仮想内部モデルに基づくマスタスレイブ マニピュレータの制御[†]

古田 勝久*・小菅 一弘*・塩手 良知**・秦野 弘**

Control of Master-Slave Manipulator Based on Virtual Internal Model

Katsuhisa FURUTA*, Kazuhiro KOSUGE*, Yoshinori SHIOTE** and Hiromu HATANO**

This paper presents an alternative control architecture of master-slave manipulators based on the concept of Virtual Internal Model Following Control. The proposed control architecture realizes the master-slave manipulator system with functions which assist operators based on the external information from sensors as well as bilateral feedback.

In this paper, the control problem of a master-slave manipulator is formulated as the realization problem of the desired relation between a master arm and a slave arm. The virtual internal model, whose input includes the external sensory information, is used to describe the desired relation. The control system is designed so that the master arm and the slave arm tracks the desired trajectories generated by the virtual internal model.

The proposed control architecture is experimentally applied to the master-slave manipulator system with force sensors and the effectiveness of the control architecture is illustrated through experiments.

Key Words: virtual internal model following control, master-slave manipulator, robot, model following servo, impedance control

1. はじめに

マスタスレイブマニピュレータは、海底、宇宙空間、原子炉内といった人間が近づけない危険な場所

で、危険な作業を間接的にを行うために用いる遠隔操作型マニピュレータで、オペレータが遠隔操作するマスタアームと、マスタアームの動きに追従し、実際に作業を行うスレイブアームとから構成される。

マスタスレイブマニピュレータには、大きく分けてマスタアームとスレイブアームが機械的に結合しているものと、電気的に結合しているものがあるが、本論文では、スレイブアームがマスタアームの運動に応じて計算機制御される後者のマスタスレイブマニピュレータの制御問題について考える。

マスタスレイブマニピュレータの制御系では、従来からバイラテラルサーボ系が一般的である。バイラテラルサーボ系では、スレイブアームはマスタアームの動作に追従するように制御され、マスタアームは、操作性を向上するために、スレイブアームがその作業環境から受ける反力をオペレータにフィードバックするように制御される。このようなシステムでは、直接作業を行うスレイブアームは、オペレータによって操られるマスタアームの運動に追従するように制御されるので、作業を安全に実行できるか否かは、完全にオペレータに依存することになる。マスタスレイブマニピュレータの操作性や安全性をより一層向上させるには、バイラテラルフィードバックに加えて、オペレータを支援する機能を与えることが望まれる。

近年、マスタスレイブマニピュレータに対して、ある種の自律機能を備えた遠隔操作システムが開発研究されている。W. R. Ferrel, T. B. Sheridan が提案した、Supervisory Control¹⁾では、オペレータからの命令によって、ある程度自律的に作業を実施する遠隔操作システムを提案した。また、平井、佐藤によって提案されている LARTS²⁾は、ロボット言語主導型のマスタスレイブマニピュレータであり、ロボット言語を介在させることにより作業そのものや作業対象の空

[†] 第25回計測自動制御学会で発表(昭61・7)

* 東京工業大学工学部 東京都目黒区大岡山 2-12-1

** 山武ハネウエル(株)生産技術センター
藤沢市川名 1-12-2

* Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo

** Production Engineering Center, Yamatake-Honeywell Co., Ltd., Fujisawa
(Received May 15, 1987)
(Revised October 7, 1987)

間的な情報の蓄積を可能にし、操作性を向上する研究を行っている。こうした一連の研究は、高性能な計算機システムの利用を前提とした、マスタスレイブマニピュレータシステムの研究であり、将来の発展が期待される。

一方、著者達は、制御系（サーボ系）の中に、与えられた目標信号を外界情報に基づき自動的に修正する仮想内部モデルを導入することで、外界情報を用いたさまざまな機能の実現が可能になる仮想内部モデル追従制御系⁷⁾を提案した。本論文では、仮想内部モデル追従制御系の概念に基づいた、マスタスレイブマニピュレータシステムの制御系を提案する。本論文では、マスタスレイブマニピュレータの制御問題を、マスタアームとスレイブアームの相互関係を制御する問題として定式化し、マスタアームとスレイブアームの関係を記述する仮想内部モデルを制御系に導入する。

