

〔原著論文〕

異構造マニピュレータ間における バイラテラルマスタスレイブ制御

新井 健生* 中野 栄二**

原子炉内、宇宙、海中等危険な環境下における作業を行う遠隔ロボットを効果的に制御するため、本論文では異なる構造を有するマニピュレータに対するバイラテラル制御方式が提案されている。この方法では、どのようなタイプのマスタ装置とスレイブマニピュレータをも結合することが可能である。したがって、従来の同構造のマスタ装置とスレイブマニピュレータを用いる制御方式に対していくつかの利点を有する。第1は操作性を向上することが可能なこと、第2は汎用性を高めることが可能なこと、第3は工場内の複雑な作業のティーチングに適用できることである。本方式の実現性を調べるために、3種類のマニピュレータを用いた基礎実験を行った。これらの実験では、マスタの力追従性、スレイブの位置追従性、座標変換、位置サーボ、力サーボに要する計算機の処理時間などを調べた。これらの実験結果、及びクランク回しなどのより実際的な実験結果より、本手法の実現性と広い応用性が示された。

1. 序 論

マニピュレータの遠隔操縦に関しては、作業を行うマニピュレータ、すなわちスレイブマニピュレータと、人間が操作するマニピュレータ、すなわちマスタマニピュレータを対して用いるマスタスレイブ制御方式が良く知られており、原子炉内での作業を始めとして、海中作業などにも既に適用されている。複雑な環境下で作業ロボットに効果的な動作指令を与えるために、スレイブマニピュレータ（以下スレイブと略）が外界から受ける反力を、操作者へフィードバックすることが可能なバイラテラル・マスタスレイブ制御方式 (Bilateral Master Slave Control, 以下 BMSC と略) が提案されている^{1,2)}。BMSC については、その高い操作性が期待されており、サーボ系の構成法等に関する研究がこれまでに数多く行われている³⁻⁵⁾。

従来のマスタスレイブ制御方式では、マスタマニピュレータ（以下マスタと略）とスレイブの構造は相似とし、対応する関節ごとにサーボ系を設けて制御する方法が一般的であった。これは、マスタスレイブマニピュレータが歴史的にみて、機械式のマジックハンドより進展してきたことによるものである。したがって、機構が比較的単純なスレイブマニピュレータの場合、そのマスタも容

易に構成することが可能である。しかしながら、スレイブが作業性の高い人間腕形多関節構造のマニピュレータの場合は、マスタも人間腕形で外骨格構造のものを用い、操作者の腕に直接装着するような方法をとらなければならなかった⁶⁻⁹⁾。この場合、制御系は比較的容易に構成することが可能であるが、特にバイラテラルとする場合、マスタは各関節に力フィードバック用のアクチュエータを備える必要があるため、肩や肘部が異常に盛り上がり、重々しく拘束感が大きくなり、かえって操作性の低下を招くという欠点が報告されている。つまり、ロボットの作業性を高めようとすると、逆に遠隔制御における操作性が低下するため、結果としてシステム全体の作業効率が劣化する可能性が生じることとなる。

一方、操作性の向上を図るために、マスタとスレイブの間を単純にサーボコントローラで結合するだけでなく、計算機を介在させることにより、単純なスレイブのマスタに対する追従動作に加えて、スレイブを自律的に動作させる方法や、対象物の一定運動に対する補償、動作の拡大や縮小を行う方法などが提案されており、これらはある程度の効果を上げているものと評価できよう⁹⁻¹¹⁾。

このように、計算機的能力を補助的に用いることにより、操作性や作業性を向上させることが可能であるが、単にソフトウェア面からだけでなく、ハードウェア面からの、すなわち、マスタ自体に機構的な改善をほどこすことにより、あるいはマスタとして最適なコンフィギュ

原稿受付 1986年3月4日

* 機械技術研究所 ロボティクス部 ** 同 企画室

レーションを持つものを設計することにより、一層操縦性の高い BMSC 構成の可能性が考えられよう。ここで、BMSC が備えるべき基本的条件となるものを考察する。この条件としては、次のようなことが挙げられる。

- ① スレイブは操作者が指示する位置に正しく追従すること。
- ② マスタは、スレイブが受ける反力を正確に操作者へ指示すること。
- ③ スレイブは器用な動作が可能ないように作業性が高いこと。
- ④ マスタは、操作者が疲労感を覚えず、容易に操縦することが可能なこと。

この中で、①、②はバイラテラルサーボ系の高性能化を意味しており、サーボ系の安定性や応答性改善などの点で、これまでにある程度研究が行われてきた。一方、③、④はマスタ、スレイブのハードウェア構成に大きく依存する問題であり、従来の同構造のマスタスレイブを用いているかぎりは解決しきれない問題と言えよう。

このような観点から、上記①～④を BMSC 開発の基本的命題としてとらえ、本論文ではこれらを達成する BMSC を構成するために、特に③、④の問題点を解決するための基礎研究として、構造の異なるマニピュレータ間における BMSC、すなわち異構造 BMSC を提案し、基礎実験を行ってその可能性と問題点の検討を行った。異構造 BMSC を用いることの意義としては、次のようなことが考えられる。

- ① マスタとスレイブを別個に考えることができ、作業性の高いスレイブと操縦性のよいマスタを組み合わせ、全体として最適なシステムを設計し易い。
- ② 任意のマスタとスレイブの組合せが可能となり、汎用性が高まると同時に、モジュール化などが行い易い。

- ③ 複雑な作業のティーチングに適用できる。
- ④ ①は本方式を考えるに当たったの発想の原点となったものである。また、1人のオペレータが多数の作業用ロボットを管理するような場合を想定すると、②の利点も非常に有効なものと言えよう。さらに、一般工場などにおいて複雑な作業を産業用ロボットにティーチングするような場合、本方式を用いることにより1台のマスタで様々な産業用ロボットに適用することができ、工場内の自動化に対する波及効果もあり意義のあるものと考えられる。

2. 異構造 BMSC 構成法

Fig.1 は2つのマニピュレータ間における異構造 BMSC のブロック線図を示したものである。マスタとスレイブは共に n 自由度とし、それぞれの関節ではアクチュエータにより必要なトルクが発生され、関節角度変位、角速度、トルク等がセンサにより測定されるものとする。制御系はスレイブの位置制御、マスタの力制御、及び、マスタとスレイブの各々の位置、速度、力の情報を共通の座標系で比較するために必要な座標変換部とに分けることができる。以下、制御系の構成法を示す。

