスレーブ側を質量 0 の剛体の棒で結合させた状態に相当する。そこでここでは、Fig. 2 に示すようにシステム自体をある種のインピー

Fig. 2 Interventient impedance model

ダンスの形で表現することを考える。このインピーダンスは、見かけ上オペレータと対象物との間に介在することから“介在インピーダンス”と呼ぶことにする。この介在インピーダンスの存在により、マスタアームの駆動力の一部をオペレータ自身が担うことになり、またその結果マスタおよびスレーブアームの運動が制限されるのでアームのアクチュエータの負担が軽減されることになる。Fig. 2 で示される状態は、 $x_m = x_s = x$ として次式で表わされる。

$$f_m - f_s = m_i\ddot{x} + b_i\dot{x} + c_ix \quad (38)$$

ここに、 m_i, b_i, c_i はそれぞれ介在インピーダンスの質量、粘性係数、バネ定数である。実際には x_m と x_s は一致していないことを考えて、次式で示される応答を実現させることを考える。

$$f_m - f_s = m_i\ddot{x}_{ms} + b_i\dot{x}_{ms} + c_ix_{ms} \quad (39)$$

さらに(31)式に対応して次式を考える。

$$\ddot{e} + k_1\dot{e} + k_2e = \lambda \frac{f_m + f_s}{2} \quad (40)$$

ここに $\lambda > 0$ は任意定数である。(26), (27)式に(39)式を代入し、また(40)式を考慮して u_m, u_s を求め、(24), (25)式に代入することにより最終的につぎの制御方針を得る。

$$\tau_m = m_m[\ddot{x}_{ms} + k_1(\dot{x}_{ms} - \dot{x}_m) + k_2(x_{ms} - x_m)] \\ + b_m\dot{x}_m - \frac{(1+k_{mf})}{2}[m_i\ddot{x}_{ms} + b_i\dot{x}_{ms} + c_ix_{ms}] \\ + \frac{\lambda}{2}m_m f_{ms} - k_{mf}(f_{ms} - f_m) - f_{ms} \quad (41)$$

$$\tau_s = m_s[\ddot{x}_{ms} + k_1(\dot{x}_{ms} - \dot{x}_s) + k_2(x_{ms} - x_s)] \\ + b_s\dot{x}_s - \frac{(1+k_{sf})}{2}[m_i\dot{x}_{ms} + b_i\dot{x}_{ms} + c_ix_{ms}] \\ - \frac{\lambda}{2}m_s f_{ms} + k_{sf}(f_{ms} - f_s) + f_{ms} \quad (42)$$

(41), (42)式において $\lambda=0$ とおくと、(33)式同様適当な k_1, k_2 により e は漸近的に 0 に収束し、(39)式は最終的に(38)式の状態を実現できることになる。このように(41), (42)式において $\lambda=0$ とした制御方針は e が 0 に収束することが保証されているので、理想応答Ⅰを実現する制御策の一つの例となっている。この制御策が理想応答Ⅰの条件を満たすことは前項と同様に容易に示せる。また特に $c_i=0$ とすると、機械式マスタ・スレーブマニピュレータのワイヤなどの伝達系の粘性摩擦を考慮したモデルとしてとらえることができる。またさらに $m_i=b_i=0$ としたときは、先の制御策(36), (37)式に一致する。すなわち、先に示した制御策(36), (37)式は介在インピーダンスが 0 である特別な場合であると思われることができる。また特に

$m_i = 2m_m / (1 + k_{mf}) = 2m_i / (1 + k_{sf})$ となるように m_i , k_{mf} , k_{sf} を設定すると, 両式より加速度の項がなくなり, 加速度信号を必要としない特別な場合となる.

つぎに (41), (42) 式において $m_i = b_i = c_i = 0$ とおくと, 理想応答Ⅱを実現する制御策となる. またさらに, 理想応答Ⅱを実現する制御策において $m_m = m_s = m$, $\lambda = 2/m$, $k_{mf} = k_{sf} = 0$ とすると, 力信号のいらない特別な場合となる.

