ファジィ補償を用いたロボット アームの位置/力の加速度分解制御

許 建新* 橋本秀紀* 沈 貴宝* 原島文雄*

Resolved Acceleration Position/Force Control of Robot Arm Using Fuzzy Compensation

Jian-Xin XU Hideki HASHIMOTO Kwee-bo SIM
Fumio HARASHIMA

An approach to robot hybrid position/force control, which allows force manipulations to be realized without overshoot and overdamping while in the presence of unknown environment, is given in this paper.

The main idea is to use dynamic compensation for known robot parts and fuzzy compensation for unknown environment so as to improve system performance. The fuzzy compensation is implemented by using rule based fuzzy approach to identify unknown environment.

The establishment of proposed control system consists of following two stages. First, similar to the resolved acceleration control method, dynamic compensation and PD control based on known robot dynamics, kinematics and estimated environment stiffness is introduced. To avoid overshoot the whole control system is constructed overdamped. In the second stage, the unknown environment stiffness is identified by using fuzzy reasoning, where the fuzzy compensation rules are obtained a priori as the expression of the relationship between environment stiffness and system response.

Key Words : Fuzzy Compensation, Position/Force Control, Resolved Acceleration Control, Overshoot and Overdamping Performance

1. はじめに

ロボットアームの位置/力制御に関しては、既に数多くの報告がある¹⁻⁶⁾。これらの制御手法の共通点は、非線形補償によって制御対象を線形化し、線形化モデルに基づいて安定な制御系を構成することである。しかし、ロボットアームのような運動制御系ではアーム自身を対象として取り扱うのみではなく、環境（対象物）まで含めた系として考える必要が生じる。このとき、事前情報及び観測情報の不確実度即ちあいまいさが増えていくことは容易に想像できる。このような場合、上述の非線形

補償はその役割を果たしにくい。

一般に、位置制御と力制御が要求されたとき、制御対象あるいは外部環境と機械的に接触し、運動の拘束が存在するので、制御対象ないし外部環境までを制御系に含んで考えることが必要である。このとき、システム情報の不確実さとしては

- ① 力制御に於て、環境の柔らかさ（バネ定数）に関する不確実さ
- ② センサ分解能と測定ノイズによる不確実性
- ③ 摩擦、ペイロードなどシステムパラメータによる不確実さ

などの問題が考えられる。本研究では、特に問題①を重点に置いて取り扱う。問題②のセンサ分解能の影響につ

原稿受付 1990 年 6 月 14 日

* 東京大学生産技術研究所

いても定量的に検討を行う。

周知のように、人間の手足で力制御などの作業を行うとき、非常に優れた汎用性を持つ作業能力が示される。人間の手足がこのような優れた機能を備える理由は、人間が過去の経験あるいは知識を活用し、制御対象の特性を定量的または定性的に認識しながら（言い換えると、外部環境に関する知識を獲得しながら）目的の制御を行うからである。このような定性的過去の経験、知識を定量的に変換するのはニューロン制御⁷⁾またはファジィ制御⁸⁾に見られる特徴である。但し、多自由度ロボットアームのような複雑な電気・機械系の精密な制御要求に対しては、ファジィでの単なる“coarse”や“fine”などの経験ルールでは不十分である。従って、ロボットアームの Kinematics, Dynamics 及び Compliance に関する既知情報を最大限に利用して動的補償を行い、残りのあいまいな部分に対して予めエキスパート制御系を構成し、ファジィ情報処理手法で対処することを提案する。本研究ではこのような考えを位置/力制御へ適用して試みた。

本論文では、最初に n 自由度ロボットアームを対象にし、動的補償によって位置/力の加速度分解制御を導入し、作業空間に於て位置制御と力制御との非干渉化及び臨界応答特性を有する二次系を実現する。環境に不確実性が存在する場合に、最初にオーバードンピング応答特性を持つ制御系を構成する。次に、事前知識を用いて構成したファジィルールベースと近似推論によって、未知環境パネ定数を推定するファジィ補償部分を構成し、それを動的補償に加える。この制御系によって、力制御に於てオーバーシュートを防ぎながらオーバードンピング現象を大幅に緩和することができる。最後に、三軸ロボットアームを制御対象とし、センサ分解能による不確実性さも考慮したシミュレーションを行い、提案した制御手法の有効性を確認する。

2. 加速度分解による位置/力の制御

2.1 モデリング

本研究では、 n 自由度を有するロボットアームを制御対象とする。駆動系は力センサを持つサーボ系である。ここでは、アーム手先と接触している対象物は線形なパネ定数 K_2 [N/m] でモデル化されている。