マスタが操作される空間を操作領域、スレイブが動作する空間を作業領域とし、各々の領域に適当に固定された直交座標系をそれぞれ C^0, C^w とする。 C^w におけるスレイブ手先の位置と方向が、 C^0 におけるマスタ操作端のそれらに一致するように制御装置は動作する。同様に、 C^0 においてマスタ操作端が操作者に対して発生する力のモーメントが、 C^w においてスレイブ手先が外界から受けているそれらに一致するように制御装置は動作すればよい。

ここで、マスタの第 i 関節における角度変位、角速度、

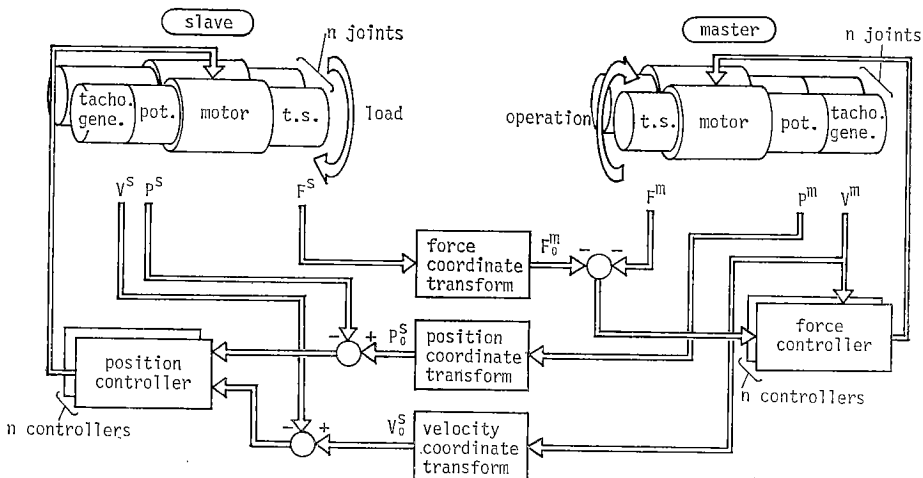


Fig.1 Blockdiagram of the proposed bilateral control system

発生トルクを p^m_i, v^m_i, f^m_i , スレイブ第 i 関節のそれらを p^s_i, v^s_i, f^s_i とし, 位置ベクトル $P^m=(p^m_1, \dots, p^m_n)^t$, $P^s=(p^s_1, \dots, p^s_n)^t$, 速度ベクトル $V^m=(v^m_1, \dots, v^m_n)^t$, $V^s=(v^s_1, \dots, v^s_n)^t$ 力ベクトル $F^m=(f^m_1, \dots, f^m_n)^t$, $F^s=(f^s_1, \dots, f^s_n)^t$ を定義すると, 制御系の構成は次のようになる.

C^0 及び C^w におけるマスタとスレイブの手先の位置ベクトル (位置と方向の両方を含む) をそれぞれ x^m , x^s とすると, これらは P^m, P^s を用いて次のように表される.

$$x^m = \Gamma^m(P^m) \quad (1)$$

$$x^s = \Gamma^s(P^s) \quad (2)$$

ここで, Γ^m, Γ^s は, それぞれ, マスタ, スレイブの関節座標系から直交座標系への座標変換を表わしており, 具体的には Denavit-Hartenberg らの提案した手法を用いて一意的に求めることが可能である¹²⁾. P^m の現在値に対応する P^s の値を P^s_0 とすると, $x^m = x^s$ とおくことにより次のように求まる.

$$p^s_{0i} = A_i(P^m) \quad 1 \leq i \leq n \quad (3)$$

ここで A^i は P^m から P^s への座標変換を表わしており, 一般には p^s_{0i} は (1) 式, (2) 式を連立してできる非線形方程式の解となる.

一方, マスタの力追従についても, 同様な考え方に基づいて制御系を構成することができる. マスタの関節が発生するトルク F^m は, スレイブが受ける反力 F^s をマスタ関節座標系に変換した値 F^m_0 に追従すればよい.

マスタとスレイブの手先で働く力の静的な関係は, 仮想仕事の原理に基づき, (3)式より導くことができる. 従って, F^m_0 は変換行列を用いることにより, 次のように求まる.

$$F^m_0 = J^t F^s \quad (4)$$

ここで, J は次のように定義される.

$$J_{ij} = \partial A_i / \partial p^m_j$$

$$(1 \leq i \leq n, 1 \leq j \leq n) \quad (5)$$

スレイブの位置追従制御及びマスタの力追従制御は, 上述の P^s_0, F^m_0 を設定値とするサーボ系を構成することにより実現することができる.

但し, 安定性の向上, 過渡応答特性の改善を図るため, 各関節の速度情報をフィードバックすることとする. すなわち, スレイブ制御系には, マスタとスレイブの速度偏差が付加され, またマスタ制御系には, マスタの速度がフィードバックされる. 速度偏差を求めるために, マスタの角速度をスレイブ関節座標に変換した値 V^s_0 が必要となり, これは次式によって求めることができる.

$$V^s_0 = J V^m \quad (6)$$

以上により, マスタ, スレイブの各関節アクチュエータへの駆動指令値を $U^m=(u^m_1, \dots, u^m_n)^t$, $U^s=(u^s_1, \dots, u^s_n)^t$ とすると, これは次のように決定される.

$$\Delta P^s = P^s_0 - P^s \quad (7)$$

$$\Delta V^s = V^s_0 - V^s \quad (8)$$

$$U^s = C_p \Delta P^s + C_I \Delta P^s dt + C_V \Delta V^s \quad (9)$$

$$\Delta F^m = -k_f F^m_0 - F^m \quad (10)$$

$$U^m = D_p \Delta F^m + D_I \int \Delta F^m dt + D_V V^m \quad (11)$$

ここで, $C_p, C_I, C_V, D_p, D_I, D_V$ は $n \times n$ 対角係数行列で, その成分は, 個々の制御系の安定性と同時に, 系全体の応答性を考慮して決定されるべきものである. また, k_f は力の拡大率を表わす定数である. Fig. 2, Fig. 3 はスレイブ及びマスタの制御系のブロック図を示したものである. なお, Fig. 3 中の K は, トルクを測定するためのひずみゲージのゲイン定数を表わしている. 本装置のトルクセンサでは原理的にはひずみ効果を利用してトルク測定を行っており, 静的には, 手先が対象物に当たっている場合, トルク f^m_i がかかることにより機構の一部が歪み, ポテンシヨメータの値は p^m_i となる. 一方, p^m_i はトルクがかからずに対象物に接触している場合のポテンシヨメータの仮想的な値であり, p^m_i と

