異構造マスタスレーブマニピュレータにおける マルチ操作モードとその作業性

松日楽 信 人* 朝 倉 誠* 番 場 弘 行*

Multi-control Modes for a Master-slave Manipulator with Different Configurations and Its Maneuverability

Nobuto Matsuhira*, Makoto Asakura* and Hiroyuki Bamba*

The new master-slave control method is proposed on multi-control modes for a master-slave manipulator with different configurations. A virtual internal model following control is applied to position symmetrical bilateral control. In our method, a master-slave control mode (MS-mode), a joystick control mode (JS-mode), a master arm offset mode (OM-mode), and a servo hold mode (LK-mode) are able to be realized by operating the desired output values of the virtual internal models in a common control algorithm. There is compliant characteristic between the master and slave models. In the result of evaluation experiments between the MS-mode and the JS-mode, although the MS-mode is superior to the JS-mode in manipulating a fine task, our JS-mode is found to be useful to carry out such a task compared with a conventional JS-mode which only directs the rates for the slave arm. In the JS-mode, the slave arm moves to the position where the reaction force of the slave arm and the operating force of the master arm are balanced. Thus, it is possible either to control an overload for an object and to control the contact force. The validity of the proposed method is verified.

Key Words: Master-slave Manipulator, Virtual Internal Model, Symmetrical Bilateral Control, Multi-control Modes, Maneuverability

1. は じ め に

マスタスレーブマニピュレータ (MSM) は原子力施設内や宇宙、深海など人間が容易に近づけない場所での作業に、人間が離れた場所から遠隔で作業を行うためのロボットである。また、その作業内容は非定型である場合が多く、人間の臨機応変な判断が必要であり、なかなか自動化は困難である。MSM は当初、マスタアーム（以下マスタ）とスレーブアーム（以下スレーブ）との形状が相似形であったが、計算機的能力が向上したため、マスタとスレーブの形状が異なる場合でも、実時間で座標変換演算が可能となり、いわゆる異構造 MSM の研究が行われるようになった[1][2]。筆者らも MSM の操作性向上のため異構造 MSM の研究開発を行ってきた[3]。異構造 MSM では、計算機が介在しているので、高機能化が容易である。これまでに、通常のマスタスレーブ制御である位置指令モードと、従来からよくロボットの操縦に使用されてきたジョイスティックによる速度指令モードの両方の使い方が可能

であるものが多い[4]~[9]。本論文では前者をマスタスレーブモード (MS モード)、後者をジョイスティックモード (JS モード) と呼ぶことにする。JS モードではマスタを基本姿勢でサーボロックするか、復元力を持たせることによりジョイスティック的に用いることが多い。このほかに、異構造ではマスタとスレーブの動作範囲が異なるために、マスタの原点をオフセットし、スレーブの動作範囲をカバーする機能も必要である。

これまで、JS モードに関しては、単にスレーブ先端に速度指令を与えるだけであったので、拘束を伴うような細かな作業は困難であった。あるいは、コンプライアンス制御をスレーブ側に取り入れることも考えられるが、コンプライアンス制御であっても、変位が大きいと対象物に与える負荷が大きくなり、場合によっては作業性が低下する。

従来、異構造 MSM の研究では、そのシステム構成や制御手法についての報告はあるが、操作モードの実現方法に関する報告はない。異構造 MSM においては MS モードと JS モードは重要な操作モードであるに関わらず、個々に議論されてきた。筆者らは、仮想内部モデルを用いたバイラテラル制御構成により、これらの操作モードを統一的に扱う制御方法を提案する。さらに、MS モードと JS モードについて作業性評価実験

