

テレグジスタンスの研究 第17報

—インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システム—

機械技術研究所

館 隆

安川電機製作所 ○榊 泰輔

Study on Tele-existence (XVII)

—Impedance Control Type Master-slave System—

Mechanical Engineering Laboratory Susumu TACHI

Yaskawa Electric Mfg.Co.Ltd.

Taisuke SAKAKI

ABSTRACT: This research is concerned with the master-slave manipulator system in tele-existence. Impedance control type master-slave system is proposed to control the impedances of the arms and to be able to give the real force sensation to the operator.

1 はじめに テレグジスタンスでは、視覚の情報と同時に、遠隔に配置したロボットのアームが自分の腕になったかのような高度な臨場感を伴う操作感の研究も重要であり、我々は、マスタ・スレーブ方式に注目して研究してきた^{1,2)}。

従来のマスタ・スレーブには対称型・力逆送型・力帰還型があるが、対称型はマスタとスレーブの動特性も反力に加わり力逆送型はマスタの動特性がかかる。力帰還型は力帰還ゲインが十分大きいと両アームの動特性を打ち消すことができるが、そのゲインを大きくすることは実際には難しい。また、いずれの方法もアームの動特性を可変にすることは考えられない。

マスタ・スレーブの機械的インピーダンスを可変にすることは有効な手法であり、福田³⁾の適応力制御方式による方法、古田ら⁴⁾の仮想内部モデル追従制御がある。一方、吉川らによる操作感のテレグジスタンスの定式化と動的制御⁵⁾、藤井ら⁶⁾のモデル規範型適応制御などの制御手法が提案された。さらに、作業によって種々の臨場感を与える手法については、館・榊³⁾の環境とアームの動特性を制御することで種々の臨場感を与える手法が提案されている。また、宇宙空間の様に伝送遅れがある場合について、神徳・谷江⁷⁾の視覚フィードバックを用いたバイラテラル系が提案されているが、マスタ側の環境モデルの作成を必要としている。

以上の研究をふまえ、この報告では、インピーダンス制御⁸⁾を応用したマスタ・スレーブ・システムを提案し、この手法が種々の高度な臨場感を供与でき、伝送遅れにも対応できることを示す。

2 インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システムの原理

インピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システムは、各アームをインピーダンス制御し両アームの見かけの動特性を一致させ場合によりその動特性を可変とすることを特徴とする。その概念図を Fig.1 に表し制御手法を以下に示す。簡単のため1次元の場合

を考えると、マスタ側の状態式と制御式は、

$$f_0 = M_0 \ddot{x}_m + B_0 \dot{x}_m + K_0 x_m - f_1 \quad (1)$$

$$f_1 = C_1 \quad (2)$$

スレーブ側の状態式と制御式及び対称物の状態式は、

$$f_2 = M \ddot{x}_s + B \dot{x}_s + K_0 x_s + f_e \quad (3)$$

$$f_2 = C_2 \quad (4)$$

$$f_e = M \ddot{x}_s + B \dot{x}_s + K_0 x_s \quad (5)$$

但し、(M₀, B₀, K₀)はアームの目標インピーダンス、(M, B, K)は対象物のインピーダンス、f₀は操作力、f₁, f₂は各々マスタとスレーブの内部トルク、f_eはスレーブアームへの反力、x_m, x_sは各々マスタとスレーブの位置を表す。

制御手法は、アーム間で伝送する情報により4つに分類される。

マスタの操作力・スレーブへ反力を伝送する双方向力情報伝送方式(D-Fと略)は、マスタの操作力をスレーブの内部トルク、スレーブの得る反力をマスタの内部トルクとして出力する。(2),(4)式で、

$$C_1 = -f_e \quad (6)$$

$$C_2 = f_0 \quad (7)$$

とすると操作力と反力の関係は、

$$f_0 = M_0 \ddot{x}_m + B_0 \dot{x}_m + K_0 x_m + f_e \quad (8)$$

同様に、マスタから運動をスレーブから反力を伝送し、力逆送型・力帰還型の拡張である運動-力情報伝達方式(M-Fと略)では、

$$C_1 = -f_e \quad (9)$$

$$C_2 = M_0 \ddot{x}_m + B_0 \dot{x}_m + K_0 x_m \quad (10)$$

$$f_0 = M_0 \ddot{x}_m + B_0 \dot{x}_m + K_0 x_m + M \ddot{x}_s + B \dot{x}_s + K_0 x_s \quad (11)$$