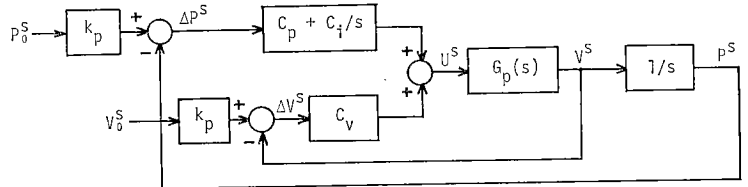


Fig. 2 Servo controller for the slave manipulator

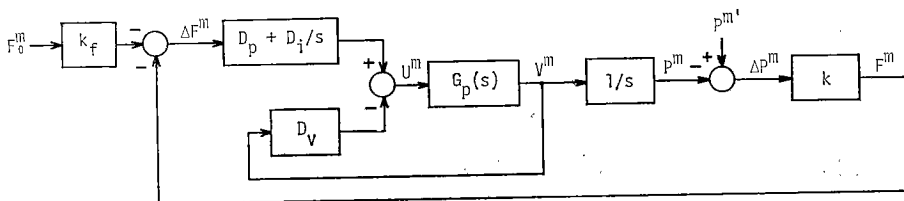


Fig. 3 Servo controller for the master manipulator

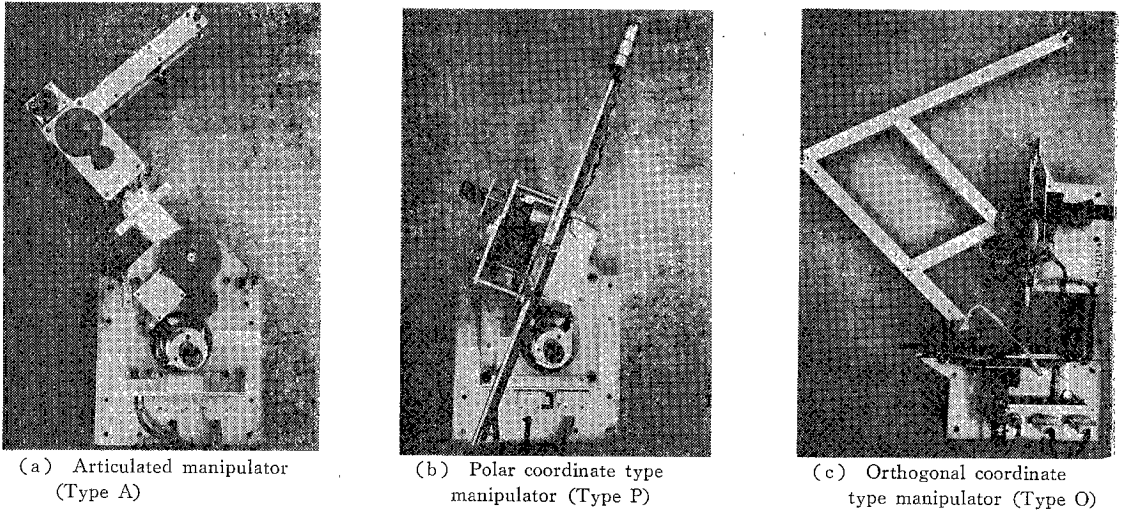


Fig. 4 General views of three types of manipulators

Table 1 Geometrical specification of three types of 2 d. o. f. manipulators

type	specification
A	$l_1=l_2=300\text{ mm}$ $-90^\circ \leq q_1 \leq 90^\circ$ $-160^\circ \leq p_2 \leq 160^\circ$
P	$100\text{ mm} \leq r \leq 570\text{ mm}$ $-90^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$
O	$0\text{ mm} \leq x \leq 600\text{ mm}$ $-225\text{ mm} \leq y \leq 225\text{ mm}$

p^m_i の差, すなわち Δp^m_i が f^m_i に比例する値となり, これにバネ定数 K を乗ずることにより f^m_i が求まる. 従って, マスタ側の力サーボでは, この Δp^m_i を位置制御することにより力制御を行っている.

3. 2自由度マニピュレータによる異構造 BMSC

本方式の実現性を調べるために, 3種類のマニピュレータを用いて基礎実験を行った. 本章では, 実験に用いた2自由度マニピュレータの機構, 及び制御系の構成等について述べる.

3.1 実験装置

Fig. 4は基本実験に使用した3種類の2自由度マニ

ピュレータの外観である. (a)は, リンクを2つのピボット軸で結合して構成した関節形マニピュレータ (以下A形と略) である. (b)は伸縮機構とピボット軸で構成した極座標形マニピュレータ (以下P形と略) であり, また(c)は, 平行リンク機構を用いた直交座標形 (以下O形と略) である. 各関節自由度はギヤ付きDCサーボモータで駆動され, 位置検出用のポテンショメータ, 速度検出用タコジェネレータ, ひずみゲージを利用した反力検出用のトルク(力)センサを備えている. なお, DCモータのパワーは, A形第1関節およびP形 θ 方向の自由度で用いられているモータでは70W, それ以外では11Wである. また, モータの駆動回路は電圧制御形であり, モータへの入力電圧は指令値に比例した値となる. Fig. 5は上記マニピュレータの機構概略図を示したものである. Table 1は実験に用いたマニピュレータの主な仕様を示したものである. 座標変換演算, 各モータのサーボコントロールは全てミニコンピュータ TI 990/20を用いて行った. 各関節の位置, 速度, トルクセンサの出力をADコンバータによりコンピュータへ取り込み, 必要な演算を行った後, DAコンバータの出力電圧を用いてモ