◎アクチュエータのダイナミックス

ここでアーム駆動系として n 個の DC サーボを考える。

$$L_a \dot{i}_a + R_a i_a + K_e \dot{q} = v_a \quad (1)$$

$$J_a \ddot{q} + B_v \dot{q} + B_q \operatorname{sgn}(\dot{q}) + B_s(I - \operatorname{sgn}(|\dot{q}|)) = K_t i_a - \tau \quad (2)$$

ここで、 $L_a, R_a \in R^{n \times n}$ はモータのインダクタンスと抵抗行列である。 $K_e, K_t \in R^{n \times n}$ はアクチュエータ逆起電力係数行列トルク定数行列である。 $B_v, B_q, B_s \in R^{n \times n}$ はアクチュエータの等価粘性摩擦係数、クーロン摩擦係数と静止摩擦係数行列である。 $J_a \in R^{n \times n}$ はモータの等価慣性行列である。これらの行列は全て対角である。 $i_a, v_a \in R^n$ はアクチュエータの電流と電圧ベクトルである。 $q, \dot{q}, \ddot{q} \in R^n$ は関節の回転角度、角速度と角加速度ベクトルである。 $\tau \in R^n$ はアクチュエータの出力トルクベクトルである。多くの場合、アクチュエータの等価電気時定数は十分小さいので無視することができる。 $\operatorname{sgn}(\dot{q})$ はその各要素が次のように定義されるベクトルである。

$$\operatorname{sgn}(\dot{q}_i) = \begin{cases} 1 & \dot{q}_i > 0 \\ 0 & \dot{q}_i = 0 \\ -1 & \dot{q}_i < 0 \end{cases}$$

◎アームのダイナミックス

n 自由度アームのダイナミックスは次のように記述する。

$$J_M(q) \ddot{q} + h(q, \dot{q}) + g(q) + C_v \dot{q} + C_q \operatorname{sgn}(\dot{q}) + C_s(I - \operatorname{sgn}(|\dot{q}|)) = \tau - J^T f \quad (3)$$

ここで、 $J_M \in R^{n \times n}$ はアームの慣性行列である。 $h \in R^n$ はコリオリ及び適心力である。 $C_v, C_q, C_s \in R^{n \times n}$ はアームの等価粘性摩擦係数、クーロン摩擦係数及び静止摩擦係数行列である。 $g \in R^n$ は重力項である。 $J^T \in R^{n \times n}$ はヤコビアン行列の転置である。 $f \in R^n$ は環境からアームの手先に作用している接触力ベクトルである。

多くの場合、アクチュエータの等価電気時定数は十分小さいので無視することができる。このとき、アクチュエータとアームのダイナミックスを次のような簡潔な形にまとめることができる。

$$R_a i_a + K_e \dot{q} = v_a \quad (4)$$

$$D(q) \ddot{q} + \omega = K_t i_a \quad (5)$$

但し、 $K_t i_a = \tau$ はトルクで、

$$D(q) = J_a + J_M(q) \quad (6)$$

$$\omega = h + g + B_v \dot{q} + B_q \operatorname{sgn}(\dot{q}) + B_s(I - \operatorname{sgn}(|\dot{q}|)) + C_v \dot{q} + C_q \operatorname{sgn}(\dot{q}) + C_s(I - \operatorname{sgn}(|\dot{q}|)) + J^T f \quad (7)$$

である。

2.2 加速度分解による位置/力の完全補償

一般に力と位置制御のために、ロボットアームにエンコーダ、タコジェネレータと力センサが実装される場合が多い。ここで検出できる情報は関節角度 q と角速度 $\dot{q}$ 及びアームの手先と対象物との相互作用力 f と想定する。作業空間に於て m 自由度が力制御に指定され、残りの $n-m$ 自由度が位置制御に指定されるとする。さらに、

力目標と位置目標をそれぞれ $f_d \in R^m$ と $x_d \in R^{n-m}$ と記述し、力制御の目標は一定値とする。これらのセンサ情報を用いて、位置/力制御のフィードフォワード補償即ち動的補償が実現できる。位置制御のみの場合、加速度分解制御がよく知られている。位置/力制御においても、動的補償を用いることによってシステムの応答を改善できる。Anら⁹⁾は次の改良型加速度分解制御を提案している。

$$\tau = DJ^{-1}[(I_n - S)x^* - \dot{J}\dot{q}] + \omega + J^T S f^* \quad (8)$$

$$x^* = \ddot{x}_d + K_{PD}(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_{PP}(x_d - x) \quad (9)$$

$$f^* = K_{FP}(f_d - f) \quad (10)$$

ここで、 x は作業空間に於て一般化座標で、 $\dot{x} = J\dot{q}$ である。また、 $S = \text{diag}(O_{n-m} I_m)$ は作業空間に於て各座標の制御性質を力にするか位置にするかを決定する行列である。 I_n と I_m は n 次元と m 次元単位行列である。 O_{n-m} は次元 $n-m$ のゼロ行列である。 (K_{PD}, K_{PP}) は位置制御のD制御ゲイン行列とP制御ゲイン行列で、臨界ダンピング応答を得るように指定される。 K_{FP} は力制御のP制御ゲイン行列である。

