計測自動制御学会論文集
Vol. 24, No. 1
(昭和63年1月)

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——

小菅一弘*・古田勝久*・横山竜昭*

Virtual Internal Model Following Control System

——Application to Mechanical Impedance Control——

Kazuhiro KOSUGE*, Katsuhisa FURUTA* and Tatsuaki YOKOYAMA*

In this paper, an alternative architecture of a robotic servo system, the Virtual Internal Model Following Control System, is proposed.

First, a trajectory tracking control problem of a robot arm in the working coordinate system is discussed and the control problem of a robot based on external information is formulated as a control problem of the error system, which is derived from the controlled robot arm linearized by nonlinear feedback and the desired trajectory. Then the virtual internal model following control system is proposed based on this formulation.

In the proposed control system, the Virtual Internal Model generates the Virtual Reference Signal, which is a modified reference signal based on the external information. This model is used to describe a control strategy of a robot in the control system for external information. The behavior of a robot toward the external information is controlled based on this model.

As an example of the proposed control architecture, mechanical impedance control problem is discussed. The experimental results illustrate the effectiveness of the proposed control system.

Key Words: virtual internal model following control, mechanical impedance control, robot, model following servo

† 第25回計測自動制御学会学術講演会で発表 (昭61・7)
* 東京工業大学工学部　東京都目黒区大岡山 2-12-1
* Faculty of Engineering, Tokyo Institute of Technology, Meguro-ku, Tokyo
(Received March 16, 1987)
(Revised September 21, 1987)

1. はじめに

ロボットアームの制御に関しては，多くの研究がなされており，特に，ロボットの動特性を考慮した，サーボ系の構成に関する研究の発展は著しい[1)~7)].

一般に，サーボ系は，アクチュエータのドライバに入力信号を出力するロボットコントローラの最下位の装置であり，上位の目標値発生装置から与えられた目標信号と，制御対象であるロボットの出力（実際のロボットアームの関節の変位やアーム先端の位置など）との誤差をできる限り小さくするように設計される．このようなサーボ系の一部に外界センサからのフィードバックを用いてサーボ系を構成し，その性能を向上する研究もなされているが[8),9)]，このような制御系では，外界センサは作業環境における制御変数に関する情報を検出するのに利用され，制御対象の出力を目標信号にできる限り近づけるように制御するという意味においては，一般のサーボ系と変わらない．このように，サーボ系の設計では，通常，制御対象とその環境との干渉は考慮されない．

しかし，ロボットなどの制御においては，作業環境とロボットとの干渉は無視できないし，作業環境が不変であるという保証もない．このような制御対象では外界センサなどを用いて作業環境との調和を考えた実時間制御系の構成が望まれる．

近年，ロボットと作業環境との機械的干渉(干渉力)を考慮した制御系が提案されている．Whitney[11)]の提案したRCCは，エンド・イフェクタによって機構的にロボットアームと作業環境との機械的干渉を制御しようとするものであるし，コンプライアンス制御[10)]，インピーダンス制御[14)]，仮想コンプライアンス制御[17)]などは，ロボットと作業環境との機械的干渉を考慮し

た制御を行おうとするものである．また，位置と力のハイブリッド制御[12),13)]は，ロボットが作業環境に加える干渉力を制御しようとするものである．

本論文は，外界センサなどからの一般的な作業環境情報をもとに，制御対象とその環境との直接的あるいは間接的なさまざまな相互作用を考慮した実時間制御が可能な，モデル追従制御系の概念に基づく新しい制御系の構成法を提案しようとするものである．

以下，本論文では，まず，ロボットアームの作業座標系における軌道制御問題を，その目標軌道を生成する動的モデルと，非線形フィードバックによって線形化されたロボットアームとから導出される，誤差システムの安定化問題として定式化する．そして，外界情報に基づきこの誤差システムを制御することで，ロボットと外界との調和を考慮した制御系を構成することを考え，仮想内部モデル追従制御系を導出する．

提案する制御系では，ロボットの外界情報に対する制御戦略を記述するために，動的な軌道修正モデルを考え，これをもとにして，目標軌道と外界情報とを入力とし，修正された目標軌道（仮想目標軌道）を生成する仮想内部モデルを導入する．そして，モデル追従制御系の概念に基づき，ロボットアームの軌道が，仮想目標軌道に追従するように制御系を構成する．