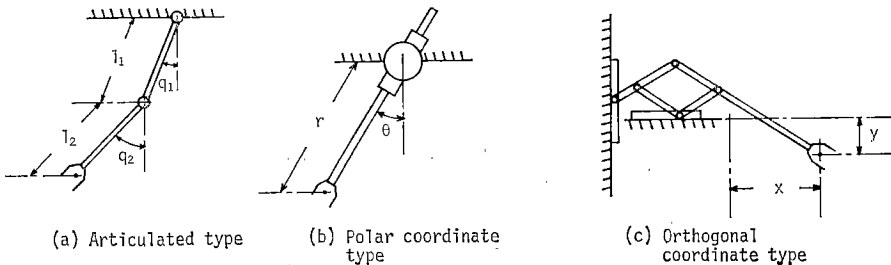


Fig. 5 Configurations of three types of manipulators

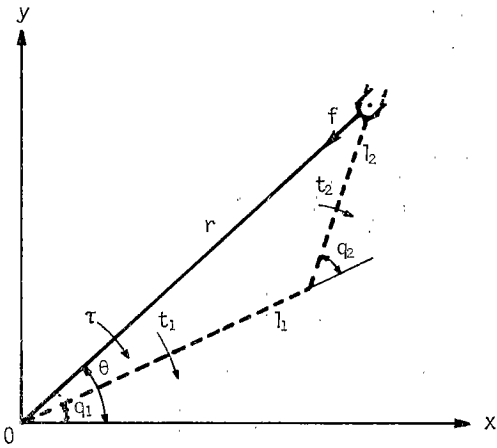


Fig. 6 Relationship between A- and P-manipulators in the Cartesian coordinates

ータ駆動回路への指令値とした。また、各サンプリング時ごとのセンサ情報、モータ駆動指令値をデータファイルに取り込み、必要に応じて、プロッタ等へ出力した。

3.2 制御系の構成

3種類のマニピュレータを用いることにより、6種類の異構造 BMSC の組合せが可能である。ここでは、その中の一例として、マスタにP形、スレイブにA形を用いた場合の制御系の構成法について示す。

Fig. 6 に示すように、操作領域と作業領域に共通な直交座標系 $x-y$ を考える。ここで $P^m = (\theta, r)^t$, $P^s = (q_1, q_2)^t$ とし、(1)式、(2)式より次の関係式を得る。

$$l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) = r \cos \theta \quad (12)$$

$$l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2) = r \sin \theta \quad (13)$$

(12)式、(13)式より、 $P^s_0 = (q_{10}, q_{20})^t$ は次のように

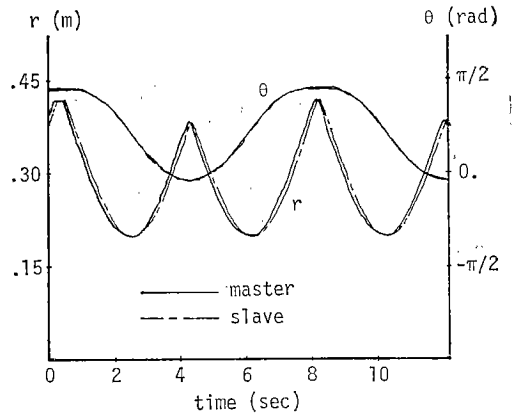


Fig. 7 Position trackerbility of the slave in the P-A system

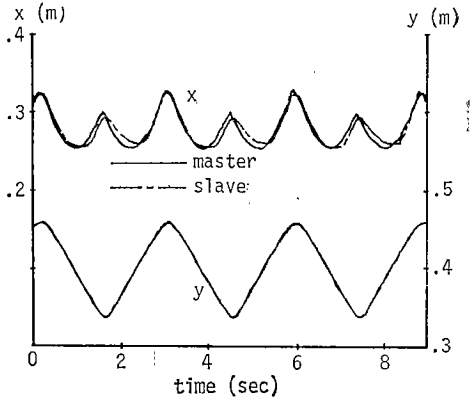


Fig. 8 Position trackerbility of the slave in the P-O system

Table 2 Coordinate transformations in six types of BMSCs

P	[A]	[O]	
	$q_{10} = \theta - \text{atan} 2(l_2 \sin q_{20}, l_1 + l_2 \cos q_{20})$ $q_{20} = \pm \arccos C_1$ $J_{11} = 1$ $J_{21} = \cos C_2 / C_3$	$J_{12} = 0$ $J_{22} = -r / l_2 C_3$	$x_0 = r \cos \theta$ $y_0 = r \sin \theta$ $J_{11} = -r \sin \theta$ $J_{21} = \cos \theta$
O	[A]	[P]	
	$q_{10} = \text{atan} 2(y, x) - \text{atan} 2(l_1 \sin q_{20}, l_1 + l_2 \cos q_{20})$ $q_{20} = \pm \arccos C_4$ $J_{11} = \cos(q_{10} + q_{20}) / C_3$ $J_{21} = \sin(q_{10} + q_{20}) / C_3$	$J_{12} = -x / l_2 C_3$ $J_{22} = -y / l_2 C_3$	$\theta_0 = \text{atan} 2(y, x)$ $r_0 = [x^2 + y^2]^{1/2}$ $J_{11} = -\sin \theta_0 / r_0$ $J_{21} = \cos \theta_0 / r_0$
A	[P]	[O]	
	$\theta_0 = \text{atan} 2(l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2), l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2))$ $r_0 = [l_1^2 + l_2^2 + 2l_1 l_2 \cos q_2]^{1/2}$ $J_{11} = 1$ $J_{21} = l_2 \cos C_5 / r_0$	$J_{12} = 0$ $J_{22} = l_2 \sin C_5$	$x_0 = l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2)$ $y_0 = l_1 \sin q_1 + l_2 \sin(q_1 + q_2)$ $J_{11} = -y_0$ $J_{21} = -l_2 \sin(q_1 + q_2)$

($C_1 = (r^2 - l_1^2 - l_2^2) / 2l_1 l_2$, $C_2 = \theta - q_{10} - q_{20}$, $C_3 = l_1 \sin q_{20}$, $C_4 = (x^2 + y^2 - l_1^2 - l_2^2) / 2l_1 l_2$, $C_5 = \theta - q_1 - q_2$)
 ([] : slave)

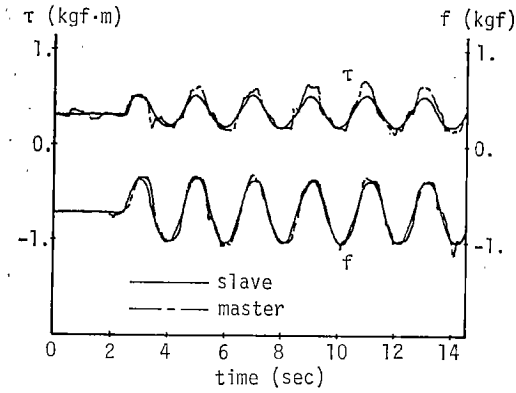
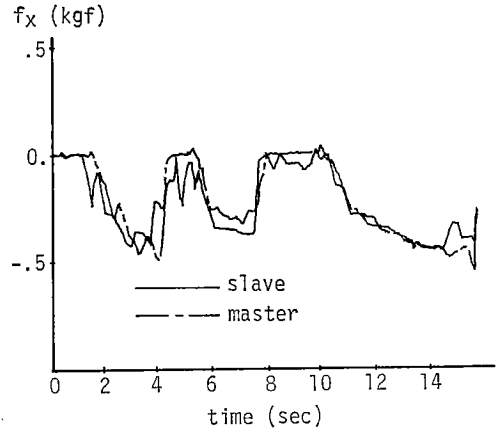
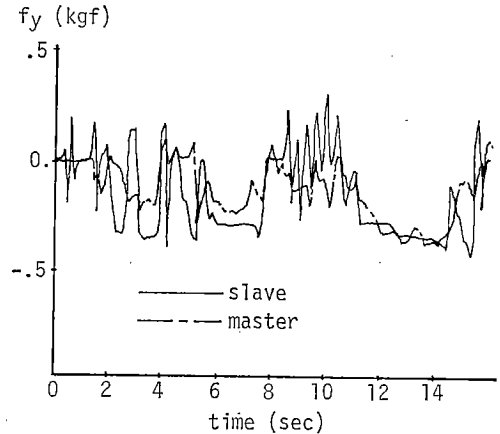