従来のハイブリッド制御方式と比べて、上述の制御方式の特徴は位置制御部分に関してダンピング項を導入するところにある。しかし、この改良型加速度分解制御にも二つの問題が存在する。

一つは、作業空間において力制御と位置制御との間に完全非干渉化にはなっていないことである。(8)を(5)に代入すると

$$D(q)\ddot{q} + \omega = DJ^{-1}[(I_n - S)x^* - \dot{J}\dot{q}] + \omega + J^T S f^* \quad (11)$$

が得られる。上式の両側に JD^{-1} を掛け、 $\ddot{x} = J\ddot{q} + \dot{J}\dot{q}$ を利用することによって、

$$(I_n - S)[(\ddot{x}_d - \ddot{x}) + K_{PD}(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_{PP}(x_d - x)] - S\ddot{x} + JD^{-1}J^T SK_{FP}(f_d - f) = 0 \quad (12)$$

が得られる。一般に $JD^{-1}J^T S$ の最初の $n-m$ 行は非零なので、力制御から位置制御への作用が存在する。一方 $S\ddot{x}$ の影響で(12)から $(f_d - f) = 0$ を得られない。但し、作業空間における力制御に関する m 次元の加速度が極めて小さいので、 $JD^{-1}J^T$ の特異点の近傍でなければ $S\ddot{x}$ の影響が無視できると考えられる。

もう一つは、力制御部分にダンピング項がない(f の微分情報がない)ので、制御ゲインの調整が難しく、オーバーシュートや振動現象が起こり易いことである。

上述の問題を解決するために、次の位置/力の加速度分解制御を提案する。

$$\tau = DJ^{-1}[(I_n - S)x^* + SK_{eq}^{-1}f^* - J\dot{q}] + \omega \quad (13)$$

$$x^* = \ddot{x}_d + K_{PD}(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_{PP}(x_d - x) \quad (14)$$

$$f^* = \dot{f}_d + K_{FD}(\dot{f}_d - \dot{f}) + K_{FP}(f_d - f)$$

$$= -K_{FD}\dot{f} + K_{FP}(f_d - f) \quad (15)$$

ここで K_{eq} は環境と力センサの等価バネ定数である。環境に関する正確な情報が得られる場合、 $\dot{f}$ は $K_{eq}\dot{x}$ で算出できる。上述した制御則の有効性を確かめるために、次の制御関係式を選ぶ。

$$\eta = (I_n - S)\bar{\eta}_p + S\bar{\eta}_f \quad (16)$$

$$\bar{\eta}_p^T = [\eta_p^T \ 0 \cdots 0] \quad \bar{\eta}_f^T = [0 \cdots 0 \ \eta_f^T]$$

$$\eta_p = (\ddot{x}_d + \ddot{x}) + K_{PD}(\dot{x}_d - \dot{x}) + K_{PP}(x_d - x) \quad (17)$$

$$\eta_f = (\dot{f}_d - \dot{f}) + K_{FD}(\dot{f}_d - \dot{f}) + K_{FP}(f_d - f) \quad (18)$$

(16) 式から

$$\begin{aligned} \eta &= (I_n - S)(x^* - \ddot{x}) + S(f^* - \dot{f}) \\ &= (I_n - S)x^* + S f^* - (I_n - S + SK_{eq})\ddot{x} \end{aligned} \quad (19)$$

となる。一方、制御則(13)を(5)に代入することによって、

$$\begin{aligned} \ddot{x} &= J\ddot{q} + \dot{J}\dot{q} = JD^{-1}D\ddot{q} + \dot{J}\dot{q} \\ &= (I_n - S)x^* + SK_{eq}^{-1}f^* \end{aligned} \quad (20)$$