最後に，提案する制御系を，メカニカル・インピーダンス制御に適用し，実験によりその有効性を示す．

2. ロボットの動的モデル

本章では，準備として，一般的な多関節ロボットアームの動的モデルとその線形化について簡単に述べる[4)~8)]．

一般に，n 個の独立なアクチュエータによって各関節が駆動される n 個の剛体リンクと n 個の関節から構成される n 自由度の多関節型ロボットアームはロボットアーム先端と，作業環境との機械的干渉を考慮すると次式の非線形方程式によって記述される．

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

ただし

θ: n 個の関節変位からなる，n 次元ベクトル．

τ: 各関節にアクチュエータによって加えられるトルクや力からなる，n 次元の入力ベクトル．

τ_f: 作業環境との機械的干渉によって各関節に加わる n 次元の外乱入力ベクトルで，力センサなどにより測定できると仮定する．

$f(\theta, \dot{\theta})$: コリオリ力，求心力，粘性摩擦などからなる非線形力項を表わす n 次元ベクトル．

$g(\theta)$: 重力項を表わす n 次元ベクトル．

$M(\theta)$: $n \times n$ の慣性行列で，通常は，正定対称行列である．

ロボットアームの作業環境内での制御問題を考えるときには，ロボットが実際に行う作業や利用できる外界センサなどに最適な作業座標系を選択し，その座標系で制御系を構成すると便利である．特に，作業環境とロボットとの相互作用や干渉を取り扱うには，作業座標系の利用は欠かせない．ここでは，以下の議論を簡単にするため，ロボットは冗長性をもたないと仮定し，n 次元の作業座標ベクトル x とベクトル θ との関係が，

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

と表わせるとする．$T(\theta)$ はベクトル θ の関数である．(2)式を用いると，ロボットアームの動的方程式は，

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

と書き直せる．ここで $J(\theta) = \partial T(\theta)/\partial\theta$ は $T(\theta)$ のヤコビ行列であり，考えている作業領域内では正則であると仮定する．(3)式を書き直すとつぎの非線形状態方程式を得る．

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{J}J^{-1}\dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ JM^{-1}(\tau - f - g + \tau_f) \end{bmatrix} \qquad (4)$$

ただし，J, M, f, g はそれぞれ $J(\cdot)$, $M(\cdot)$, $f(\cdot)$, $g(\cdot)$ を表わす．

非線形フィードバック

$$\tau = M_c J_c^{-1}(u - \dot{J}_c J_c^{-1}\dot{x}) + f_c + g_c - \tau_{fc} \qquad (5)$$

を考える．u はシステムへの新しい入力であり，添え字 c は，その関数が同定されたシステムのパラメータなどによって，計算されることを示す．システムのパラメータが正確に同定され，$M_c = M$, $f_c = f$, $g_c = g$, $\tau_{fc} = \tau_f$ となる場合には，システム(4)は次式のように作業座標系内で線形化することができる．

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix} u \qquad (6)$$

I は n 次の単位行列である．一般に，ロボットのパラメータを正確に同定することはむずかしく，線形化されたシステム(6)は，パラメータ誤差や外乱項を含んでいると考えられるが，こうした影響は，パラメータ変動や外乱に対してロバストな制御系を，システム(6)に対して構成することによって低減できる[5)~8)]．

3. 仮想内部モデル追従制御系

一般のロボットのサーボ系では，その制御変数はサ

ーボ系に与えられた目標信号にできる限り追従するように制御され，サーボ系それ自体では与えられた目標信号を修正しない．そのため，たとえば障害物回避のように外界情報に基づく制御を行う必要がある場合には，センサなどで得られた情報をより上位のシステムにフィードバックし，障害物回避のための目標信号を生成し，生成した目標信号をサーボ系に入力するというシステム構成をする必要があった．

もし，サーボ系がそれ自体で，外界センサなどで得られた外界情報に基づいて与えられた目標信号を自動的に修正し，たとえば障害物回避のような動作を行うことができれば，制御システム自体が簡単になるばかりではなく，センサ信号がフィードバックされる経路が短くなり，外界情報に対する速やかな応答が可能になると思われる．

本章では，外界情報に基づき，サーボ系内部で自動的に目標信号を修正することができる，ロボットの新しい制御系を提案する．以下では，議論を簡単にするために，ロボットアームの軌道制御について議論するが，同様の制御系は，他の制御問題にも適用できる．