Fig. 9 Force trackerbility of the master in the P-A system



(a) Force trackerbility in the x direction of the master in the O-A system



(b) Force trackerbility in the y direction of the master in the O-A system

Fig. 10

求まる。

$$q_{10} = \theta - \psi \tag{14}$$

$$q_{20} = \pm \arccos \beta \tag{15}$$

$$\psi = a \tan 2(l_2 \sin q_{20}, l_1 + l_2 \cos q_{20}) \tag{16}$$

ここで、 $\beta = (r^2 - l_1^2 - l_2^2) / 2l_1l_2$ である。

一方、 $F^m = (\tau, f)^t$, $F^s = (t_1, t_2)^t$, $V^m = (\dot{\theta}, \dot{r})^t$, $V^s = (\dot{q}_1, \dot{q}_2)^t$ とすると、 F^m_0 , V^s_0 は (4) 式、(6) 式および J により求めることができる。ただし、 J は、(12) 式、(13) 式の両辺を θ, r に関して偏微分し、 $\partial q_1 / \partial \theta, \partial q_2 / \partial \theta, \partial q_1 / \partial r, \partial q_2 / \partial r$ について解くことにより次のように求まる。

$$J = \begin{bmatrix} 1 & \cos \alpha / l_1 \sin q_{20} \\ 0 & -r / l_1 l_2 \sin q_{20} \end{bmatrix} \tag{17}$$

ここで、 $\alpha = \theta - q_{10} - q_{20}$ である。

(9) 式、(11) 式中の係数行列 C および D は次のようにして決定した。モータ駆動系の伝達特性を周波数応答法により求め、これを一次遅れ系で近似した。Fig. 2 および Fig. 3 のブロック図に従って、位置および力制御系をモデル化し、さらにコンピュータによるソフトウェアサーボを行うため、O 次ホールド等を付加し、全体をディジタル制御系として安定ゲインを求めた。さらに、実際に全体システムを動作させ、安定限界内のゲインの中で、動作が良好なものを試行錯誤により求めた。なお、他の組合せの BMSC については、その座標変換を Table 2 に示す。

Table 3 Comparison of the computing time

slave \ master	A	P	O
A	7.7	9.6	10.9
P	11.2	—	10.1
O	11.0	10.1	—

unit : msec

4. 実験結果と考察

異構造 BMSC の基本的性能を調べるため、(i)スレイブのマスタに対する位置追従性、(ii)マスタのスレイブに対する力追従性、(iii)制御系の演算実行時間、の観点から基礎実験を行った。

スレイブの位置追従試験は、スレイブを自由運動ができる状態とし、マスタの操作端に周期的な、あるいは手でランダムな動作を与え、両者の位置データを比較して行った。Fig. 7 は、P 形をマスタ、A 形をスレイブとした時 (P-A システム) の位置追従の様子を示したものである。マスタの操作端に周期運動を入力し、マスタ側の関節座標系で位置の時間変化の比較を行った。スレイブはマスタの動きに滑らかかつ安定に追従している。ただ

Table 4 Comparison of the computing time in the improved BMSCs

slave \ master	A	P	O
A	15.8	14.1	11.9
P	14.1	—	10.1
O	12.3	10.4	—

unit : msec

Table 5 Means and standard deviations of working time consumed in crank turning task

	subject A	subject B
A-A	10.6 (2.0)	18.2 (2.5)
P-A	12.4 (0.77)	20.7 (1.9)
O-A	10.9 (0.74)	18.6 (3.1)

unit : second, () : standard deviation

し、スレイブのr方向にわずかな遅れが見られるが、これはA形スレイブマニピュレータの第2関節に用いられたアクチュエータの出力不足によりマスタ側のスピードに追従できなかったものである。

Fig. 8は、P形をマスタ、O形をスレイブとした時(P-Oシステム)の位置追従の結果である。マスタ操作端の周期運動に対し、スレイブが良好に追従していることがわかる。

マスタの力追従性の試験は、次のように行った。まず、マスタ操作端を操作空間上の一点に固定する。スレイブ手先に、加振器を用いて、任意の方向から周期的な力を加える方法と、人間の手でランダムな力を加える方法の

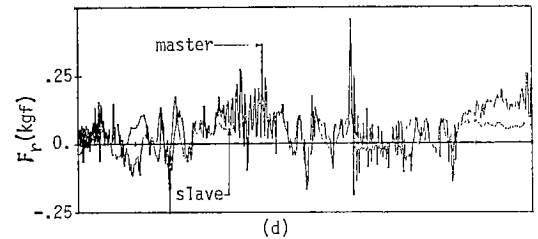
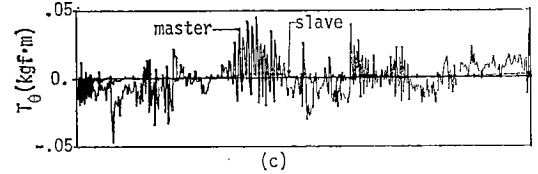
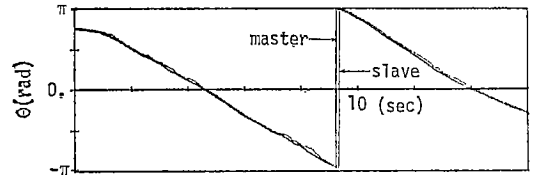
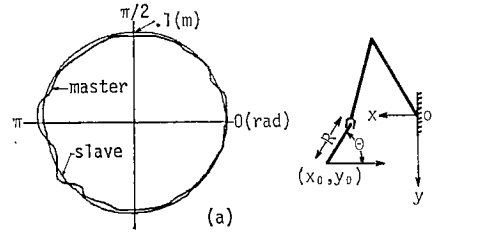