あるいはその逆の力-運動情報伝達方式(F-Mと略)では、

$$C_1 = M_0 \ddot{x}_s + B_0 \dot{x}_s + K_0 x_s \quad (12)$$

$$C_2 = f_0 \quad (13)$$

$$f_0 = (M_0 \ddot{x}_m + B_0 \dot{x}_m + K_0 x_m + M \ddot{x}_s + B \dot{x}_s + K_0 x_s) / 2 \quad (14)$$

また、双方向とも運動情報を伝達し対称型の拡張と言える双方向運動情報伝達方式(D-Mと略)では、

$$C_1 = M_0 \ddot{x}_s + B_0 \dot{x}_s + K_0 x_s \quad (15)$$

$$C_2 = M_0 \ddot{x}_m + B_0 \dot{x}_m + K_0 x_m \quad (16)$$

$$f_0 = M_0 \ddot{e} + B_0 \dot{e} + K_0 e, \quad e = x_m - x_s \quad (17)$$

各アームのインピーダンス(M₀, B₀, K₀)の設定は、例えば臨界制御での安定条件を考慮すると、

$$B_0^2 - 4M_0 K_0 = 0, \quad \sigma = B_0 / (2 M_0) > 0 \quad (18)$$

だから、 $\sigma = B_0 / (2 M_0) = \sqrt{K_0 / M_0}$ より減衰度σをできるだけ大きくするような(M₀, B₀, K₀)の比が決まるが、マスタの操作性と反力の感度を良くするため M₀をできるだけ小さくして(M₀, B₀, K₀)を決定する。

上述の制御手法は力センサを必ずしも必要とせず、対象物の動

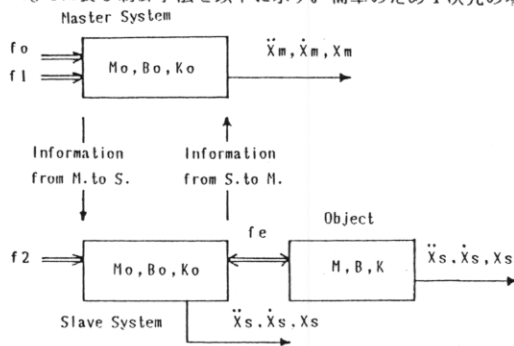


Fig.1 Impedance Control Type Master Slave System

特性を同定できるが²⁾、さらに同定した対象物の動特性を用いて伝送遅れに対応できる。伝送遅れを $X_m(t) = X_m(t - td)$ と表すとD-Mの(15),(16)式から、

$$C1 = (M_0 \ddot{X}_m + B_0 \dot{X}_m + K_0 X_m) - (M \ddot{X}_m + B \dot{X}_m + K \delta X_m) \quad (19)$$

$$C2 = (M_0 \ddot{X}_m + B_0 \dot{X}_m + K_0 X_m) + (M \ddot{X}_m + B \dot{X}_m + K \delta X_m) \quad (20)$$

とあらためると、スレーブはマスタに伝送遅れ時間だけ遅れて動作するが、操作者へは伝送遅れなく反力が返る。

$$f_0 = M \ddot{X}_m + B \dot{X}_m + K \delta X_m \quad (21)$$

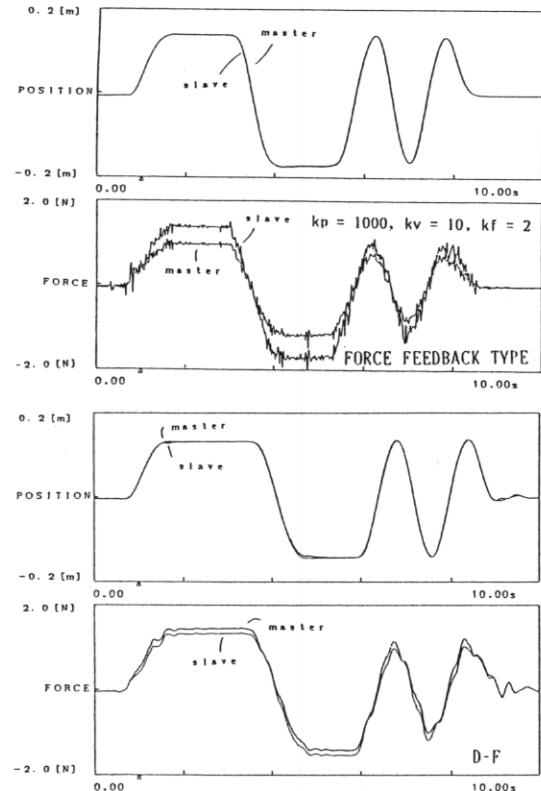
3 実験 第15報で使用した2軸のDDロボットを水平方向の1軸マスタとして用い、スレーブは計算機内でシミュレーションする。Fig.2に力帰還型、D-F、D-Mでのマスタ・スレーブの位置と操作力・反力の時間履歴を示す。Moを十分に小さくとると力帰還型よりD-Fの方が、位置・反力の追従性が良い。D-Mではマスタとスレーブの位置誤差 e で反力が与えられる(D-M(1))が、対象物の同定を行うと位置・反力の追従性は良くなる。(D-M(2)) 但し、アームと対象物の動特性を次のように設定した。