3.1 問題の定式化

上で述べた制御問題を定式化するため，最初にロボットアームの軌道追従制御問題[7),8)]について考える．ロボットアームの軌道追従制御というのは，時間関数として与えられた目標軌道に，ロボットアームのエンド・イフェクタの位置・姿勢を追従させる制御を意味する．

ロボットアームのコントローラでは，通常サーボ系は，アクチュエータのドライバ回路に信号をおくる最下位のシステムで，上位のシステムから目標軌道が与えられる．この目標軌道 $x_d(t)$ は，一般性を失うことなく，つぎのシステムで生成されると考えることができる．

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}u_m \qquad (7)$$

ここで $x_m(t)$ は目標軌道であり，$x_m(0)=x_d(0)$，$\dot{x}_m(0)=\dot{x}_d(0)$ とする．$u_m(t)=\ddot{x}_d(t)$，$\dot{x}_m(t)=\dot{x}_d(t)$ は実際には，与えられた目標軌道から容易に計算できる．本論文で議論の対象とするロボットアームは，(1)式で表わされるように，互いに干渉している非線形2次システムから構成されていると考えられるので，この仮定は自然である．

つぎに，(7)式によって生成される目標軌道と，実際のロボットアームの軌道の誤差を

$$e(t)=x(t)-x_m(t) \qquad (8)$$

とする．(6)式と(7)式を用いると，

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 & I \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} e \\ \dot{e} \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} 0 \\ I \end{bmatrix}u_e \qquad (9)$$

$$u_e(t)=u(t)-u_m(t)$$

となる．

通常の，軌道追従制御や P. T. P. 制御では，与えられた目標軌道と実際のロボットアームの軌道の誤差が零となるように制御され，誤差システム(9)を安定化することによって実現できる[7),8)]（付録参照）が，外界情報に基づき，ロボットアームの軌道を戦略的にかつ自動的に修正する制御問題は，(9)式の誤差システムの状態を零にするのではなく，その状態を外界情報に基づき，制御する問題として定式化できることがわかる．

3.2 仮想内部モデル

前節での定式化に従い，(9)式の状態を外界情報に基づいて制御することを考える．まず(9)式の状態 $e(t)$ の外界情報に対する戦略的な挙動を記述するために，軌道修正モデルを導入する．ここではロボットアームの制御を考え，制御則を簡単にするために次式の動的軌道修正モデルを考える．

$$\ddot{e}_m(t)=h(e_m, \dot{e}_m, u_f, u_s, x) \qquad (10)$$

ここで，e_m は n 次元の望ましい軌道修正ベクトルであり，$e_m(t)=x_m(t)-x_d(t)$，$e_m(0)=0$，$\dot{e}_m(0)=0$ とする．$x_m(t)$ は，修正後のロボットアームの軌道である．u_f はロボットアームと作業環境との機械的干渉によってアームに作用する外力からなる，n 次元ベクトルで，u_s は制御に利用できる外界情報ベクトル(次元は任意)である．関数 $h(\cdot)$ は非線形関数でもよいが，作業環境からのフィードバックを含めて，動的モデル(10)の安定性を保証しなければならない．

ロボットの軌道が(10)式によって修正されるとき，実際にはロボットは，サーボ系に与えられた目標軌道 $x_d(t)$ ではなく，次式のシステムで生成される軌道に追従することになる．

$$\ddot{x}_m(t)=\ddot{x}_d(t)+h(e_m, \dot{e}_m, u_f, u_s, x) \qquad (11)$$

ただし，

$$x_m(0)=x_d(0),\quad \dot{x}_m(0)=\dot{x}_d(0)$$

とする．

そこで，サーボ系へ入力される目標軌道 $x_d(t)$ と区別し，実際にロボットが追従しようとする軌道 $x_m(t)$ を仮想目標軌道 (Virtual Reference Singnal) と名づけ，仮想目標軌道を生成するモデル(11)を仮想内部モデル (Virtual Internal Model) と呼ぶことにする．

仮想内部モデルは，ロボットの外界情報に対する制御戦略の内部モデルとも考えられ，軌道修正モデルあるいは仮想内部モデルの選択により，外界情報に応じ

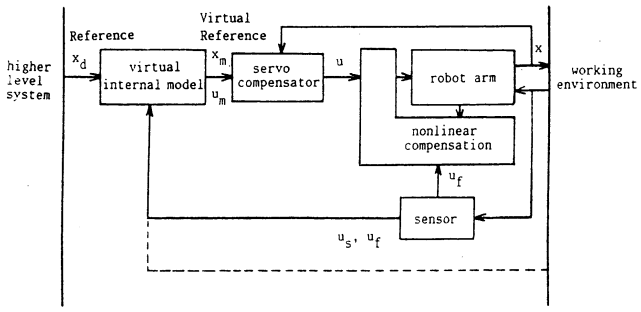

Fig. 1 Structure of virtual internal model following control system

たさまざまな動作が実現できる.