Fig. 11 Experiment results of the crank turning motion

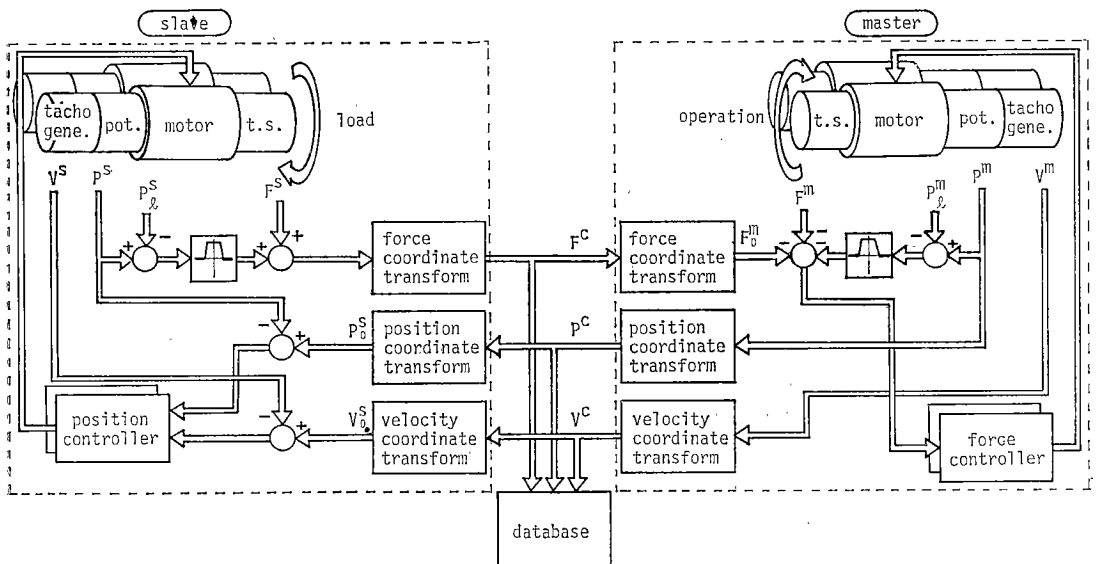


Fig. 12 Blockdiagram of the improved bilateral control system

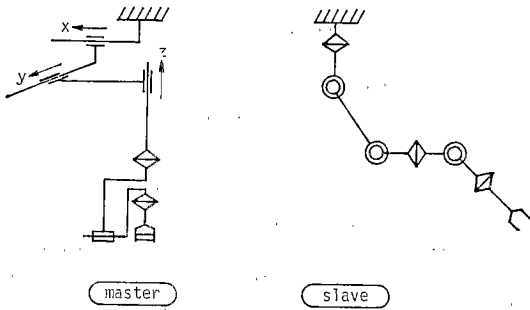


Fig. 13 Configurations of two types of 6-d.o.f. manipulators

2方法により、両者のトルクセンサ出力値を比較した。

Fig. 9は、P形をマスタ、A形をスレイブとした時(P-Aシステム)の実験結果であり、両者の出力値をマスタ関節座標系で比較したものである。加振周波数は0.5 Hzである。マスタ側の出力がスレイブ側の出力に動的に良好に追従していることがわかる。Fig. 10は、O形をマスタ、A形をスレイブとした時(O-Aシステム)の力追従試験の結果である。この場合、スレイブ側への力の入力を手動により行った。高い周波数に対しては応答が鈍いものの、全体的にはほぼ良好な追従性を示している。ただし、スレイブ側の力ゼロ付近では振動が見られるが、これは、スレイブの各関節に存在する機械的ガタの影響によるものである。

Table 3は6種類の異構造BMSCを行った時、それぞれの制御に必要な計算機の実行時間を示したものである。ここで、従来方式との比較を示すため、同一の関節形マニピュレータによるBMSC(A-Aシステム)も行いその実行時間も示してある。全ての組合せについて、ほぼ10 ms程度で実行することができた。ただし、ここではFORTRAN言語を用いており、座標変換、モータのサーボに要する計算等には30行程度の実行文が必要となった。また、実行時間は1,000回の平均値を示したものである。

以上の基礎実験に加えて、より実用的な作業への適用例としてクランク回し作業の実験を行った。Fig. 11はO形マスタとA形スレイブによるクランク回しの実験結果であり、(a)は、マスタとスレイブの平面上での位置を比較したもので、また(b),(c),(d)は横軸に時間を取り(スケールは共通)マスタ及びスレイブのクランク回転方向の角度 θ 、クランク軸回りの発生トルク T_θ 、クランクラジアル方向の発生力 F_r をそれぞれ示したものである。(c),(d)に示されたクランク軸周りの発生トルク及びクランクラジアル方向の力の値は、スレイブとマスタのそれぞれの関節で発生しているトルクや力の測

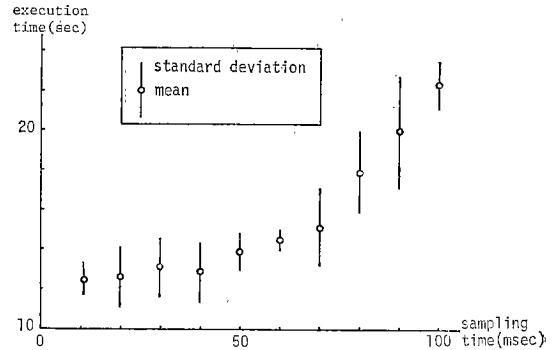


Fig. 14 Execution time versus sampling time delay in crank turning motion

定値から計算により求めたものである。(b)よりクランクが非常に滑らかに回転している様子がわかる。また(d)よりラジアル方向にもそれ程過大な力が働かず(0.15 kgf程度)、作業が効果的に行われていることが示された。なお、クランクの半径は100 mm、中心座標は $x_0=366$ mm、 $y_0=77$ mmである。

以上のように、簡単なマニピュレータを用いた基礎実験により、本方式が従来方式と同様に滑らかかつ安定な位置・力追従特性を備え、実際の作業にも適用可能なことが示された。一方、この実験を通じ、次のような問題点も判明した。

- ① マスタとスレイブの動作領域が異なるため、どちらかの限界を超えて操作が行われる場合、あるいは特異点に近づく場合、誤動作や機構破損の原因となり易い。
- ② 組み合わせるマニピュレータによって、それぞれ別個の座標変換が必要となり、汎用性が乏しい。
- ③ 各関節に機械的なガタがある場合、発振などが起き易く、不安定性の原因となる。