提案する制御系では、マスタアームとスレイブアームを一つのシステムとして取り扱うため、システム全体の安定性の議論が容易になる。仮想内部モデルの導入によって、バイラテラルフィードバック制御をはじめ、外界情報に基づいてオペレータを支援し、操作性や安全性を向上できる機能、たとえば、スレイブアームの自動障害物回避機能などの実現が可能になる。仮想内部モデル追従制御系は、このような機能を高性能な上位の計算機を用いずに、サーボ系で実現できることに特徴がある。知識の蓄積といった高度な機能は実現できないが、サーボ系として、どのようなシステムにも組み込めるので、上位計算機の負荷を減少することが期待できる。

提案する制御系の有効性を説明するため、この制御系を力センサを備えたマスタスレイブマニピュレータシステムに実験的に適用し、バイラテラルフィードバック制御に加えて、外力に対するメカニカル・インピーダンス制御を実現したので、その結果についても報告する。

2. マスタスレイブマニピュレータの制御問題

本章では、マニピュレータの運動方程式の線形化と、マスタスレイブマニピュレータの制御問題の定式化を行う。ここでは、議論を簡単にするために、マスタアームとスレイブアームの自由度は等しいと仮定する。また、各アームは、一般的多関節型アームで、それぞれの自由度は、独立なアクチュエータで駆動される。このとき、個々のアームは、よく知られているように、次式のように表わすことができる。

$$\tau = M(\theta)\ddot{\theta} + f(\dot{\theta}, \theta) + g(\theta) - \tau_f \quad (1)$$

ここで

θ : n 次元の一般化座標ベクトル（関節のなす相対角度または変位）

τ : n 次元の一般化入力ベクトル（アクチュエータによって関節に加えられる入力または入力トルク）

τ_f : アームとその作業環境あるいはオペレータとの機械的干渉によってアームに加えられる外力で、センサで測定可能と仮定する。

$f(\theta, \dot{\theta})$: コリオリ力項および求心力項を表わす n 次元ベクトル

$g(\theta)$: 重力項を表わす、 n 次元ベクトル

$M(\theta)$: $n \times n$ 次元の慣性行列

マスタスレイブマニピュレータには、マスタアームとスレイブアームの構造が等しい場合や相似の場合が多いが、異なった構造のアームから構成される場合もある³⁾。システムが構造の異なるマスタアームとスレイブアームから構成される場合も考慮し、ここでは **Fig. 1** に示すように、マスタアームとスレイブアームのそれぞれに共通の作業座標系を考える。この作業系の導入は、異なる構造のアームから構成されるマスタスレイブマニピュレータの制御問題を考えるときには欠かせない。座標系には、通常直交座標系が用いられ、両方のアームはこの座標系で制御される。

マスタアームあるいはスレイブアームの作業座標と一般化座標との関係が、次式のように表わされるとしよう。

$$x = T(\theta) \quad (2)$$

関数 $T(\cdot)$ は、一般化座標 $\theta = [\theta_1, \dots, \theta_n]^T$ の関数であり、 θ と同じ次数をもつものとする。つまりそれぞれのアームは冗長性をもたないものと仮定する。作業座標系内では、アームの運動方程式は(3)式のように表わされる。

Fig. 1 Example of working coordinate system

$$\tau = M(\theta)J^{-1}(\theta)(\ddot{x} - \dot{J}(\theta)J^{-1}(\theta)\dot{x}) + f(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) - \tau_f \quad (3)$$

ここで、 J は $T(\theta)$ のヤコビ行列であり、 $J(\theta) = \partial T(\theta) / \partial \theta$ である。また作業を行う空間内では、 J は正則であると仮定する。