$$M_0 = 0.05[\text{Kg}], B_0 = 0.4[\text{N}/(\text{m}/\text{s})], K_0 = 0.9[\text{N}/\text{m}]$$

$$M = 0.2[\text{Kg}], B = 0.0[\text{N}/(\text{m}/\text{s})], K = 10.0[\text{N}/\text{m}]$$

また、同じ条件下で0.5[s]の伝送遅れのある場合では、(19),(20)の制御式を用いれば Fig.3のようにスレーブはマスタに遅れて動作するが操作者への反力は遅れなく返ることがわかる。

4 まとめ テレイグジスタンスの研究の一環として、高度の臨場感を持つロボットマニピュレータを構築することを目的としたインピーダンス制御型マスタ・スレーブ・システムを提案し、その有効性を実験にて検証した。



<参考文献>

- 1) 館, 榊ほか;第27回SICE学術講演会(1988)
- 2) 館, 榊;第6回日本ロボット学会学術講演会(1988)
- 3) 福田;第25回SICE学術講演会(1986)
- 4) 古田,小菅ら;SICE論文集,vol.24,No.2,pp.176-182(1988)
- 5) 吉川,横小路;第6回日本ロボット学会学術講演会(1988)
- 6) 藤井ほか;第6回日本ロボット学会学術講演会(1988)
- 7) 神徳,谷江;第6回日本ロボット学会学術講演会(1988)
- 8) N.Ilogan;Impedance Control I II III,ASME Trans.,March(1985)

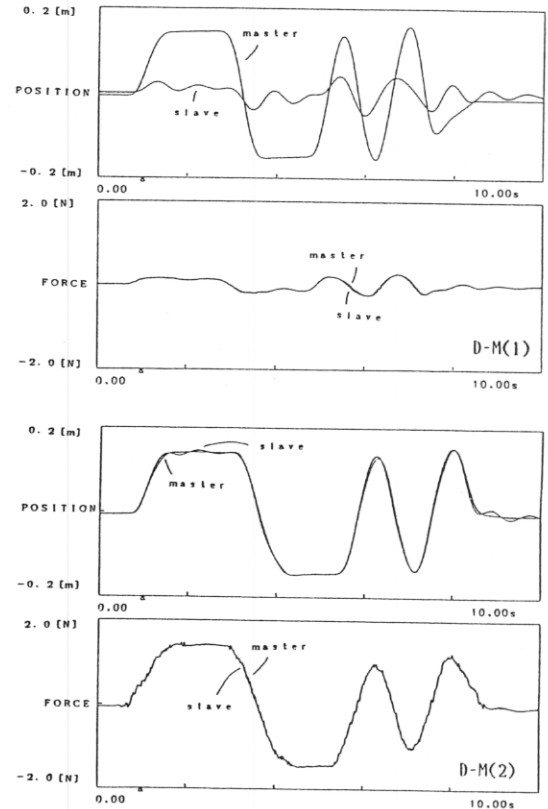


Fig.2 Data of Force Feedback Type and Impedance Control Type

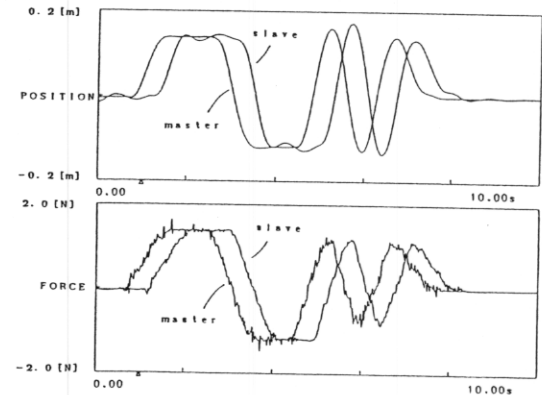


Fig.3 Data of Impedance Control Type with Time Delay