上記の問題点に対する解決策として、③については、これは特に本方式固有の問題ではないが、ハードウェア設計の際、駆動系には特にガタの少ない構造、例えばダイレクトドライブ方式などを適用することが考えられよう。

問題点②については、例えば直交座標系のような共通座標系を導入し、座標変換を行う場合は一度この共通座標系へ変換を行い、その後共通座標系から対象となる関節座標系へ変換を行う方式が考えられる。また、問題点①については、マスタ、スレイブの各関節が可動範囲の限界や特異点に近づいた場合、逆方向へ力が働くようにマスタへフィードバックする方法が考えられる。

①、②の二点を考慮に入れ改良を行った異構造BMSCシステムのブロック図をFig. 12に示す。このような方式を用いることにより、図中の点線で囲んだ部分をモジ

ユーリ化することができ、様々なマニピュレータの組合せが行い易く、より汎用性を高めることが可能となる。図中 P_2^s, P_2^m は、それぞれマスタ、スレイブの可動範囲の限界を示しており、 P^s, P^m がこの値に近づくと、マスタに一定の力が働くようになっている。Table 4 はこのようなシステムを構成した時に必要となる実行時間を示したものである。この場合も、ほぼ 10 数 ms で演算が実行されることが示された。

5. 作業性評価

異構造 BMSC が実際の作業を行う上で有効であるかどうかを調べるための作業性評価の実験を行った。本方式が、操作性、作業性を高める可能性を持つことは述べたが、現実の問題としては、同構造 BMSC と比較して、演算時間などによるサーボの遅れなどもあり、これらが作業性や操作性に及ぼす影響も十分考えられる。そこで、ここでは、先に述べたクランク回しを一つの作業実験例として取り上げ、それぞれの BMSC を用いて、作業にかかる時間を測定することにより、作業性の定量評価を行うこととした。実験では、スレイブマニピュレータは A 形とし、マスタを A 形、P 形、O 形と変えて、3 種類の異構造 BMSC を用いて作業実験を行った。被験者は 2 人とし、被験者 A は比較的バイラテラルマスタスレイブ方式による作業に習熟しており、一方被験者 B はバイラテラルマスタスレイブ方式ではほとんど作業を行ったことがないものである。クランクは第 4 章で示したものをを用い、一回転させるのに必要な時間を計測した。一つの実験は 5 回以上行い、作業に要する時間の平均と標準偏差を求めた。その結果が Table 5 である。A-A は従来の同構造マニピュレータを用いた BMSC であり、P-A, O-A が異構造 BMSC である。() 内が標準偏差を示している。

被験者 A と被験者 B を比較すると習熟度の違いから、平均と標準偏差に大きな差が認められる。一回の作業に要する時間の差はどれも 8 秒程度であり、また標準偏差も被験者 A の方が小さく、作業性が習熟度に大きく依存していることが定量的に明らかである。

A-A システムと P-A システムについて比較をすると、両被験者とも P-A システムでの平均時間が大きくなっている。これは、実験装置に問題があり、P 形マスタ r 方向の摩擦がかなり大きいため(最大数百 g 重程度)、場所によっては力のフィードバックが十分行われなかったことによるものである。しかしながら、標準偏差は両被験者とも小さくなっており、P-A システムでは毎回安定した操作が行われたことを示している。

A-A システムと O-A システムについて比較をする

と、両被験者とも平均時間については有意な差は認められない。標準偏差については、被験者 A では O-A システムでは小さくなっているが、被験者 B では大差はない。したがって、被験者 A は、O-A システムでは比較的安定な操作が行えたといえよう。これは、関節形と比較して、直交座標形が xy 平面では力が等方的に発生し易いため、安定した力フィードバックが行えたためと考えられる。

次に本システムを実際的な 6 自由度のマニピュレータに適用するため、次のような考察を行った。Fig. 13 に示すように、マスタ装置としては非拘束形として提案されている直交座標形マスタ¹³⁾を、またスレイブマニピュレータとしては一般的な多関節形(R-P-P-R-P-R, R:ローテーション機構, P:ピポット機構)スレイブを考え、これらを組合わせた異構造 BMSC をモデルとして用いた。制御に必要な演算を同じ計算機で実行したところ、(3)式の変換に 35 msec, ヤコビ行列を求めるのに 23 msec, さらに(4)~(12)式で表わされるサーボ演算に 2.56 msec かかり、全体で約 60 msec 必要であった。ここで、60 msec の時間遅れを持つ場合、効果のある BMSC が構成できるかどうかの問題である。そこで、2 自由度の実験装置をもちい、サンプリング時間が大きくなる場合、作業性にどのような影響があるかを実験的に調べることにした。作業は、先の実験と同様に、P-A システムを用いてクランク回しを行い、一回転に要する作業時間を調べた。Fig. 14 はその結果である。横軸にサンプリング時間を、縦軸に作業時間を示し、5 回の作業時間の平均と標準偏差を示してある。サンプリング時間は 11 msec から 100 msec までの間で 10 点を取って行った。図から明らかなようにサンプリング時間が增大するに従い、作業時間が大きくなった。これは、サーボにおける時間遅れが大きくなるに従い系が不安定になりやすく、サーボ系のゲイン((9), (10)式中の C と D)をあまり高くできず、力の伝達が正確に行われにくくなるからである。特に 80 msec 以上では、マスタを慎重に操作しないと発振しやすくなり、大きな力がスレイブ側に発生し、作業を中断しなければならぬ場合も生じた。サンプリング時間が短い場合は、一般にサーボ系のゲインも高めに設定でき、マスタも軽く動いて操作しやすく、作業も行いやすかった。60 msec 付近ではマスタが幾分重く、多少作業が行いにくい場合も生じたが、作業は実行できることが判明した。

これらの実験結果から、異構造 BMSC の作業性に関して次のような結論を得ることができる。

① 力感覚を用いた遠隔操縦では、操作者の習熟度が作業性に大きく影響を及ぼす。

② 作業に要する平均時間については、同構造、異構造間で特に有意な差は認められない。

③ 作業の安定性を示す標準偏差については、習熟度の高い被験者では、異構造 BMSC で良い値を示しており、特に O-A システムで小さい値が示された。

④ サンプリング時間が増大するにつれ、マスタの操作が行いにくくなり、特に 80 msec 以上では、不安定な現象が起きやすく、作業時間も急激に増大した。

以上より、このような簡単な実験から一般的な結論を導くことはできないが、少なくとも、異構造 BMSC が同構造 BMSC と比較して作業性の点で、特に劣るとも言えるような結論は得られなかった。異構造 BMSC の特性を活かしマスタマニピュレータとスレイブマニピュレータを作業に応じて最適に設計することができるならばより操作性、作業性の良い BMSC を構成することが可能である。