原稿受付 1994 年 10 月 27 日

* (株) 東芝 研究開発センター

* Toshiba Corporation Research and Development Center

を行い、本制御方式の有効性を確認するとともに JS モードの作業性向上を確認したので、これらについて報告する。

2. 提案するバイラテラル制御方式

2.1 仮想内部モデルを用いた対称型バイラテラル制御

古田・小菅ら[10]は MSM に仮想内部モデル追従制御を適用し、動特性を任意に設定できることを示した。内部モデルを用いてスレーブ反力をマスタに伝えているため過渡的には正確なバイラテラルを実現できないが、衝突時や接触時の安定性に優れている。また、文献[10]では具体的な例として仮想内部モデルを用いた力帰還型バイラテラル制御が示されている。本研究では、対称型バイラテラル制御に仮想内部モデルを用いた、従来の対称型では摩擦や慣性の補償ができず、マスタの操作性が悪いという問題があったが、理想的な対称型を内部モデルで構成し、その規範出力に追従動作させることにより解決される。本方式は宮崎・萩原[11]の並列型や井上ら[12]のインピーダンス制御にも類似だが、内部モデルを用いている点やマスタ・スレーブ間にコンプライアンスがある点で異なる。すなわちマスタ、スレーブそれぞれに仮想内部モデルを設定し、モデル間で対称型制御を行い、それらの運動に実際のマスタ、スレーブを追従させるものである。マスタ、スレーブのモデルのパラメータを変えることにより、操作性・作業性を調整できるので、異構造 MSM には適していると考えられる。Fig. 1 に仮想内部モデル追従型制御のブロック図を、Fig. 2 に仮想内部モデルによる対称型バイラテラル制御のブロック図をそれぞれ示す。

このとき、仮想内部モデルの運動 (X) は次のように表せる。

$$F_m - \tau = M_m \ddot{X}_m + B_m \dot{X}_m \quad (1)$$

$$K_f F_s + \tau = M_s \ddot{X}_s / K_p + B_s \dot{X}_s / K_p \quad (2)$$

$$\tau = K_c (X_m - X_s / K_p) + K_v (\dot{X}_m - \dot{X}_s / K_p) \quad (3)$$

Fig. 1 Proposed MSM control

Fig. 2 Symmetrical bilateral control using virtual internal models

ここで、 τ : マスタ・スレーブ間の結合力、

F : 操作力/反力、

M, B : 仮想内部モデルの質量および粘性係数、

K_c, K_v : 仮想内部モデル間の対称型制御の位置ゲインおよび速度ゲイン、

K_f, K_p : 力反射率および運動伝達比

を表す。なお、添字 m, s はそれぞれマスタ、スレーブを表している。また、Fig. 1 において、 ω は実際のアームへの目標関節角速度、 θ は実際のアームの関節角度、さらに X' はモデルの運動値にオフセット補正した出力値である。これについては次章で説明する。目標位置追従制御器では目標位置を目標関節角度に変換し、追従制御を行っている。

2.2 安定性の検討

系の安定性は内部モデル出力への追従制御特性に依存するが、ここでは追従帯域が十分に高いとし、内部モデルの安定性問題として簡単な検討を行う。内部モデルは Fig. 3 に示すように機械的な対称型バイラテラル構成を取っているため、受動性原理が成り立ち安定である。

まず、スレーブが非拘束のときの運動を考える。簡略化のため $K_f = K_p = 1$ とする。式(1)~(3)、 $F_s = 0$ より、定常状態では、

$$\begin{aligned} \dot{X}_s &= (K_v s + K_c) F_m / \{ (M_m s + B_m)(M_s s + B_s) s \\ &\quad + (K_v s + K_c)(M_m s + B_m + M_s s + B_s) \} \\ &\rightarrow F_m / (B_m + B_s) \end{aligned} \quad (4)$$

となる。したがって、スレーブの速度はマスタ操作力に比例する速度に収束する。

スレーブが対象物と接するような拘束時は、対象物をバネ定数 K_w 、変位を X_w で表すと対象物に加わる力 F_w は、次式の関係となる。

$$F_w = K_w X_w, \quad F_s = -F_w \quad (5)$$

また、十分追従性が高いとして定常状態で $X_s = X_w$ とすれば、

$$\begin{aligned} X_w &= (K_v s + K_c) F_m / \{ (M_m s^2 + B_m s)(M_s s^2 + B_s s + K_w) \\ &\quad + (K_v s + K_c)(M_m s^2 + B_m s + M_s s^2 + B_s s + K_w) \} \\ &\rightarrow F_m / K_w \end{aligned} \quad (6)$$