を得る。さらに、 $(I_n - S)S = 0$ 、 $(I_n - S)(I_n - S) = (I_n - S)$ 及び $SS = S$ によって、

$$(I_n - S + SK_{eq})\ddot{x} = (I_n - S)x^* + SK_{eq}K_{eq}^{-1}f^*$$

を得るので(19)から $\eta = 0$ が得られる。 $S(I_n - S) = 0$ なので、 $\bar{\eta}_p^T = \bar{\eta}_f^T = 0$ になり位置制御と力制御とは非干渉化される。従って、制御ゲインを

$$K_{PD}^2 = 4 K_{PP}$$

$$K_{FD}^2 = 4 K_{FP}$$

と選べば、制御システムの挙動は $\eta_f = 0$ と $\eta_p = 0$ に記述され、システムは臨界状態にある線形二次系となる。

3. ファジィ補償を用いるハイブリッド制御

先に述べた位置/力の加速度分解制御では、制御ゲインの大きさは等価バネ定数と直結している。式(13)からわかるように、ロボットアームと接触している環境が硬ければ硬いほど、同じ程度の誤差に対して制御入力 τ が小さくなり、既ち制御ゲインは等価的に減っていく。従って、環境の柔らかさに関する情報が不十分な場合、完全な動的補償が実現できず、オーバーダンピングとオーバーシュートの問題が生じる。

一般に、力制御の場合にオーバーシュートを防止することは特に重要である。従って、安全のためまず制御系をオーバーダンピング系のように構成し、次に何らかの手法で環境の柔らかさに関する情報を獲得し、安全性を保ちながらシステムの応答を改善すればよい。

以下これらの問題に関して検討を行い、解決手法を提案する。

3.1 オーバーダンピング制御系の構成

環境のあいまいさに関する事前情報として、等価バネ

定数の範囲を $K_{\min}$ から $K_{\max}$ とする。等価バネ定数の推定値を K_{et} とする。このとき、動的補償 (13) は

$$\tau = D J^{-1} [(I_n - S)x^* + S K_{et}^{-1} f^0 - \dot{J} \dot{q}] + \omega \quad (22)$$

$$f^0 = -K_{FD} K_{et} \dot{J} \dot{q} + K_{FD} (f_d - f) \quad (23)$$

となる。(22) を (16) に代入し、(19) から (21) の導出手順を参考することによって

$$\eta = S(I_n - K_{eq} K_{et}^{-1}) K_{FP} (f_d - f) \quad (24)$$

となる。(24) の両側に S をかけ、 $(I_n - S)S = 0$ と $SS = S$ により、

$$\begin{aligned} S\eta &= S\eta_f = S(-\ddot{f} - K_{FD}\dot{f} + K_{FP}(f_d - f)) \\ &= S(I - K_{eq}K_{et}^{-1})K_{FP}(f_d - f) \end{aligned} \quad (25)$$

を得る。従って、力制御部分の伝達関数は

$$\begin{aligned} (s^2 I_n + K_{FD}S + K_{eq}K_{et}^{-1}K_{FP})f(s) \\ = K_{eq}K_{et}^{-1}K_{FP}f_d/s \end{aligned} \quad (26)$$

となる。ここで s はラプラス作用素である。

環境のバネ定数 K_{eq} が推定値 K_{et} より大きな場合、制御系は振動となり、オーバーシュートが生じる。一般に、力制御の場合にオーバーシュートを防止することは特に重要である。従って、安全のための推定値 K_{et} を $K_{\max}$ に選べば良い。 $K_{eq}K_{et}^{-1} < 1$ のとき、システム全体がオーバードampingとなる。一般にオーバーシュートを防ぐためシステムの応答が多少遅れても構わないが、 $K_{\max}$ と K_{eq} が相当離れると、例えば数ケタ異なると、システムの応答は極めて遅くなり、対策を考えなければならない。このことについてはさらに詳しく検討する。

3.2 ファジィ補償の考え方

オーバーシュートを防ぐために、環境のバネ定数の最大値に基づく動的補償を構成する。システム応答の遅れを縮小するために、環境の柔らかさをオンライン同定し、それに基づいて動的補償を行えば良い。しかし、ロボットアームの非線形性により、通常同定手法では K_{eq} を推定するのは困難である。また、 K_{eq} の変動範囲が非常に広いので、同定過程においてオーバーシュートを生じる恐れがある。一方、人間の手足で力制御などの作業を行うとき、非常に優れた汎用性を持つ作業能力が示される。すなわち、人間は過去のあいまいな経験あるいは知識を活用することによって、制御対象の特性を同定しながら制御を行うことができる。従って、このような考え方から、制御系に関する定量あるいは定性的な知識を用い、システム応答と環境パラメータとの関係を事前に近似的に調べることによって、ファジィ知識ベースが構成できる。これらの知識を生かし、動的補償に加えることによって、システムの応答特性が改善されることが考えられる。既に前章で述べたように、動的補償によってシステムの応答は二次系と似ているので、システムの挙

動から環境のバネ定数を近似的に推定することができる。

具体的には、予め等価バネ定数 K_{eq} と時刻 t に関して若干のサンプル点 (基準点) を選び、関係式 (29) を通してオフライン計算によってシステム応答 $f(t)$ と等価バネ定数 K_{eq} との非線形関係をファジィ化された $\text{IF}(\cdot)\text{THEN}(\cdot)$ ルールの形式で記憶しておく。さらに、近似関係を基にし、実システムの応答との照合を行い、近似推論により未知パラメータを同定することができる。