3.3 仮想内部モデル追従制御系

(11)式より，(10)式に従ってロボットの軌道修正を行うには,

$$u_m(t)=\ddot{x}_d(t)+h(e_m, \dot{e}_m, u_f, u_s, x) \tag{12}$$

とし，(7)式に対して設計した，軌道追従制御系（付録A.8式）を適用すればよいことがわかる．ロボットへの入力は,

$$\tau=M_cJ_c^{-1}\left(-K_1e-K_2\dot{e}-K_3\int^t edt'+u_m\right.$$
$$\left.-\dot{J}_cJ_c^{-1}\dot{x}\right)+f_c+g_c-\tau_{fc} \tag{A.8}$$

となる．一般的な仮想内部モデル追従制御系の構成を，**Fig. 1** に示す.

仮想内部モデル追従制御系は，ロボットのコントローラの最下位のシステムであり，ロボットと外界との機械的な干渉力を含めた外界情報に対して，ロボットはサーボレートで応答する.

4. メカニカル・インピーダンス制御への応用

本章では，仮想内部モデル追従制御の簡単な例として，メカニカル・インピーダンス制御について考える.

メカニカル・インピーダンス制御は，作業環境からロボットアーム先端のエンド・イフェクタに作用する力やモーメント（以下では，単にアームへの外力と呼ぶ）に対して，アーム先端のエンド・イフェクタが望ましいインピーダンスをもつように，アームへの外力に応じてエンド・イフェクタの運動を制御するものである．エンド・イフェクタの運動は，ロボットアームの目標軌道とロボットアームへの外力を入力とする動的モデルで記述される.

メカニカル・インピーダンス制御は，Hogan[14]によって提案された．Hogan の制御アルゴリズムは，モデル・マッチング制御によって実現されている．つまり，フィードバックによって，閉ループがインピーダンス・モデルと同じ入出力関係をもつように制御する方法である．この方法によると，閉ループ系は，入出力関係に関してインピーダンス・モデルと同じ安定余有をもつことになるため，安定余有が小さいインピーダンス・モデルの場合には，たとえそれが安定でも，ロボットアームのパラメータ変動などによって，制御系全体が不安定になる場合が生じる恐れがあった.

メカニカル・インピーダンス制御のロバスト制御は，Kazaroomiらによって提案されている．Kazaroomiらの提案する制御則は，ある点近傍の線形モデルに基づいて設計される．この制御法では，制御系のロバスト安定性が考慮されているが，線形化した点から離れた点でのシステムの過渡応答は考慮されていない.

仮想内部モデル追従制御系を用いると，以下の特徴をもったメカニカル・インピーダンス制御が実現できる.

1) システム全体の安定余有はインピーダンス・モデルには影響されない.

2) 制御則は，インピーダンス・モデルとは独立にロバスト性を考慮して設計できる.

3) 制御則は作業空間内のすべての点（ロボットアームの特異点近傍は除く）で有効である.

4.1 仮想内部モデルの設計

作業座標系として，作業空間内に設定された直交座標系を考える．前章での記号を用いると，メカニカル・インピーダンスモデルは，この直交座標系を用いてつぎのように記述できる.

$$M_0\ddot{e}_m+D_0\dot{e}_m+K_0e_m=u_f \tag{13}$$

これを書き直すと

$$\ddot{e}_m=-M_0^{-1}D_0\dot{e}_m-M_0^{-1}K_0e_m+M_0^{-1}u_f \tag{14}$$

となる．ここで M_0, D_0, K_0 はそれぞれ，慣性行列，粘性摩擦係数行列，ばね定数行列である．(14)式から，実際にロボットアームが追従すべき軌道を生成する仮想内部モデルは,

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix}=\begin{bmatrix} 0 & I \\ -M_0^{-1}K_0 & -M_0^{-1}D_0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_m \\ \dot{x}_m \end{bmatrix}$$
$$+\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_0^{-1}K_0 & M_0^{-1}D_0 & I & M_0^{-1} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} x_d \\ \dot{x}_d \\ \ddot{x}_d \\ u_f \end{bmatrix} \tag{15}$$