となる。式(5)(6)より

$$F_s = -K_w X_w = -F_m \quad (7)$$

したがって、スレーブに加わる力とマスタにかける力は釣り合う。また、このときの変位は次式となる。

Fig. 3 Mechanical MSM model with mode change switches

$$Xw = KcXm / (Kc + Kw) \quad (8)$$

次に、対象物の剛性の影響を考える。式(7)(8)より

$$\begin{aligned} F_m &= KwXw = KcKwXm / (Kc + Kw) \\ &= KwXm / (1 + \alpha) = KcXm\alpha / (1 + \alpha) \end{aligned} \quad (9)$$

ここで、 $\alpha = Kw/Kc$ とした。

$Kc \gg Kw$ の対象物であれば、マスタに対象物の剛性が正確に伝わる。また、 Kw が大きくなるとアームの追従帯域が十分に高いという前提が成立しなくなり、力制御の安定性が問題となるが、本制御方式の場合、 $Kc \ll Kw$ では、

$$F_m = KcXm \quad (10)$$

となり、マスタ・スレーブ間の介在コンプライアンスにより、安定性を保つことができる。

3. マルチ操作モード

3.1 操作モードの分類

異構造の MSM では、その構造が異なるためはもちろん、そのほか計算機が介入するためにいろいろな操作モードが付加できる。異構造 MSM でよく用いられているのは、位置に対応させる通常の MS モードとジョイスティック的に速度指令を与える JS モードである。一般には、力感覚の必要な細かな作業は前者で、大体の位置操作は後者で使い分けしている。また、マスタはスレーブよりも一般に小さいので、動作範囲に対応させる必要がある。マスタからスレーブへの運動伝達比を変えるのも一案ではあるが、伝達比を大きくすると細かな操作には不適である。そこで、マスタが先に動作限界に達したら、マスタの原点を移動しオフセットを与え、再び作業を継続することでスレーブの広い動作範囲をカバーすることができる。この操作をマスタオフセットモード (OM モード) と呼び、さらに起動待機時の状態をサーボロックモード (LK モード) と呼ぶと、おもに 4 つの操作モードに分類される。

このほかにスレーブの運動方向やコンプライアンスに異方性を持たせたり [5]、拘束面を持たせたり [7]、マスタからスレーブへの対応点を変更する機能 [9] なども提案されているが、これらはスレーブの制御に関するものであり、操作モードとして大きく異なるものではない。

3.2 マルチ操作モードの実現方法

Fig. 1 の制御方式では仮想内部モデルの運動出力値に実際のアームが追従するので、操作モードの切り換えを行うのに出力値を操作することによりマルチ操作モードを実現することができる。すなわち、2.2 節で述べたように仮想内部モデルを使うことにより、操作力でスレーブに速度指令を与えることができるので、MS モードと JS モード、さらに OM モードや LK モードを、同じ制御系で切り換えることが容易にできる。これら

は、Fig. 3 に示す原点オフセットスイッチ (SW) により、(1) マスタ、スレーブともに動くモード (MS)、(2) スレーブのみ動くモード (JS)、(3) マスタのみ動くモード (OM)、(4) マスタ、スレーブともにロックされるモード (LK)、とアームの動作状態で Table 1 に示すように分類することができる。したがって、モード間の連続性を考慮してモデルの運動出力値にオフセット処理をすれば良いことがわかる。

Fig. 3 の 1 自由度の MSM モデルを用いて具体的に説明する。仮想内部モデルは質量 M 、粘性係数 B とからなり、マスタモデルとスレーブモデルはバネ K で結合されているものを考える。前述したように物理的には定常時、マスタとスレーブはコンプライアンスの分変位して力が釣り合うモデルである。さらに、このモデルにおいてマスタ、スレーブともに原点のオフセットスイッチを設け、この ON/OFF により、4 つのモードを切り換える。

ここで、位置追従系への目標位置は次のようになる。

$$X' = \begin{cases} X - X_o & (\text{SW: OFF}) \\ X_{\text{const}} & (\text{SW: ON}) \end{cases} \quad (11)$$