3.3 ファジィ補償の実現

前述の考え方に基づいて、ファジィ補償の実現手順を示す。ここではスカラー系のみを示すが、本手法を多変数系へ拡張するのは容易である。

◎基準モデル

関係式 (26) を参照し、次の二次系を基準モデルとして選ぶ。

$$f(s) = \omega^2 / s(s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2) \quad (27)$$

◎サンプル集合

等価バネ定数を $K_{eq} \in [k_{\min}, k_{\max}]$ とする。いま K_{eq} に関して r 個の基準点に対してシステム (27) の応答を調べる。

$$k_{eq} = Q \in Q = \{Q_1, Q_2, \dots, Q_r\}$$

ここで、 Q_i ($i=1, \dots, r$) はバネ定数の状態を表す。例えば $Q_1 = k_{\min}$ はバネ定数の状態を VS (Very Soft)、 $Q_r = k_{\max}$ を Hd (Hard) と定義する。各基準値を環境のバネ定数の真値とし、 k_{eq} の予測値を $k_{\max}$ に選ぶ。

このとき、力制御状態の各座標に於てシステムの応答は

$$y_i(s) = \omega_i^2 / s(s^2 + 2\zeta_i\omega_i s + \omega_i^2) \quad i=1, \dots, r \quad (28)$$

となる。固有周波数と減衰率はそれぞれ

$$\omega_i = \sqrt{k_{eq}k_{et}^{-1}k_{FP}} \quad (29)$$

$$\zeta_i = k_{FD} / 2\sqrt{k_{eq}k_{et}^{-1}k_{FP}} = \sqrt{k_{et}/k_{eq}} \quad (30)$$

である。明らかに、 $k_{eq} = \text{Hd}$ を除いて全て $\zeta_i > 1$ なので、システムの応答にはオーバードampingが生じる。

$k_{eq} \in [k_{\min}, k_{\max})$ の場合、任意の時刻 t_j に対して、各基準点に対応するシステムの応答が一意的に定められる。即ち、

$$y_{qi}(t_j) = 1 + \frac{\omega_i}{2\sqrt{\zeta_i^2 - 1}} \left(\frac{\exp(-\lambda_i' t_j)}{\lambda_i'} - \frac{\exp(-\lambda_i'' t_j)}{\lambda_i''} \right) \quad (31)$$

但し、

$$\lambda_i' = (\zeta_i + \sqrt{\zeta_i^2 - 1})\omega_i \quad (32)$$

$$\lambda_i'' = (\zeta_i - \sqrt{\zeta_i^2 - 1})\omega_i \quad (33)$$

である。ここで $y_{qi}(t_j)$ ($i=1, \dots, r; j=1, \dots, n_T$) をサンプル集合とする。

◎システム応答のファジィ化

Fig. 3 Robot arm of 3 D.O.F. in Cartesian space

4. 検討と考察

ファジィ補償を用いた位置/力の加速度分解制御の有効性を検証するために、上述した制御法を Fig. 3 に示す三自由度ロボットアームへ適用する。

(a) System response along X coordinate in position control

(b) System response along Y coordinate in position control

(c) System response along Z coordinate in force control w.r.t. $k_{eq}=15000\text{N/m}$

Fig. 5 System response of resolved acceleration position/force control with exact dynamic compensation

Fig. 4 System response of reference model

4.1 三軸アーム制御系の設計

ロボットアームの長さはそれぞれ 0.1m, 0.5m, 0.5m である。サーボの電気時定数は {0.0017 sec, 0.0009 sec, 0.0009 sec} なので、制御系を構成する際無視する。等価バネ定数の既知範囲を $K_{\min}=10^2$ から $K_{\max}=10^5$ N/m とする。

アーム先端の位置を (0.4, 0, 0)m から (-0.1, 0.5, 0)m までに移動するとする。x, y 座標に自由運動ができる。z 座標方向に手先と環境が接触して、-z 方向に 15 N の力が要求されるとする。

PD 制御ゲイン行列を次のように選ぶ。

$$K_{PP} = \text{diag}(16, 16, 16)$$

$$K_{PD} = \text{diag}(8, 8, 8)$$

$$K_{FP} = \text{diag}(100, 100, 100)$$

(a) Force response along Z coordinate $k_{et}=k_{eq}=1500\text{N/m}$

(b) Force response along Z coordinate $k_{et}=k_{eq}=150\text{N/m}$

Fig. 6 System response of resolved acceleration position/force control using exact equivalent stiffness (Numerical example I)