となる．パラメータ行列 M_0, D_0, K_0 は通常は対角行列で次式のように選ばれる.

$$M_0=\mathrm{diag}(m_1, m_2, \cdots, m_n),\ \ m_i>0$$
$$D_0=\mathrm{diag}(d_1, d_2, \cdots, d_n),\ \ d_i>0$$

$K_0=\mathrm{diag}(k_1, k_2, \cdots, k_n)$, $k_i \geqq 0$

4.2 実　　験

提案した制御系の有効性を確認するため，**Fig. 2**に示すロボットアーム（山武ハネウエル，AR 1-P）を用いて実験を行った．このロボットアームは，6自由度をもつが，実験には3自由度のみを用いた．残りの3自由度は機械的に固定して実験を行った．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．アーム先端には，外力を検出するための力センサ（日立建機，6軸力センサ LSA 6010）が取り付けられている．なお，コントローラはマルチ CPU システムで構成し，サンプリング周波数は，50 Hz である．

作業座標系としては，Fig. 2に示すように直交座標系 o-x_1-x_2-x_3 を用い，メカニカル・インピーダンスはこの直交座標系で(13)式のように記述した．

また，ロボットアームの先端に一定以上の外力が働かないように，次式に示す非線形ばね定数を用いた．

$$k_i=\begin{cases} k_{ic} & (|u_{fi}|<u_{fi}\mathrm{max}) \\ u_{fi}\mathrm{max}/|x_i-x_{di}| & (|u_{fi}|\geqq u_{fi}\mathrm{max}) \end{cases} \tag{16}$$

ここで，u_{fi}max は，座標 x_i に働く外力の最大値（絶対値）であり，k_{ic} は，通常のばね定数である．

まず，この制御系の定常特性をしらべるため，$m_2^{-1}=0$, $m_3^{-1}=0$ とし，x_1 方向だけインピーダンスをもたせ実験を行った．$k_{1c}=80$ [N/m], u_{f1}max$=4.91$, 9.81, 14.7 [N] の場合の実験結果を **Fig. 3** に示す．定常状態では，軌道修正量と外力との間には，

$$e_{mi}=u_{fi}/k_i \tag{17}$$

の関係があるが，制御系は定値外乱があっても定常偏差が零となるように設計されているため，ほぼこの関係を満たしているのがわかる．

つぎに，同様の状態で，x_1 方向の過渡特性を調べるため，**Table 1** に示すパラメータを用い，実験を行った．結果を **Fig. 4** と **Fig. 5** に示す．またこのときのようすを **Photo. 1** に示す．提案した制御系は，基本的には定常特性におけるロバスト性しか考慮していないが，動的にもロボットアームは仮想目標軌道によく追従しているのがわかる．

Fig. 6 は，$m_1^{-1}=0$, $m_2=m_3=10$ [kg], $d_2=d_3=1$ [kgs^{-1}], $k_2=k_3=40$ [N/m] とした場合の x_2-x_3 平面内での応答を示したものである．アームの軌道は，この場合にもほぼ仮想目標軌道に追従しているのがわかる．

（注意）本実験では，アーム先端に取り付けた力

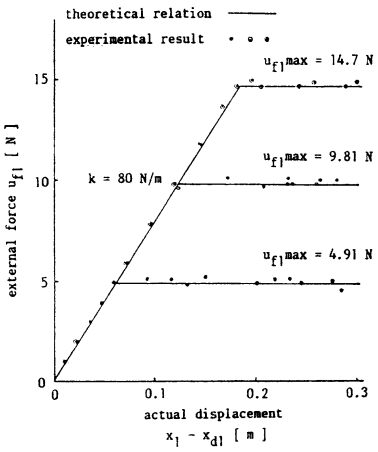

Fig. 3 Experimental result 1

Table 1 Experimental parameters for dynamic response

Fig.	m_1 (kg)	d_1 (kgs^{-1})	k_1 (N/m)	m_2 (kg)	m_3 (kg)
4	10	60	40	∞	∞
5	5	10	40	∞	∞