X は内部モデルの出力位置、 X_o は原点からのオフセット値を表す。 X_o は SW が OFF になる直前の X_o の値であり、内部モデルの位置と実際のアームの位置とを関係づける。 X_{const} は SW が ON になる直前の X' 値で一定値となり、目標位置を保持し続け、その結果、実際のアームはサーボロックされて動かない。すなわち、SW は実際のアームの動作を停止、運動させるスイッチになっている。SW が ON (ロックされる) では X_o がモデルとともに相対位置 X_{const} を保って運動し、OFF (フリーとなる) では X_o に対してモデルは運動するものとする。

たとえば、JS モードではマスタ原点 (X_{mo}) が仮想内部モデルのマスタ (X_m) とともに移動するので、マスタの相対位置は変化せず、スレーブのみが動く速度指令モードが実現できる。他も同様である。

4. 操作モードによる作業性評価実験と考察

次に、本制御方式で実現される MS モードと JS モードでの動作実験を行った。マスタはパンタグラフを用いた直交座標型であり、方向による慣性の差が小さい。また、スレーブは冗長自由度を有する 7 自由度のスマートなアームである [13]。実験に用いた MSM を Fig. 4 に示す。ここで、マスタ、スレーブともに手首関節の 3 軸は 1 点で交差しており、位置・力の対応点は手首関節とした。

とくに本制御方式では JS モードが特徴的なので、JS モードを中心に MS モードと比較しながら説明する。なお、JS モードでは操作性の観点から、姿勢については MS モードとしたハイブリッド構成になっている。位置追従制御系としては PD 制御としている。

また、実験に用いた仮想内部モデルのパラメータを Table 2 に示す。

4.1 MS モードでの特性実験

スレーブハンドを機械的に固定してマスタを Z (上下) 方向に MS モードで操作したときの、マスタ (M) とスレーブ (S)

Table 1 Control modes

	SW_m	SW_s
MS-mode	OFF	OFF
JS-mode	ON	OFF
OM-mode	OFF	ON
LK-mode	ON	ON

Table 2 Parameters of internal models

	x	y	z	roll	pitch	yaw
M_m	1.0	1.5	1.5	2.2	1.8	1.4
M_s	0.5	1.2	1.2	1.8	2.0	1.4
	[kg]			$[10^{-3}\text{kgm}^2]$		
B_m	22	21	21	0.14	0.14	0.14
B_s	44	39	39	0.25	0.25	0.25
	[Ns/m]			[Nms/rad]		
Kc	2.0	3.0	3.0	8.0	8.0	8.0
	$[10^3\text{N/m}]$			[Nm]		
Kv	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0
	[Ns/m]			[Nms/rad]

Fig. 4 Overview of MSM

のアームの変位 (Pz) と力 (Fz) を Fig. 5(a) に示す。マスタとスレーブの力はほぼ一致しているが、ハンドが拘束されているためアームの運動にはマスタ・スレーブ間のコンプライアンスの効果が表れていることがわかる。比較のために、スレーブ側を非拘束とした場合の運動を Fig. 5(b) に示す。100[msec] 程度の遅れがあるがスレーブがマスタに追従している。

4.2 JS モードでの特性実験

JS モードでの力特性について実験結果を Fig. 6, 7 に示す。

Fig. 6 はマスタの操作力として、力センサの入力に約 10[N] の信号を与えたものである。スレーブの正面 10[cm] のところには壁があるが、衝突前は一定速度で動作し、衝突したときの衝撃力はすぐに減衰し、安定して接触しているのがわかる。接触力はマスタ操作力に応じた荷重となっている。

たとえば、従来の速度指令では過大な力が対象物にかかることは明らかであり、また、コンプライアンス制御を取り入れても変位に応じて負荷がかかることになる。負荷を小さくするにはコンプライアンスをかなり大きくしなければならない。しかし、コンプライアンスが大きくなると、力が発生できず作業性が低下する。

Fig. 7 はスレーブ手先を固定し、Y(左右)方向について、マスタにかけた力とスレーブ先端での力をロードセルで測定したものである。コンプライアンス制御をスレーブに適用したとき

Fig. 5 Motion response in MS-mode

Fig. 6 Force response in JS-mode

Fig. 7 Relationship between operational force and contact force in JS-mode

とは異なり、マスタ操作力とスレーブ反力とがほぼ比例している。点線は不感帯を示し、マスタ側 3[N]、スレーブ側 5[N] とした。したがって、本 JS モードではマスタ操作でスレーブ側での力をコントロールすることも可能である。