このように (41), (42) 式は三つの理想応答を実現する制御方策の一般表現になっている. 特に $\lambda \neq 0$ のときに $c_i = 0$ とすると, 機械式マスタ・スレーブマニピュレータにおいてさらにワイヤの伸縮を考慮にいれたものとしてとらえることもできる.

4. 安定性に関する考察

4.1 システムの受動性

マスタ・スレーブシステムの安定性を厳密に評価するには, オペレータおよび対象物を含めた全体のシステムで考える必要がある. (36), (37) 式などは, 文献 13) で述べたように τ_{op} を入力とし, x_m , x_s , f_m , f_s を出力とする四つの伝達関数の特性方程式により安定であることを示すことができる. しかしこれはオペレータや対象物が (3), (4) 式のような線形の場合に限られる. しかし厳密にはオペレータの特性は非線形性を有し, また対象物においても実際に線形とみなせるのは限られた範囲でしかない. 本節では制御策の一般形 (41), (42) 式の安定性が, 受動性の概念を用いることにより, オペレータおよび対象物のより広い範囲において満たされることを示す.

Raju^{2), 3)} は, インピーダンス行列の正実性が安定性の十分条件であるとしている. しかし理想応答の条件 (A) を満たすときはインピーダンス行列は定義できないので, この条件は適用できない. Colgate ら¹⁴⁾ は, 線形, 非線形を問わずすべての受動的な環境に接触するシステムが安定となる必要十分条件は, 接触するシステム自体も受動的であることを示している. マスタ・スレーブシステムにおいては, 環境およびオペレータを受動的であるとみなせば, 系全体が安定となるにはマスタ・スレーブシステム自体が受動的であればよい. Anderson ら¹⁵⁾ も, 時間遅れのあるマスタ・スレーブシステムの安定性をシステムの受動性により判定している.

しかしながら, 厳密にはオペレータは自ら力を発生するので受動的であるとはいえない. Colgate らは, 環境に接触するシステムに入力が加わり能動的であっても, その加わる入力が 0 のときにそのシステムが受

動的であり, かつ加わる入力がシステムの状態に依存していなければ安定性は保証されるとしている. マスタ・スレーブにおいては, オペレータ自身は $\tau_{op} = 0$ としたときはもちろん受動的であるから, この τ_{op} に関しては, 『オペレータは, システムが不安定となるように τ_{op} を発生しない』という仮定を設けることにする. Dudragne⁶⁾ らも受動性を安定判別に用いる上で同様の仮定を設けている.

以下では回路の受動性を用いて制御系の安定性を示す. まずベクトル $V \triangleq [V_m \ V_s]^T$ と $I \triangleq [I_m \ -I_s]^T$ を定義する. システムが消費する電力が次式を満たすとき, 受動的であるという¹⁶⁾.

$$\begin{aligned} P &= \text{Re}(V_m^* I_m - V_s^* I_s) \\ &= \left(\frac{V+I}{2} \right)^* \left(\frac{V+I}{2} \right) - \left(\frac{V-I}{2} \right)^* \left(\frac{V-I}{2} \right) \\ &= a^* a - b^* b \\ &= a^* (I_2 - S^* S) a \geq 0 \end{aligned} \quad (43)$$

ここに $*$ は共役転置を表す. また (43) 式中の S は分散行列と呼ばれるものであり, システムの入力波 $a \triangleq (V+I)/2$ と出力波 $b \triangleq (V-I)/2$ の関係を表わすものである. すなわち

$$b = Sa \quad (44)$$

である. システムが受動的であるかどうかを見るには, (43) 式より,

$$\|S\| = \max_{\|x\|} \frac{\|Sx\|}{\|x\|} = \max \lambda^{1/2}(S^* S) \leq 1 \quad (45)$$

すなわち, S の最大特異値が 1 以下であるかどうかを見ればよい¹⁵⁾. 分散行列 S は次式で表わされる.