(a) Equivalent stiffness is 1500N/m
 $k_{fp}=0.2$

(b) Equivalent stiffness is 150N/m
 $k_{fp}=150$

Fig. 7 system response along force control coordinate in resolved acceleration force control (Numerical example I)

$$K_{FD} = \text{diag}(20, 20, 20)$$

従って、作業空間に於て位置制御と力制御はそれぞれ周波数が $\sqrt{K_{PP}}=4 \text{ rad/sec}$ と $\sqrt{K_{FP}}=10 \text{ rad/sec}$ の臨界ダンピング応答が指定される。規範モデルを (27) と選ぶ。

環境の柔らかさの変動範囲に関して以下の十個の基準点を選ぶ。

$k_{eq}=100$	→VS (Very Soft)
$k_{eq}=500$	→So (Soft)
$k_{eq}=1,000$	→QS (Quite Soft)
$k_{eq}=1,800$	→RS (Rather Soft)
$k_{eq}=3,000$	→LS (a Little Soft)
$k_{eq}=5,000$	→No (Normal)
$k_{eq}=8,000$	→LH (a Little Hard)
$k_{eq}=12,000$	→RH (Rather Hard)
$k_{eq}=30,000$	→QH (Quite Hard)
$k_{eq}=10^5$	→Hd (Hard)

従って、 $Q = \{VS, So, QS, RS, LS, No, LH, RH, QH, Hd\}$ となる。 $k_{et}=10^5$ を選び、基準点に対応するシステムの応答は Fig. 4 に示す。図によってわかるように、基準点の値は全空間を均等化するように選ばれる。

基準点集合 Q に応じてファジィ応答集合を $Y = \{VS, Sm, QS, RS, LS, Md, LB, RB, QB, Bg\}$ に指定する。それぞれのラベルの意味は“Very Small”, “Small”, “Quite Small”, “Rather Small”, “a Little Small”, “Medium”, “a Little Big”, “Rather Big”, “Quite Big” と “Big” である。各メンバーシップ関数は Fig. 1

(a) Force response along Z coordinate
 $k_{eq}=15000 \text{ N/m}$
 $k_{et}=k_{max}=10^5 \text{ N/m}$

(b) Force response along Z coordinate
 $k_{eq}=1500 \text{ N/m}$
 $k_{et}=k_{max}=10^5 \text{ N/m}$

(c) Force response along Z coordinate
 $k_{eq}=150 \text{ N/m}$
 $k_{et}=k_{max}=10^5 \text{ N/m}$

Fig. 8 System response of resolved acceleration position/force control using maximum equivalent stiffness (Numerical example I)

に示しているように、右側が Mem 1, 左側が Mem 2 で表されている。また、その台集合は時刻 t_j に応じて (27) 式から定められている。

サンプリング誤差と測定ノイズの影響を考慮するために、ある時間帯にわたって計算した推定値の平均化したものが望ましい。そのため、サンプリング時刻集合 $T = \{t_j | j \in n_T\}$ の個数 n_T を増加すれば良いが、それと共に $\text{IF}(\cdot) \text{ THEN}(\cdot)$ ルールの個数も n_T に比例して増える。 n_T を増やさずに推定値の平均化を実現するために、任意の二つの時刻 t_j と t_{j+1} の間にファジィ化された状態のサンプル値を次の補間式でオンライン算出する。

$$\forall t \in [t_j, t_{j+1}) \quad \forall Q \in Q$$

$$Y_Q(t) = \frac{Y_Q(t_{j+1}) - Y_Q(t_j)}{t_{j+1} - t_j} (t - t_j) + Y_Q(t_j) \quad (40)$$

本研究では $T = \{0.75 \text{ sec}, 0.9 \text{ sec}\}$ と選ぶ。

4.2 数値例による検証

Fig. 5 では位置/力制御の一例を示す。 x と y 座標方向に位置制御で、 z 座標方向に力制御を行う。等価バネ定数は既知で $k_{eq}=15,000 \text{ N/m}$ である。設計通り臨

Fig. 9 System response of resolved acceleration position/force control with fuzzy compensation (Numerical example I)

界ダンピング応答が見られる。さらに、 $k_{eq}=1,500\text{ N/m}$ と $k_{eq}=150\text{ N/m}$ の場合の力制御部分の応答を **Fig. 6** に示す。 k_{eq} の大幅の変動に関わらず、完全な動的補償によってシステムは全く同様な挙動を示した。一方、改良型加速度分解制御 (8) を用いたシステムの力制御応答を **Fig. 7** に示す。 k_{eq} の 10 倍の変動に応じて制御ゲインを 0.2 から 150 まで調整したにも関わらず、システム応答が常に振動している。