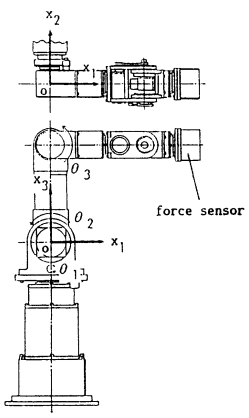

Fig. 2 Experimental robot arm

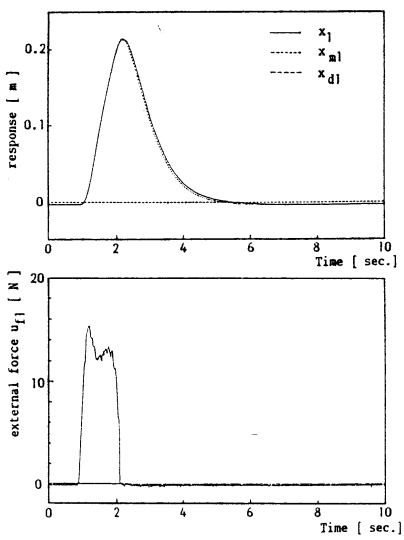

Fig. 4 Experimental result 2

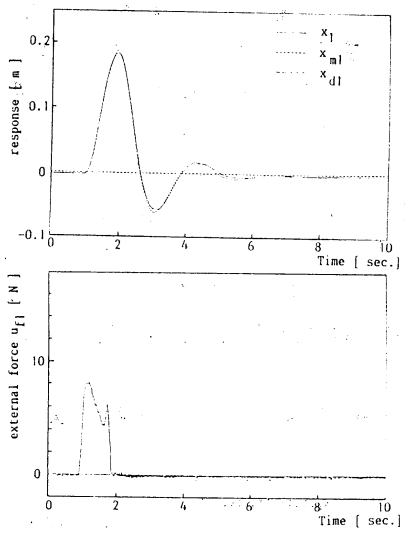

Fig. 5 Experimental result 3

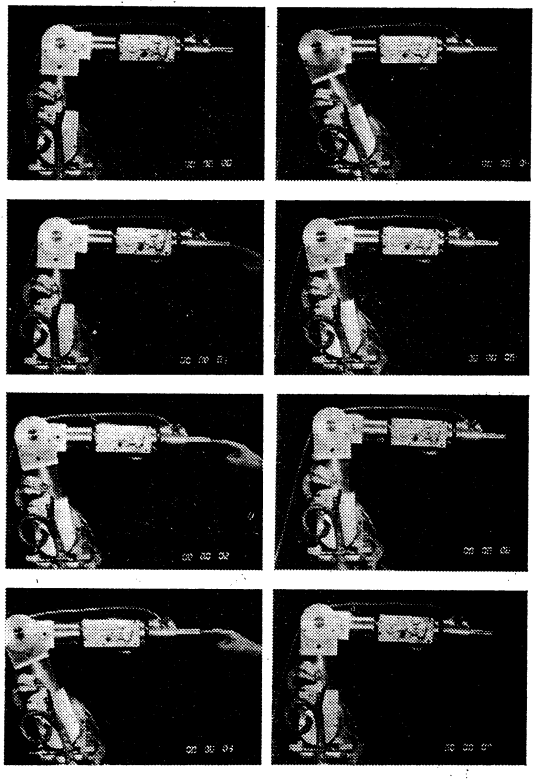

Photo. 1 Compliant motion toward external force

センサを用いて，アームに加わる外力を検出しそれをフィードバックする制御系を構成している．このように，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，場合によっては，アームが不安定になることが知られている[21]．本実験でも，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．このような現象は，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[22),23]．

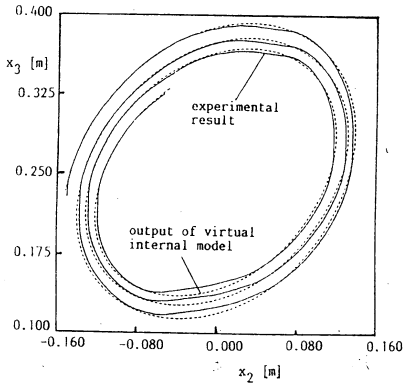

Fig. 6 Experimental result 4

5. おわりに

従来から，サーボ系は，与えられた目標値と制御対象の出力との差をできるかぎり小さくするように構成され，モデル追従サーボの場合も，規範モデルによって望ましい特性を与え，制御対象の応答をできるかぎりそれに近づけるように制御する目的で用いられてきた．しかし，ロボットなどのように，外界センサなどで得られた情報をもとにして，作業環境との危険な干渉を避けたり，環境と協調して作業をしたりするために，最初に計画した軌道を実時間で変更したい場合が生じることもある．