次式の実線形フィードバックを用いると、アームの運動方程式は作業空間内で線形化できる^{5), 6)}。

$$\tau = M(\theta)J^{-1}(\theta)(\ddot{u} - \dot{J}(\theta)J^{-1}(\theta)\dot{x}) + f(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) - \tau_f \quad (4)$$

u はシステムへの新しい入力である。線形化されたアームは次式のように書き表わせる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} u \quad (5)$$

I は n 次の単位行列である。

上で述べたような非線形フィードバックを用いた線形化をマスターアームならびにスレイブアームに対して行くと、それぞれのアームは(5)式のように表わせる。そして、両アームについて方程式をまとめて書くと、次式を得る。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} u_m \quad (6)$$

ここで、 $x_m = [x_m^T, \dot{x}_m^T]^T$ 、 $u_m = [u_m^T, \dot{u}_m^T]^T$ であり、 x_m 、 x_s 、 u_m 、 u_s はそれぞれ、マスターアームとスレイブアームの作業座標ベクトルと入力ベクトルを表わす。

一般に、マスタスレイブマニピュレータの制御問題は、センサなどで検出された情報に基づき、 x_m と x_s の間の望ましい干渉（関係）を実現することであると考えることができる。以下では、マスターアームとスレイブアームの望ましい関係を実現するように、(6)式を制御する問題を考える。

(注意1) 従来のバイラテラルマスタスレイブマニピュレータでは、スレイブアームはマスターアームの運動に追従するように制御され、マスターアームは、力センサや関節トルクセンサで検出されるスレイブに加わる作業環境からの反力をオペレータにフィードバックするように力制御される。このような制御系の場合、システム全体の安定性が明確でないが、本稿では(6)式のように、マスタスレイブマニピュレータを一つのシステムとして取り扱い制御系を設計するので、システム全体の安定性の議論が容易になる。

3. マスタスレイブマニピュレータの仮想内部モデル追従制御

本章では、仮想内部モデル追従制御⁷⁾の概念に基づくマスタスレイブマニピュレータの制御について述べる。

Fig. 2 Virtual internal model following control system

仮想内部モデル追従制御系は、Fig. 2に示すように、モデル追従型サーボ系の規範モデルに外界センサからの信号をフィードバックすることにより、制御対象の外界状況に応じて、サーボ系内部で自動的に目標信号を修正し、修正された目標信号（仮想目標信号）に制御対象の出力が追従するように制御対象を制御する制御系であり、規範モデル（仮想内部モデル）の選択によって、いろいろな機能を制御系に付加することができる。

前章で述べたように、マスタスレイブマニピュレータの制御問題は、(6)式のシステムの状態 x_m と x_s との望ましい関係を実現する制御問題と考えることができるが、ここでは仮想内部モデルによって、外界センサ情報に基づいたこれらの関係を記述し、制御系を構成することを考える。

Fig. 3に提案する制御系の構造を示す。提案する制御系では、仮想内部モデル(Virtual Internal Model)によって、マスターアームとスレイブアームの状態やセンサからの信号に応じて、両アームの目標起道が生成される。バイラテラルフィードバック系を構成するためには、オペレータがマスターアームを操作するときに加える力や、スレイブアームが作業環境から受ける反力がセンサ情報として必要となる。それ以外の一般的な外界センサ情報も仮想内部モデルを通じて制御に利用することができるので、仮想内部モデルの選択によって、いろいろな機能をもった制御系が構成できる。

3.1 仮想内部モデルの設計

(6)式で表わされたマスタスレイブマニピュレータ

Fig. 3 Architecture of proposed control system

に対する、仮想内部モデルについて考える。仮想内部モデルの設計は、2段階に分けて考えることにする。まず最初に、マスタアームに関するモデルを導出し、続いてスレイブアームに関するモデルを導出する。