但し、等価バネ定数 k_{eq} が未知な場合、予測値とのマッチング度合によってシステム応答の様子が著しく変わる。**Fig. 8** の (a) では、 $k_{eq}=15,000\text{ N/m}$ は予測値 $k_{et}=10^5\text{ N/m}$ とそれほど離れていないので、およそ 5 秒で目標値に近づく。(b) と (c) の場合、予測値と真値は 1 ケタないし 2 ケタ以上も異なるので、システム応答も次第に遅くなる。よって、ファジィ補償が必要になる。**Fig. 9** はファジィ補償を用いた位置／力の加速度分解制御によるシステムの力応答である。 $k_{eq}=15,000\text{ N/m}$ 、 $k_{eq}=1,500\text{ N/m}$ と $k_{eq}=150\text{ N/m}$ に対してファ

Fig. 10 Relationship between true and measured force in the case sensor resolution is considered

Fig. 11 System response in the case force sensor resolution is considered (Numerical example I)

Fig. 12 System response in the case maximum equivalent disturbance of +5 N is considered (Numerical example I)

ジィ推論の結果はそれぞれ $k_{ct}=16213.5\text{ N/m}$, $k_{ct}=1538.5\text{ N/m}$ と $k_{ct}=153.9\text{ N/m}$ である。システム応答の改善は図によって明かである。シミュレーションでは制御サンプリングは 1msec である。

4.3 センサ分解能の影響に関する考察

以上の制御アルゴリズムとシミュレーションでは、位置センサ（エンコーダ）、速度センサ（タコジェネレータ）と力センサが無限の分解能を持つと仮定しているが、実際の場合にセンサ分解能の影響について検討することが必要である。特に、力制御部分のファジィ補償は、上述した三種のセンサ分解能ともに関連しているので、提案した制御アルゴリズムの有効性検討にセンサ分解能の影響に関して定量的に考察しなければならない。

ここで制御系の測定に次のようなセンサ分解能を持つとする。

$$\hat{f}=f+\Delta f \quad \Delta f \in [-\varepsilon_1, \varepsilon_1] \quad (41)$$

$$\hat{q}=q+\Delta q \quad \Delta q \in [-\varepsilon_2, \varepsilon_2] \quad (42)$$

$$\hat{\dot{q}}=\dot{q}+\Delta \dot{q} \quad \Delta \dot{q} \in [-\varepsilon_3, \varepsilon_3] \quad (43)$$

Fig. 13 System response in the case maximum equivalent disturbance of -5 N is considered (Numerical example I)

但し、“ ε ”はセンサ分解能を考慮した測定値である。 $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ と ε_3 はそれぞれ位置センサ、速度センサと力センサの分解能を表すベクトルである。ここで、あらゆるサーボモータのエンコーダが 5,000 pulse/rev で、タコジェネレータが 1,000 rpm で、A/D 変換器が 16 bit であるとする。なお、モータ軸とアームは 80 : 1 のハーモニックでカップリングしている。従って、エンコーダのセンサ分解能は $\varepsilon_{21}=1.57 \times 10^{-5}\text{ rad}$ である。タコジェネレータのセンサ分解能は約 $\varepsilon_{31}=2 \times 10^{-5}\text{ rad/sec}$ である。力センサの定格値が 20 N で、そのセンサ分解能は定格値の 0.1%、即ち $\varepsilon_{11}=2 \times 10^{-2}\text{ N}$ である。Fig. 10 に力センサ分解能を考慮したときの測定値と真値との関係を示す。

センサ分解能からファジィ補償の推定への影響は、主に柔らかい環境に於て力センサ分解能からファジィ推論 (34) への影響と、上述の三種のセンサ分解能から動的補償 (22), (23) への影響である。以下にそれぞれに関して検討する。

Fig. 14 System response of resolved acceleration position/force control with fuzzy compensation (Numerical example II)

まず、バネ定数が k_{eq} ="VS" のとき、規範モデル (28) のシステム応答はほぼ 10^{-3} オーダに近く、大抵 0.5 sec 以後にシステム応答は 2×10^{-3} オーダを越える。一方、力目標値が定格値の 50% 以上あるとすると、力センサ分解能によって f/f_d は 2×10^{-3} までの計算精度が得られる。本研究で $T = \{0.75 \text{ sec}, 0.9 \text{ sec}\}$ を選ぶ理由はそこにある。Fig. 11 (a), (b), (c) に $k_{eq} = 15,000 \text{ N/m}$, $k_{eq} = 1,500 \text{ N/m}$ と $k_{eq} = 150 \text{ N/m}$ に対してファジィ補償を用いた制御結果を示す。ファジィ推論の結果はそれぞれ $k_{et} = 15,996 \text{ N/m}$, $k_{et} = 1,543 \text{ N/m}$ と $k_{et} = 189.8 \text{ N/m}$ である。Fig. 9 と対照すれば、力センサ分解能の影響はほぼ無視できることがわかる。