本論文では，モデル追従サーボ系内部の規範モデルに外界情報を入力し，規範モデルによって外界情報に対する制御戦略を記述し，ロボットの制御に利用する仮想内部モデル追従制御系を提案した．提案したサーボ系では，サーボ系に与えられた目標信号は，サーボ系内部で外界情報に基づいて自動的に修正され，修正された仮想目標信号に基づいて制御対象が制御される．

例としてロボットアームのメカニカル・インピーダンス制御に適用し，簡単な実験によりその有効性を確認した．今後，より複雑な制御問題への応用についても検討する予定である．

本研究を進めるにあたり，いろいろとご協力いただいた，山武ハネウエル(株)の井戸一朗氏，田中昴三氏，ならびに，自動化センターの皆様に感謝致します．

参考文献

1) J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. Paul: Resolved Acceleration Control of Manipulators, IEEE Trans. Automatic Control, **AC-25**-3, 468/474 (1980)
2) E. Freund: Fast Nonlinear Control with Arbitrary Pole Placement for Industrial Robots and Manipulators, Int. Journal of Robotic Research, **1**-1,

65/78 (1982)
3) 高瀬国克：マニピュレータの運動成分の一般的分解とその制御，計測自動制御学会論文集，**12**-3, 300/306 (1976)
4) T. J. Tarn, A. K. Bejzy, A. Ishidori and Y. Chen: Nonlinear Feedback in Robot Arm Control, Proceedings of the 23rd IEEE Conference on Decision and Control, 736/751, Las Vegas (1984)
5) K. Furuta, K. Kosuge, Y. Ohyama and O. Yamano: A Control Method of Manipulator with Nonlinearity, Proceedings of '83 ICAR, 229/236, Tokyo (1983)
6) K. Furuta, K. Kosuge, O. Yamano and K. Nosaki: Robust Control of a Robot Manipulator with Nonlinearity, Robotica, **2**, 75/81 (1985)
7) K. Furuta, K. Kosuge and M. Yamakita: Trajectory Tracking Control of Robot Arms Using ORBIX, Journal of Robotic Systems, **2**-1, 89/112 (1985)
8) K. Furuta, K. Kosuge and N. Mukai: Control of Articulated Robot Arm with Sensory Feedback: Laser Beam Tracking System, Trans. on IES, to appear
9) F. Miyazaki and S. Arimoto: Sensory Feedback for Robotic Manipulators, Journal of Robotic Systems, **2**-1, 53/71 (1985)
10) M. T. Mason: Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, **SMC-11**-6, 418/432 (1981)
11) D. E. Whitney: Quasi-Static Assembly of Compliantly Supported Rigid Parts, Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **104**, 65/77 (1982)
12) M. H. Raibert and J. J. Craig: Hybrid Position/Force Control of Manipulators, Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **102**, 126/133 (1981)
13) O. Khatib and J. Burdick: Motion and Force Control of Robot Manipulators, Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation, 1381/1386, San Francisco (1986)
14) N. Hogan: Impedance Control Part 1～Part 3, Trans. of ASME, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, **107**, 1/24 (1985)
15) K. Kazeroomi, T. B. Sheridan and P. H. Houpt: Robust Compliant Motion for manipulators, Part I and Part II, IEEE Journal of Robotics and Automation, **RA-2**-2, 83/105 (1986)
16) H. M. Smith and E. J. Davison: Design of Industrial Regulators, Proc. IEE, **119**, 1210/1216 (1972)
17) 平林，杉本，荒井，坂上：多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御，計測自動制御学会論文集，**22**-3, 343/350 (1986)
18) J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. Paul: On-Line Computational Scheme for Mechanical Manipulators, Trans. of ASME, Journal of Dynamic System, Measurement and Control, **102**, 69/76 (1980)
19) J. M. Hollerbach and G. Sahar: Wrist Partitioned, Inverse Kinematic Accelerations and Manipulator Dynamics, Int. Journal of Robotic Research, **2**-4, 61/76 (1983)
20) Y. Nakamura, Y. Yokokohji, H. Hanafusa and T. Yoshikawa: Unified Recursive Formulation of Kinematics and Dynamics of Robot Manipulators, Proceedings of Japan USA Symposium on Flexible Automation, 53/60, Osaka (1986)
21) C. H. An and J. M. Hollerbach: Dynamic Stability of Articulated Robot Arm with Sensory Feedback, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 890/896, Ralaigh (1987)
22) D. E. Whitney: Historical Perspective and State of the Art in Robotic Force Control, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 262/268, St. Louis (1985)
23) R.K. Roberts, R.P. Paul and B.M. Hillbery: The Effect of Wrist Force Sensor Stiffness on the Control of Robot Manipulators, Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, 269/274, St. Louis (1985)