(1) マスタアームに対する仮想内部モデル

マスタアームの機能は、オペレータがスレイブアームの動作を指示するとともに、スレイブアームが作業環境から受ける反力などの情報を、オペレータにフィードバックすることである。こうした機能を実現するために、次式のモデルを考える。

$$\ddot{x}_{mr} = h_{mr}(\dot{x}_{mr}, x_{mr}, f_m, f_s, f_d) \quad (7)$$

ここで

x_{mr} : マスタアームの目標軌道

f_m : オペレータがマスタアームに加える力

f_s : スレイブアームが作業環境から受ける反力

f_d : オペレータにフィードバックされる力のスケールファクタ定数

f_d : オペレータにフィードバックする他の外界情報

(7)式のモデルは、安定であるように選ぶ必要があり、外界情報は、このモデルを通して、オペレータにフィードバックされることになる。

バイラテラルフィードバックを実現できる線形モデルの具体的な例を次式に示す。

$$\ddot{x}_{mr} = A_{m1}\dot{x}_{mr} + A_{m2}x_{mr} + B_{m1}(f_m + s_f f_s) + B_{m2}f_d$$

$$x_{mr}(0) = x_m(0), \quad \dot{x}_{mr}(0) = \dot{x}_m(0) \quad (8)$$

ここで A_{m1} , A_{m2} , B_{m1} , B_{m2} は、適当な係数行列であり、 B_{m1} は、正則行列で、 A_{m1} と A_{m2} は(8)式が安定となるように選ぶ。

(8)式のモデルで f_d がいない場合を考えてみよう。スレイブアームが作業環境と機械的干渉をもたない場合、つまりスレイブアームが拘束されない場合には、 $f_s = 0$ となり、マスタアームの運動は、オペレータがマスタアームを操作する力 f_m のみによって決定される。スレイブアームが作業環境から拘束を受ける場合には、定常状態では、

$$f_m = -s_f f_s - B_{m1}^{-1} A_{m2} x_{mr} \quad (9)$$

となり A_{m2} を零行列とすれば、スケールファクタ s_f をもったバイラテラルフィードバック制御が実現できることがわかる。

なお、この方式では、スレイブアームが受ける反力はマスタアームに直接的に伝達されるのではないので、過渡的には正確なバイラテラルフィードバックは実現できない。しかし、後で示すように、マスタアームの操作性は係数行列の選びかたによって変更でき

る。係数行列を対角行列に選ぶ場合を考えてみよう。たとえば係数行列 A_{mi} ($i=1, 2$) の各要素を十分小さくすれば、力は、 B_{m1}^{-1} で決定されるある種の質量のようなものを通じてオペレータにフィードバックされることができる。更に、 B_{m1}^{-1} の各要素の大きさも十分小さくすれば、力はほぼ直接オペレータに伝達されると考えられる。

(2) スレイブアームに対する仮想内部モデル

スレイブアームに必要な機能は、(7)式または(8)式を通してオペレータによって操作されるマスタアームの動作に追従することである。この機能は、次式で実現できる。

$$\ddot{x}_{sr} = s_m \ddot{x}_{mr}$$

$$x_{sr}(0) = s_m x_{mr}(0), \quad \dot{x}_{sr}(0) = s_m \dot{x}_{mr}(0) \quad (10)$$

ここで

x_{sr} : スレイブアームの目標軌道

s_m : 運動のスケールファクタ定数 (スレイブアームの運動は、マスタアームの運動の s_m 倍されることになる)

である。(10)式を用いると、通常のスレイブアームの機能を実現できる。また、次式のようなモデルを選択することにより、外界情報に応じたスレイブアームの制御が可能になる。

$$\ddot{x}_{sr} = s_m \ddot{x}_{mr} + h_{sr}(e, \dot{e}, f_s, f_d) \quad (11)$$

ただし、

$$e = x_{sr} - s_m x_{mr} \quad (12)$$

であり、関数 h_{sr} は、次式の誤差システムが安定であるように選ぶ必要がある。

$$\dot{e} = h_{sr}(e, \dot{e}, f_s, f_d) \quad (13)$$

より具体的な関数としてつぎの線形関数を考える。

$$h_{sr} = A_{s1}\dot{e} + A_{s2}e + B_{s1}f_s + B_{s2}f_d \quad (14)$$

ここで A_{s1} , A_{s2} , B_{s1} , B_{s2} は、適当な次数をもつ係数行列で、 A_{s1} , A_{s2} は、作業環境からのフィードバックを考慮し、システム(14)が安定になるように選ばなければならない。