このように JS モードでは、スレーブは仮想内部モデルを用いた対称型パラレル制御に基づき制御されているので、マ

(a) MS-mode

(b) JS-mode

Fig. 8 Peg-in-hole task

スタ操作力に比例した速度で運動し、対象物に接触するとスレーブの反力はマスタにかかる力と対応する力で釣り合い、過負荷を避けることができる。

4.3 MSモードとJSモードによる作業性評価実験

作業性評価実験として拘束的な作業であるピン挿入とハンドル回しをMSモードとJSモードでそれぞれ行った。なお、MSモード時、力反射率、運動伝達比は並進で50%, 1:1.5, 姿勢で20%, 1:1とした。操作者はMSM操作に熟練した27歳の男性である。

ピン挿入作業の結果をFig. 8に示す。ピン直径は20[mm]であり、隙間は0.02[mm]以下である。50[mm]間隔の3つの穴に対して交互に抜き差しした。ここでは挿入時にX(前後), Y(左右), Z(上下)方向に働くマスタ, スレーブの力のうち各方向で最大値の和を代表値とした。横軸は作業時間である。それぞれ12回程度繰り返し実験した。MSモードの方が負荷が小さく、作業時間が長い傾向がある。平均でみるとスレーブにかかる力はMSモード(14.6[N]), JSモード(33.4[N])でMSモードの方が約1/2, 同様に作業時間は10[sec], 5.4[sec]で約2倍であった。

次に、ハンドル回し作業の代表的な結果をFig. 9に示す。ハンドルの直径は22.5[cm]である。縦軸にスレーブの並進変位と並進力, 横軸に作業時間を示す。ここでもMSモードの方がハンドルに与える負荷が小さく、作業時間が短い。

2つの作業ともにMSモードの方が負荷が小さくスムーズに行っていることがわかる。しかし、従来の速度指令を与えるJSモードでは作業対象に大きな負荷がかかり、実際に作業が

(a) MS-mode

(b) JS-mode

Fig. 9 Handle rotate task

Fig. 10 Trajectories of handle rotate task in MS-mode

できなかったことを考えると、本JSモードにおいては大幅に作業性が向上したと言える。また、ピン挿入で時間的にJSモードが優るのは、位置決め of 操作量(移動量)に関係していると考えられる。ピン挿入では操作量が少なく、押し付けるだけでない動作によりスムーズに挿入されるので速い。MSモードでは、力を感じながら位置を合わせているので、その分若干時間がかかる。一方、ハンドル回しではある程度の誤差は許容できるものの軌道生成のための操作量が多いのでMSモードよりも位置決めのために時間がかかったと言える。MSモードでも円軌道の生成は難しいが、バイラテラルとなっているために逆にスレーブ側から動かされ軌道が生成されやすい。なお、位置指令型のMSモードの方が速度指令型のJSモードよりも位置決め性において優れていることは、すでに実験により確認している[9]。

Fig. 10にハンドル回しにおけるMSモードでのマスタとスレーブでの軌跡を示す。スレーブの軌跡はハンドルで拘束され

ているので、ほぼ直径22.5[cm]の円となっている。マスタ側ではコンプライアンスの影響により、多少歪んでいるが、滑らかに操作できていることがわかる。マスタからスレーブへの運動伝達比も設定通り($Kp=1.5$)に再現されている。以上より、ピン挿入、ハンドル回し作業ともに、2つの操作モードにより安定に作業が実現でき、本制御法の有効性が確認された。

5. ま と め

異構造 MSM において、仮想内部モデルを用いた対称型バイラテラル制御を採用し、マルチ操作モードを実現する制御方式を提案した。その結果、以下のことが確認された。

- (1) MS モード、JS モード、マスタオフセットモード、サーボロックモードの4つの操作モードを共通の制御系で切り換えることが可能となった。
- (2) 本制御方式ではマスタ・スレーブモデル間にコンプライアンスが介在した特性を有し、MS モード、JS モードともに拘束時の作業においても安定に作業が実現できた。
- (3) MS モードと JS モードによる作業性評価実験の結果、接触を伴うような繊細な作業には MS モードの方が対象物に与える負荷が小さく優れているが、JS モードでも作業が可能であることがわかった。
- (4) JS モードではスレーブはマスタ操作力とスレーブ反力が釣り合う位置へ運動するので対象物に無理な力がかからない。また、スレーブと対象物との接触力をマスタ操作によりコントロールすることも可能である。