≪付　　録≫

1. 制御則の設計[7),8)]

本文中で述べたように，軌道追従制御は軌道誤差システム(9)の安定化問題として定式化できる．この誤差システム(9)は，非線形フィードバック(5)でロボットアームを線形化したことを前提として導出したため，実際には，フィードバックに用いるパラメータ誤差などの影響でパラメータ変動や外乱項を含んでいると考えられる．したがって，こうした影響を減少するためには，パラメータ変動や外乱に対してロバストな制御系を構成する必要がある．

ここでは，制御系の一例として少なくともロボットアームの軌道の停留点では軌道誤差を零にするために，Smith らによって提案された定常外乱に対するロバストな制御系[16)]を設計する．(9)式に対して，制御変数は

$$e=[I,0][e^T,\dot{e}^T]^T \tag{A.1}$$

である．システム(9)は可制御であり，制御変数の次数は入力の次数と等しく，システム行列はフルランクをもつので，定値外乱に対するロバストな制御系が設計できるための必要十分条件は満足される．定値外乱に対してロバストな制御系は，つぎの拡大系の安定化問題となる．

$$\frac{d}{dt}\begin{bmatrix}\dot{e}\\ \ddot{e}\\ e\end{bmatrix}=A_e\begin{bmatrix}\dot{e}\\ \ddot{e}\\ e\end{bmatrix}+B_e\dot{u}_e \tag{A.2}$$

ただし，

$$A_e=\left[\begin{array}{cc:c}0 & I & 0\\ 0 & 0 & 0\\ \hdashline I & 0 & 0\end{array}\right],\quad B_e=\left[\begin{array}{c}0\\ I\\ \hdashline 0\end{array}\right]$$

拡大系(A.2)を安定化する制御則を設計するために，ここでは一例としてつぎの2次形式評価関数を考える．

$$J=\int_0^\infty\{e^TQe+\dot{u}_e^TR\dot{u}_e\}dt' \tag{A.3}$$

ここで，QとRは正定対象行列であり，(A.3)を最小

にする制御則は，次式の状態フィードバックで与えられる．

$$\dot{u}_e = -K_1\dot{e} - K_2\ddot{e} - K_3 e \qquad (A.4)$$

K_1, K_2, K_3 は次式で計算される．

$$[K_1, K_2, K_3] = R^{-1}B^T P \qquad (A.5)$$

Pは，

$$0 = A_e^T P + PA_e + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & Q \end{bmatrix} - PB_e R^{-1} B_e^T P \qquad (A.6)$$

の正定対称解である．(A.4)を積分して，

$$u_e = -K_1 e - K_2\dot{e} - K_3\int^t e\,dt' \qquad (A.7)$$

を得る．ロボットアームへの入力は，次式で与えられる．

$$\tau = M_c J_c^{-1}\left(-K_1 e - K_2\dot{e} - K_3\int^t e\,dt' + u_m - \dot{J}_c J_c^{-1}\dot{x}\right) + f_c + g_c - \tau_{fc} \qquad (A.8)$$

2. 制御系の実現

制御系は，Fig. 1のように構成され，制御則は(A.8)で実現される．(A.8)は，実際にはつぎの三つのステップで計算できる．

1) 仮想目標軌道 $x_m(t)$ と線形制御則(A.7)を計算する．

2) Inverse Kinematic Acceleration[19]を計算する．つまり，$u = u_e + u_m$ から，$\ddot{\theta} = J^{-1}(u - \dot{J}J^{-1}\dot{x})$ を求める．

3) Inverse Dynamics[18]を計算する．

つまり，ステップ2で計算された$\ddot{\theta}$と，ロボットの実際の θ, $\dot{\theta}$ から実際のロボットアームへの入力トルク τ ((1)式の右辺) を計算する．

ステップ2と3の演算方法はいろいろと研究されており，Hollerbach ら[19]や Luh ら[18]のアルゴリズムで比較的簡単に計算できる．また文献19)，20)には，ステップ2と3の重複している計算に着目し，これをさけることで，さらに演算量が減少できることが示されている．