(11), (14)式で、 $B_{s2} = 0$ とすると、スレイブアームは、作業環境からの反力 f_s に対して、メカニカルインピーダンスをもつことになる。また、外部情報 f_d は、たとえば、障害物回避などの機能を実現するのに利用できる。

(3) マスタスレイブマニピュレータに対する仮想内部モデル

一般的な内部モデルは、(7)式と(11)式から得られる。ここでは、より具体的な例として、(8)式と(12), (14)式を用いた場合を次式に示す。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_{mr} \\ x_{sr} \\ \dot{x}_{mr} \\ \dot{x}_{sr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ A_1 & A_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{mr} \\ x_{sr} \\ \dot{x}_{mr} \\ \dot{x}_{sr} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_m \\ f_s \\ f_d \end{bmatrix} \quad (15)$$

ここで

$$A_i = \begin{bmatrix} A_{mi} & 0 \\ s_m(A_{mi} - A_{si}) & A_{si} \end{bmatrix} \quad (i=1, 2)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} B_{m1} & s_f B_{m1} & B_{m2} \\ 0 & B_{s1} & B_{s2} \end{bmatrix}$$

3.2 制御則の設計

本節では非線形フィードバックで線形化したマスタスレイブマニピュレータ(6)の状態が、仮想内部モデル(15)に遅れなく追従するような制御系を考える。制御系の設計は、文献(6), 7)に準ずるので、ここでは、その概略のみを示す。

まず、つぎのような状態ベクトルを定義する。

$$x_{msr} = [x_{mr}, x_{sr}]^T, \quad v = [f_m, f_s, f_d]^T$$

$$e' = x_{ms} - x_{msr},$$

このとき、(6)式と(15)式を用いると、(6)式の状態を(15)式の状態に追従させる制御問題は、次式の誤差システムの安定化問題と考えることができる。

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} e' \\ \dot{e}' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e' \\ \dot{e}' \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} w \quad (16)$$

ただし

$$w = u_{ms} - A_1 x_{msr} - A_2 \dot{x}_{msr} - B_2 v \quad (17)$$

(16)式の導出では、マスタアームとスレイブアームが非線形フィードバックで正確に線形化されているということが前提となっているが、実際にはシステムパラメータの同定誤差や変動のため、システム(16)には、パラメータ変動や外乱が存在すると考えられる。こうした場合には、システム(16)の安定化制御則に、パラメータ変動や外乱に対してロバストな制御則が有効であることが知られている⁵⁾。ここでは、定常状態では少なくとも外乱の影響を抑制できるような次式の P. I. D. タイプの制御則を考える⁶⁾。

$$w = F_1 e' + F_2 \dot{e}' + F_3 \int_0^t e' dt' \quad (18)$$

マスタスレイブマニピュレータへの入力は、(6)式に対して次式で与えられる。

$$u_{ms} = F_1 e' + F_2 \dot{e}' + F_3 \int_0^t e' dt' + A_1 x_{msr} + A_2 \dot{x}_{msr} + B_2 v \quad (19)$$

各アームへの入力トルクは(19)式をそれぞれのアームへの入力、 u_s , u_m に分解し、(4)式に代入すれば計算できる。この制御則を用いた場合、システムの線形化が正確に行われるならば、そのときには追従誤差 $e'(t)$ は零となる。またこの制御則はマスタスレイブ系

に対して設計したので、作業環境からのフィードバックも考慮した仮想内部モデルの安定性が保証されるならば、マスタスレイブ系の安定性が保証されることになる。

4. 実験

4.1 実験システム

提案した制御系を **Photo. 1** に示す実験用マニピュレータシステムに適用し、簡単な実験を行ったので説明する。この実験用のマニピュレータは、一方は 3 自由度の、他方は 6 自由度の垂直多関節型マニピュレータであり、それぞれ 3 自由度のみをもちいて実験を行った。6 自由度のマニピュレータの手首の 3 自由度は、機械的に固定して実験した。