6. 結 論

遠隔地で稼働するマニピュレータをオペレータが正確に遠隔制御するための制御方法について考察を行った。本研究で得られた主な結論は次のとおりである。

1. マニピュレータの遠隔制御として有効なバイラテラルマスタスレイブ制御方式では、スレイブマニピュレータの作業性と同時に、マスタ装置の操作性が重要である。これらはそれぞれの機構に大きく依存するため、従来のマスタとスレイブが同一構造のシステムは、この点を改良するためには限度がある。そこで、マスタとスレイブの構造に依存しない異構造バイラテラルマスタスレイブ制御方式を提案した。本方式を用いることにより、BMSC システムを構成する際に、マスタとスレイブをそれぞれの目的に応じた独自の構造をもつマニピュレータとして設計することが可能となり、システム的设计自体も容易となり得る。また、マスタとスレイブをモジュール化することが可能となり、汎用性が高まると同時に、一つのマスタで様々なスレイブを操縦できるため作業性の向上にもつながり、またシステム自体のメンテナンスにも有利である。

2. 3 種類の 2 自由度マニピュレータを用いた実験を行い、マスタの力追従性、スレイブの位置追従性、演算時間の評価を行った。座標変換とサーボに要する演算時間はほぼ 10 ms 程度であり、追従性も十分良好であることが示された。

3. 異構造 BMSC の作業性と操作性を評価するために、クランク回し作業に要する時間を測定し、同構造 BMSC と異構造 BMSC について比較を行った。この

結果、それぞれの間で作業性については特に有意な差は認められなかったが、バイラテラルシステムに慣れた被験者では、異構造 BMSC で安定な操作が得られる場合が認められた。

4. サンプリング時間による遅れが 70 msec 程度までは、十分に作業が行われることが判明した。

5. 6 自由度モデルに適用した場合、サンプリング時間は 60 msec 程度であり、本異構造 BMSC の適用可能性が明らかとなった。

なお、今後の研究課題としては、より実用的な自由度を有するマニピュレータを制御する場合の演算処理時間の短縮化がある。高速な計算機ハードウェアとともに、効果的な演算アルゴリズムの開発が必要である。また、マスタを高速で操作する場合は、マスタとスレイブの両者のダイナミクスを考慮した制御系の構成法を考えなければならない。さらに、操作性や、汎用性等を考慮に入れたマスタ装置の設計も重要な開発課題と言えよう。

参 考 文 献

- 1) J. R. Burnett: Force-Reflecting Servos Add "Feel" to Remote Controls, Control Engineering, July, pp. 82-87, 1957
- 2) 藤井澄二: バイラテラルサーボ機構の理論, 日本機械学会誌, Vol.62, No.480, pp. 64-69, 1959
- 3) 富成襄: 双動形サーボ機構の Signal-Flow Diagram と Matrix による解析と実験, 自動制御, Vol.6, No.2, pp. 2-10, 1959
- 4) 江尻正員: バイラテラルサーボ機構の特性, 日本機械学会論文集, Vol.31, No.230, pp. 1484-1491, 1965
- 5) 井上博允: 人工の手の計算機制御, 日本機械学会誌, Vol.73, No.618, pp. 30-38, 1970
- 6) 中野栄二: 多関節マニピュレータの機構と制御, 計測と制御, Vol.15, No.8, pp. 1-8, 1976
- 7) 橋野 賢, 中野栄二: メラームのマスタスレイブ駆動, 機械技術研究所研究発表会概要, 昭和52年6月16日, p. 1, 1977
- 8) 大塚 清: 危険作業の無人化と遠隔操縦ロボット, 計測と制御, Vol.18, No.1, pp. 107-112, 1979
- 9) 長井昭夫, 松島皓三: 操縦型ミニ・マニピュレータ, 計測自動制御学会論文集, Vol.16, No.1, pp. 91-97, 1980
- 10) 谷 和男: 遠隔マニピュレーションにおける対象物移動補償, 計測自動制御学会論文集, Vol.18, No.3, pp. 85-91, 1982
- 11) 平井成興, 佐藤知正: 言語介在型マスタスレイブマニピュレータシステム, 計測自動制御学会論文集, Vol.20, No.1, pp. 78-84, 1984
- 12) J. Denavit et al.: Velocity, Acceleration, and Static-Force Analyses of Spatial Linkages, Trans. of ASME, Ser. G. Vol.87, pp. 903-910, 1975
- 13) 中野栄二, 他: 非拘束形 6 自由度バイラテラルマスタマニピュレータの開発第 1 報, 第 3 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 229-230, 1985



新井健生 (Tatsuo ARAI)

昭和50年東京大学工学部計数工学科卒業。昭和52年同大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年通商産業省工業技術院機械技術研究所入所。多関節マニピュレータの制御、移動ロボットの機構と制御、自動縫製システムの開発などの研究に従事。現在、同所ロボティクス部自律機械課主任研究官。

(日本ロボット学会正会員)



中野栄二 (Eiji NAKANO)

昭和40年東京大学工学部産業機械科卒業。昭和45年同大学大学院工学系研究科修士課程修了。同年通商産業省工業技術院機械技術研究所入所。多関節マニピュレータ、知能ロボット、福祉ロボットの研究開発に従事。現在、同所企画室長。工学博士

(日本ロボット学会正会員)

Bilateral Master-Slave Control for Manipulators with Different Configurations*

Tatsuo ARAI** Eiji NAKANO***

ABSTRACT

A bilateral master-slave control method for manipulators with different configurations is proposed to efficiently control remote robots working in hazardous and critical fields such as nuclear power plants, space and underwater. In this method any types of master device and slave manipulator are able to be connected with each other. Therefore it has some advantages over the conventional method in which the same types of master device and slave manipulator are employed. The first advantage of this method is to improve manoeuvrability in operation, the second to increase versatility and the third to be applied to a teaching operation of complex tasks in industries. The basic experiments using three types of manipulators have been done to check the feasibility of the proposed method. In these experiments the force trackerbility, the position trackerbility of the slave and the computing time of the digital computer required for the operations of coordinates transformations, position and force servos, are examined. The results of these experiments and more practical experiments, such as a crank turning motion, show the reasonable feasibility and the broad applicability of the proposed method.

Key words : Robot, Teleoperation, Bilateral control, Master-slave manipulator

* Received March 4, 1986

** Robotics Department, Mechanical Engineering Laboratory

*** Reserch Planning Office Mechanical Engineering Laboratory