以上、異構造 MSM の代表的な操作モードを統一的に扱う制御方法およびその作業性の実験結果について示した。これらの操作モードを作業内容によって切り換えることで、効率よく

作業を実行できるものと期待される。今後は、より操作性の優れた遠隔操作システムの構築を目指して行く予定である。

参 考 文 献

- [1] A. Bejczy and J.K. Salisbury: "Kinesthetic coupling between operator and remote manipulator," Proc. of the International Computer Technology, ASME, pp. 197-211, 1980.
- [2] 新井, 中野: "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ーブ制御", 日本ロボット学会誌, vol. 4, no. 5, pp. 469-479, 1986.
- [3] 松日楽: "異構造マスタスレーブマニピュレータ", 計測自動制御学会第18回ロボット工学部会研究会資料, pp. 1-10, 1992.
- [4] 戸田, 町田, 岩田, 川田: "宇宙用マスタ・スレーブ・マニピュレータ・システムの開発", 日本航空宇宙学会誌, vol. 35, no. 406, pp. 546-553, 1987.
- [5] 青木, 岩本, 中島, 山本, 住谷: "スマートマニピュレータにおける座標変換演算—各種作業モードの記述—", SAIRAS 88, pp. 11-14, 1988.
- [6] 山脇, 胡間, 津田: "宇宙ステーション用リモートマニピュレータシステム", 東芝レビュー, vol. 44, no. 9, pp. 710-714, 1989.
- [7] 渡辺, 内山: "宇宙実験用テレオペレーションシステム", 日本ロボット学会誌, vol. 7, no. 6, pp. 759-764, 1989.
- [8] 和気, 向田, 望月: "架空配電作業用マニピュレータシステムの開発(1)", 第8回日本ロボット学会学術講演会, pp. 1023-1024, 1990.
- [9] 松日楽, 朝倉, 番場: "異構造マスタスレーブマニピュレータの作業性とその評価実験", 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 1, pp. 149-154, 1994.
- [10] 古田, 小菅, 塩手, 秦野: "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, vol. 24, no. 2, pp. 70-76, 1988.
- [11] 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, vol. 7, no. 5, pp. 46-52, 1989.
- [12] 井上, 館, 荒井: "マスタスレーブ・マニピュレータのインピーダンス制御の一方法", 日本ロボット学会誌, vol. 10, no. 4, pp. 490-500, 1992.
- [13] 松日楽, 朝倉, 番場, 植之原: "高性能マスタスレーブマニピュレータの開発", 日本ロボット学会第2回ロボットシンポジウム予稿集, pp. 145-149, 1992.

松日楽信人 (Nobuto Matsuhira)

1956年9月9日生。1980年東京工業大学機械物理工学科卒業。1982年同大学大学院修士課程(機械物理工学専攻)修了。同年(株)東芝入社。マスタスレーブマニピュレータなど遠隔操作ロボットの研究開発に従事。現在、研究開発センター、機械・エネルギー研究所、主任研究員。日本機械学会、計測自動制御学会の会員。(日本ロボット学会正会員)

朝倉 誠 (Makoto Asakura)

1959年7月17日生。1983年慶應義塾大学電気工学科卒業。1986年同大学大学院修士課程(電気工学専攻)修了。同年(株)東芝入社。ロボットの力制御などの研究開発に従事。現在、研究開発センター、機械・エネルギー研究所、研究主務。計測自動制御学会の会員。

番場弘行 (Hiroyuki Bamba)

1965年2月7日生。1983年宮城県工業高等学校卒業。同年(株)東芝入社。現在、研究開発センター、機械・エネルギー研究所にてマスタスレーブマニピュレータおよび宇宙関連機器などの研究開発に従事。日本機械学会の会員。

(日本ロボット学会正会員)