アームの各関節は減速器(ハーモニックドライブ)を介して D. C. モータで駆動されるようになっている。また各関節でのリンクのなす相対角度は、モータに取り付けられたロータリー・エンコーダで検出される。それぞれのアームに加わる力は、アーム先端の 6 軸力センサ(日立建機 LS 6010)によって検出される。制御則の実現には、マルチ CPU システム(Intel (8086+8087)×3)を用いた。サンプリング周波数は約 71 Hz である。

4.2 仮想内部モデルの設計

本実験システムでは、オペレータがマスタアームに加える力 f_m と、作業環境からスレイブアームが受ける反力 f_s は、力センサで測定できるが、これ以外には利用できる情報はない。

実験するにあたり、**Fig. 4** に示すように、アームの第一関節に原点をもつ直交座標系 $o-x_1-x_2-x_3$ をマスタアームとスレイブアーム共通の作業座標系として選んだ。したがって、実験ではこの座標系でアームは制御されることになる。

マスタスレイブの仮想内部モデルには、(15)式を用いた。つまり(8)式をマスタアームの内部モデルとし

Photo. 1 Experimental system

Fig. 4 Structure of experimental robot arm

て用い、(12)、(14)式をスレイブアームの内部モデルとして用いた。本実験システムの場合利用できる外界情報は、アームに加えられる力以外にはないので、 $f_d=0$ である。

マスタアームに関する係数行列は、次式のように選んだ。

$$A_{m1} = -M_m^{-1}D_m, \quad A_{m2} = -M_m^{-1}K_m, \\ B_{m1} = B_{m2} = M_m^{-1}$$

このパラメータによって、マスタアームの先端は、質量 M_m 、ダンパ D_m 、バネ定数 K_m をもつ機械系に外力を加えたような運動をすることになる。また、スケールファクタは、 $s_f=1$ とした。

スレイブアームに関するパラメータも同様につぎのように選んだ。

$$A_{s1} = -M_s^{-1}D_s, \quad A_{s2} = -M_s^{-1}K_s, \\ B_{s1} = B_{s2} = M_s^{-1}$$

このパラメータの選択によって、スレイブアームの軌道（位置）は、スレイブアームに加わる作業環境からの反力に応じて、マスタアームの軌道（位置）から自動的に離れることになる。

係数行列 M_s 、 D_s 、 K_s は、スレイブに加わる外力に対する、スレイブアーム先端のメカニカルインピーダンスを決定する。これらのパラメータの物理的な意味は、マスタアームの場合と同様である。

このメカニカルインピーダンスの実験は、仮想内部モデルを通して、スレイブアームの外界情報に基づく自動的な応答が可能になるというデモンストレーションである。他の外界情報が制御に利用できる場合には、同様にして、その情報に対するスレイブアームの応答を仮想内部モデルにプログラムでき、外界情報に基づくスレイブアームの制御が実現できる。

なお、本実験では、運動のスケールファクタは $s_m=1$ とした。

4.3 実験結果

実験は3種類行った。実験に用いた仮想内部モデルのパラメータを Table 1 に示す。Fig. 5 は、スレイブアームが拘束を受けずに、自由に運動している場合の x_1 軸方向の応答で、オペレータによってマスタアームに加えられた力と、マスタアームとスレイブアームの運動を示したものである。この場合、スレイブアームは、マスタアームの運動にほぼ完全に追従しているのがわかる。

Fig. 6 は、スレイブアームが弾性体に接触した場合の x_2 軸方向の応答を示す。スレイブアームに加わった反力がオペレータに伝えられていることがわかる。データ中の、 f_m と f_s との差は、マスタアームに与えた、ダイナミクスによって生じている。なお、 $f_s \approx 0$ の部分は、スレイブアームに外力が作用していないことを、つまりスレイブアームが自由に運動していることを示す。これら二つの実験では、スレイブアームのメカニカルインピーダンスを大きく設定し、スレイブアームの軌道がマスタアームの軌道から離れないように制御した。