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{D_Y + N_{11} + N_{22} + D_Z} \\ &\cdot \begin{bmatrix} D_Y + N_{11} - N_{22} - D_Z & 2N_{12} \\ 2N_{21} & D_Y - N_{11} + N_{22} - D_Z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (46)$$

(41), (42) 式のパラメータを代入して整理すると次式を得る.

$$\begin{aligned} S &= \frac{1}{\left((s + k_1 + k_2/2) + \frac{1}{2}\lambda \right) ((m_i s + b_i + c_i/2) + 2)} \\ &\times \begin{bmatrix} \alpha & \beta \\ \beta & \alpha \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (47)$$

$$\alpha = (s + k_1 + k_2/s)(m_i s + b_i + c_i/s) - \lambda$$

$$\beta = 2(s + k_1 + k_2/s) - \frac{1}{2}(m_i s + b_i + c_i/s)$$

(47) 式より S の特異値は

$$\sigma_1 = \frac{|(m_i s + b_i + c_i/s) - 2|}{|(m_i s + b_i + c_i/s) + 2|} \leq 1 \quad (48)$$

$$\sigma_2 = \frac{\left| (s+k_1+k_2/s) - \frac{1}{2}\lambda \right|}{\left| (s+k_1+k_2/s) + \frac{1}{2}\lambda \right|} \leq 1 \quad (49)$$

となり、どちらも1を越えない。したがって(41)、(42)式の制御方策によるシステムの受動性が示された。

4.2 センサの特性を考慮した場合の安定化条件

(1) 加速度信号に遅れがある場合

これまでの議論では、加速度などの信号は遅れなしで得られるとしていた。しかしながら実際は、特に加速度信号や力信号はセンサの性質からノイズの影響を受けやすく、フィルタを通すなどの処置を施すのが普通である。そこで本節では、このようなセンサの特性を考慮したときのシステムの安定性についてシステムの受動性の見地から論じる。議論を簡単にするため以下では、(41)、(42)式において $k_{mf} = k_{sf} = 0$ とし、 $m_m = m_s = m$ とおく。

以下では周波数領域で議論する。さて介在インピーダンスのパラメータ m_i が、周波数領域において次式の特性をもつようにする。

$$m_i = \frac{T_a s}{1 + T_a s} m \quad (50)$$

このとき制御策(41)、(42)式の加速度にかかる係数 $(m - m_i)$ は、同じく周波数領域で $m(1/(1 + T_a s))$ となり、加速度信号に1次遅れ要素を通したことに相当する。ただし T_a は時定数である。このときこの介在インピーダンスの質量は、低周波域では $m_i \approx 0$ であり、高周波域では $m_i \rightarrow m$ となる。オペレータの動作の最大周波数を $\omega_{\max}$ としたときに、時定数 T_a を $1/\omega_{\max}$ より十分小さく選べば、オペレータの動作帯域内では理想応答Ⅲに近い応答を得ることができる。(48)式を満たすためには、

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(m_i s + b_i + c_i/s | s = j\omega) \\ = b_i - \frac{T_a \omega^2}{1 + T_a^2 \omega^2} m \geq 0 \end{aligned} \quad (51)$$

がすべての周波数に対して正であればよい。 $T_a \omega^2/(1 + T_a^2 \omega^2)$ が ω に関して単調増加であることから

$$b_i > \frac{m}{T} \quad (52)$$

が満たされればよい。しかし実際にはオペレータの加える入力周波数には上限 $\omega_{\max}$ があるから、

$$b_i > \frac{T_a \omega_{\max}^2}{1 + T_a^2 \omega_{\max}^2} m \quad (53)$$

が満たされればよいことになる。

(2) 力信号に遅れがある場合

つぎに力信号について考える。(41)、(42)式の λ を

周波数領域で次式となるように設定する。

$$\lambda = \frac{2}{m} \left(\frac{T_f s}{1 + T_f s} \right) \quad (54)$$

このとき力信号の係数 $(1 - \lambda m/2)$ は $1/(1 + T_f s)$ となり、同じく時定数 T_f の1次遅れのフィルタを通したことになる。このとき $s=0$ では $\lambda=0$ 、 $s \rightarrow \infty$ では $\lambda=2/m$ となる。(49)式を満たすには、複素平面上でベクトル $(s+k_1+k_2/s)$ と $\lambda/2$ とのなす角が $\pi/2$ 以下ならば良い。ただしここでいうベクトルとは、複素数 $x+yj$ に対して $[x \ y]^T$ を意味する。両ベクトルの内積が非負となる条件から

$$k_1 T_f \omega^2 + (\omega^2 - k_2) \geq 0 \quad (55)$$

が成り立つ必要があるが、

$$\omega < \bar{\omega} \triangleq \sqrt{\frac{k_2}{T_f k_1 + 1}} \quad (56)$$

で成立しなくなる。しかしながら設定した T_f に対して k_1 を十分大きく、 k_2 を十分小さくすれば、 $\bar{\omega}$ を十分小さくでき、 $|\lambda|_{\omega \leq \bar{\omega}} \ll 1$ となるので、(49)式において $\sigma_2 \approx 1$ となり、実際上は問題ない。また厳密に安定性を保証するには、たとえば

$$\lambda = \frac{1}{m} \left(\frac{T_f s + \gamma}{T_f s + 1} \right) \quad 0 < \gamma < 1 \quad (57)$$

とすると、

$$k_1 > \left(\frac{1-\gamma}{\gamma} \right) T_f k_2 \quad (58)$$

ととることにより、すべての周波数に対して(49)式が成立する。

このようにシステムの受動性に着目することにより、センサ信号にフィルタを通した場合にも安定性を保証することができる。

5. シミュレーション

提案した制御策の有効性をシミュレーションにより検証する。マスタ、スレーブアームのパラメータとして

$$m_m = m_s = 2.0 \text{ (kg)}, \quad b_m = b_s = 0.2 \text{ (Ns/m)}$$

とし、対象物は紙面の都合上つぎの一種のみを考える。

$$m_w = 3.0 \text{ (kg)}, \quad b_w = 1.0 \text{ (Ns/m)},$$

$$c_w = 100.0 \text{ (N/m)}$$

またオペレータのパラメータも簡単のためにつぎに示す一定値とする。

$$m_{op} = 1.0 \text{ (kg)}, \quad b_{op} = 2.0 \text{ (Ns/m)},$$

$$c_{op} = 10.0 \text{ (N/m)}$$

制御策としてつぎの三つのケースを比較する。

[ケース1]: (36)、(37)式を用いた場合

Fig. 3 Simulation result (case 1)

Fig. 4 Simulation result (case 2)

Fig. 5 Simulation result (case 3)

$$k_1=20 \text{ (1/s)}, k_2=100 \text{ (1/s}^2\text{)}, k_{mf}=k_{sf}=0$$

[ケース 2]: 力帰還型の場合

$$K_{mf}=2.5, K_{mf_s}=3.5$$

$$K_{ip_s}=K_{ip_m}=500 \text{ (N/m)}, K'_{ip_s}=50 \text{ (Ns/m)}$$

[ケース 3]: (41), (42)式を用いた場合

$$k_1=20 \text{ (1/s)}, k_2=100 \text{ (1/s}^2\text{)}, m_i=2.0 \text{ (kg)},$$

$$b_i=1.0 \text{ (kg/s)}, c_i=0.0 \text{ (kg/s}^2\text{)},$$

$$\lambda=0.1 \text{ (1/kg)}, k_{mf}=k_{sf}=0$$

Fig. 3~5 に、それぞれのケースについて $\tau_{op}=5-5 \cos(4\pi t)$ (N) なる 2 Hz の入力を加えたときの x_m , x_s , f_m , f_s の応答を示す。サンプリング時間は 1 (ms) とした。各図には、両アームのアクチュエータ入力の最大値も併せて示した。ケース 2 は応答に遅れやオーバーシュートが生じているのに対して、ケース 1 はアクチュエータ入力は小さいにもかかわらずほぼ理想応答Ⅲを実現している。ケース 2 においては、偏差を小さくするためにゲインをさらに上げるとシステムが不安定になってしまうことに注意されたい。ケース 3 は介在インピーダンスの効果を示したものであり、ケース 1 に比べるとマスタ側のアクチュエータ入力がやや増加しているがスレーブ側のアクチュエータ入力の最大値が低減されている。