Fig. 7 は Fig. 6 に比べて、メカニカルインピーダ

Table 1 Experimental parameters

Fig.	M_m (kg)	D_m (kg·s)	K_m (N/m)	M_s (kg)	D_s (kg·s)	K_s (N/m)
4	$5 \cdot I$	$40 \cdot I$	$10 \cdot I$	$5000 \cdot I$	$20000 \cdot I$	$20000 \cdot I$
5	$10 \cdot I$	$50 \cdot I$	$3 \cdot I$	$5000 \cdot I$	$20000 \cdot I$	$20000 \cdot I$
6	$10 \cdot I$	$50 \cdot I$	$3 \cdot I$	$40 \cdot I$	$200 \cdot I$	$200 \cdot I$

(I is an identity matrix)

Fig. 5 Experimental result 1

Fig. 6 Experimental result 2

Fig. 7 Experimental result 3

ンスを下げた場合の実験結果である。この場合には、スレイブアームに作用する外力に応じて、スレイブアームの軌道が、マスタアームの軌道から離れていることがわかる。このようにパラメータを目的に応じて設定することで、マニピュレータの操作性を変えることができる。またこの実験では、スレイブアームの受ける反力を外界情報として実験を行ったが、近接センサなどのセンサを用いれば、同様のモデルを用いて、簡単なハンドの障害物回避動作を行うことができる。

(注意2) 本実験で用いたアームは、アーム先端に取り付けた力センサを用いてアームに加わる外力を検出するようになっている。このように通常のロボット

アームで、アーム先端に取り付けた力センサの信号を用いて制御系を構成した場合には、アームが剛体に接触したときに、等価的に位置の高ゲインフィードバックが生じ、アームが不安定になる場合がある⁹⁾。本実験システムでも同様の現象が生じ、剛体でアームを拘束した実験はできなかった。こうした現象は、たとえばハンドやセンサの工夫により回避できることが知られている^{9), 10)}。

5. 結 論

本稿では、仮想内部モデル追従制御系を用いたマスタスレイブマニピュレータの制御方法を提案した。

提案する制御系では、マスタアームとスレイブアームの関係を仮想内部モデルによって記述することにより、従来にはない機能を有するマスタスレイブマニピュレータの制御系が実現できることを示し、最後に実験により提案する制御系の有効性を説明した。

本研究を行うにあたり、いろいろと励まして下さった(株)山武ハネウエルの井戸一朗氏、田中昂三氏、杉野芳英氏に謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) W. R. Ferrel and T. B. Sheridan: Supervisory Control of Remote Manipulation, IEEE Spectrum, Oct. 1967, 81/88 (1967)
- 2) S. Hirai and T. Sato: Advanced Master-Slave Manipulators Augmented with World Model, Proc. of 15th ISIR, Tokyo, 75/81 (1985)
- 3) 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イブ制御, 日本ロボット学会誌, 4-5, 469/479 (1986)
- 4) 新井, 中野: 異自由度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, 同上, 480/487 (1986)
- 5) K. Furuta, K. Kosuge, O. Yamano and K. Nosaki: Robust Control of a Robot Manipulator with Nonlinearity, Robotica, 2, 75/81 (1985)
- 6) K. Furuta, K. Kosuge and N. Mukai: Control of Articulated Robot Arm with Sensory Feedback: Laser Beam Tracking System, IEEE Trans. Industrial Electronics, to appear
- 7) 小菅, 古田, 横山: ロボットの仮想内部モデル追従制御系—メカニカル・インピーダンス制御への応用—, 計測自動制御学会論文集, 24-1, 55/62 (1986)
- 8) C. H. An and J. M. Hollerbach: Dynamic Stability Issues in Force Control of Manipulators, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, Raleigh, 890/896 (1987)
- 9) D. E. Whitney: Historical Perspective and State of the Art in Robotic Force Control, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, St. Louis, 262/268 (1985)
- 10) R. K. Roberts, R. P. Paul and B. M. Hillberry: The Effect of Wrist Force Sensor Stiffness on the Control of Robot Manipulators, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, St. Louis, 269/274 (1985)