つぎに加速度と力の信号にフィルタを通した場合の例を示す。

$$T_a=T_f=0.005 \text{ (s)}, \omega_{\max}=10 \text{ (Hz)}, \gamma=0.01,$$

$$b_i=0.2 \text{ (kg/s)}, c_i=0.0 \text{ (kg/s}^2\text{)}, k_1=50 \text{ (1/s)},$$

$$k_2=100 \text{ (1/s}^2\text{)}$$

とすると、 b_i , k_1 は (53) 式, (58) 式の安定化条件を満たしている。このときの応答を Fig. 6 に示す。ほぼ理想応答Ⅲに近い応答となっていることがわかる。

Fig. 6 Simulation result when acceleration and force signals are filtered

6. おわりに

本論文で得られた主な結果は、以下のとおりである。

- マスタ・スレーブシステムにおいて、先に定義した三つの理想応答を実現する制御策を提案した。これらの制御策は、加速度信号を用いてアームの動特性を考慮したところに特徴があり、特に理想応答Ⅲを実現する制御策はオペレータに理想的な筋運動感覚を与えることができる。
- 回路網の受動性の概念を用いることにより、提案した制御策によるシステムの安定性が、線形に限らないより広範囲のオペレータや対象物に対して保証されることを示した。
- シミュレーションにより提案する制御策の有効性を検証した。

今後の課題としては、実験による検証および多自由度系への拡張が挙げられる。

なお本研究は、平成元年度文部省科学研究費補助金奨励研究（A）（01750217）の援助を受けた。

参考文献

- 1) T. B. Sheridan: Telerobotics, In Proceedings, The 10th IFAC World Congress on Automatic Control, 103/117 (1987)
- 2) G. J. Raju: Operator Adjustable Impedance in Bilateral Remote Manipulation, Ph. D. Thesis, Man-Machine Systems Laboratory, MIT (1988)
- 3) G. J. Raju: Design Issues in 2-port Network Models of Bilateral Remote Manipulation, In Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1316/1321 (1989)
- 4) B. Hannaford: Stability and Performance Trade-offs in Bi-Lateral Telemanipulation, In Proceedings, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1764/1767 (1989)
- 5) B. Hannaford: A Design Framework for Teleoperators with Kinesthetic Feedback, IEEE Trans. Robotics and Automation, **RA-5-4**, 426/434 (1989)
- 6) J. Dudragne, et al.: A Generalized Bilateral Control Applied to Master-Slave Manipulators, In Proceedings, 20th ISIR, 435/442 (1989)
- 7) 古田, ほか: 仮想内部モデルに基づくマスタスレーブマニピュレータの制御, 計測自動制御学会論文集, **24-2**, 176/182 (1988)
- 8) 藤井, ほか: マスタスレーブシステムの適応制御, 第6回ロボット学会学術講演会予稿集, 395/398 (1988)
- 9) 宮崎, 萩原: バイラテラル・マスタ・スレーブ・マニピュレータの並列型制御方式, 日本ロボット学会誌, **7-5**, 446/452 (1989)
- 10) 館, 紳: インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム(I), 日本ロボット学会誌, **8-3**, 241/252 (1990)
- 11) 吉川, 横小路: マスタ・スレーブシステムの操作性と安定性の解析, 第5回ロボット学会学術講演会予稿集, 109/112 (1987)
- 12) Y. Yokokohji and T. Yoshikawa: Control of Master-Slave Manipulators for Object Teleperception, In Preprint, 5th International Symposium of Robotics Research, 17/24 (1989)
- 13) 横小路, 吉川: マスタ・スレーブ型遠隔操縦システムの操作性, 計測自動制御学会論文集, **26-5**, 572/579 (1990)
- 14) J. E. Colgate and N. Hogan: Robust Control of Dynamically Interacting Systems, Int. J. Control, **48-1**, 65/88 (1988)
- 15) R. J. Anderson and M. W. Spong: Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay, IEEE Trans. Automatic Control, **AC-34-5**, 494/501 (1989)
- 16) 古賀利郎: 伝送回路, コロナ社 (1978)