一方、あらゆるセンサ分解能を考慮するとき、動的補償 (22), (23) 中の f^0 は

$$\hat{f}^0 = -K_{FD}K_{et}J(\hat{q})\hat{q} + K_{FP}(f_d - \hat{f}) \quad (44)$$

となる。 $J(\cdot)$ に関してテイラー級数展開によって

$$\begin{aligned} \hat{f}^0 &= -K_{FD}K_{et}J(q + \Delta q)(\hat{q} + \Delta \hat{q}) \\ &\quad + K_{FP}(f_d - f - \Delta f) \\ &= -K_{FD}K_{et}J(q)\hat{q} + K_{FP}(f_d - f) - \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &-K_{FD}K_{et}J(q)\Delta \hat{q} \\ &-K_{FD}K_{et} \sum_{i=1}^n (\partial J(q)/\partial q_i) \Delta q_i \hat{q} - K_{FP}\Delta f - O(\cdot) \\ &= f^0 + \Delta \eta + O(\cdot) \end{aligned} \quad (45)$$

ここで、

$$\begin{aligned} \Delta \eta &= -K_{FD}K_{et}J(q)\Delta \hat{q} - K_{FD}K_{et} \\ &\quad \times \sum_{i=1}^n (\partial J(q)/\partial q_i) \Delta q_i \hat{q} - K_{FP}\Delta f \end{aligned} \quad (46)$$

はセンサ分解能に比例し、 $O(\cdot)$ はセンサ分解能の二次以上に比例している。センサ分解能の精度が十分高いとき、 $O(\cdot) \approx 0$ と見なせる。従って、 $\Delta \eta$ のみの影響を考慮すれば良い。(23) のかわりに (45) を用いて、(22) を (16) に代入すると、力制御部分に関して

$$\begin{aligned} S(\ddot{f} + K_{FD}\dot{f} + K_{eq}K_{et}^{-1}K_{FP}f) \\ = SK_{eq}K_{et}^{-1}(K_{FP}f_d + \Delta \eta) \end{aligned} \quad (47)$$

となる。ファジィ補償の効果は推定値の精度によって決められるので、センサ分解能の影響を考察しようとするとき、 $K_{FP}f_d$ と $\Delta \eta$ との相対大きさを調べば良い。ここで、検討する対象はベクトルなので、任意のベクトル $x \in R^n$ に関して次の二種のノルムを定義する。

$$\|x\|_1 := \max_i |x_i| \quad (48)$$

$$\|x\|_2 := \sqrt{x^T x} \quad (49)$$

従って、 $K_{FP}f_d$ の各要素の絶対値と $\|\Delta \eta\|_1$ と比較すれば十分である。但し、 $\|\Delta \eta\|_1$ を直接に調べるのは不便なので、 $\|\Delta \eta\|_2 \geq \|\Delta \eta\|_1$ の性質を用いて $K_{FP}f_d$ の各要素の絶対値と $\|\Delta \eta\|_2$ と比較すれば良い。シュワルツ不等式により、

$$\begin{aligned} \|\Delta \eta\|_2 &\leq k_{FD}k_{et} \left(\|J\Delta \hat{q}\|_2 + \sum_{i=1}^n \|(\partial J/\partial q_i)\hat{q}\|_2 \|\Delta q_i\|_2 \right) \\ &\quad + k_{FP}\|\Delta f\|_2 \end{aligned} \quad (50)$$

を得る。従って、

$$\begin{aligned} \|\Delta \eta\|_2 &\leq k_{FD}k_{et} \{ \lambda_{\max}^{1/2}(J^T J) \|\Delta \hat{q}\|_2 \\ &\quad + \sum_{i=1}^n \lambda_{\max}^{1/2}[(\partial J/\partial q_i)^T (\partial J/\partial q_i)] \|\hat{q}\|_2 \|\Delta q_i\|_2 \} \\ &\quad + k_{FP}\|\Delta f\|_2 \end{aligned} \quad (51)$$

を得る。ここで $\lambda_{\max}(\cdot)$ は行列の最大固有値を表わす。

(51) に基づいて 4.2 に述べた三軸アームの位置/力制御に関する具体例を考察する。まず、ロボットのメカニズムによって $\lambda_{\max}[(\partial J/\partial q_i)^T (\partial J/\partial q_i)]$ ($i=1, 2, 3$) 及び $\lambda_{\max}(J^T J)$ が全て 1.25 であることがわかる。力制御の目標値は常に定格値に近く、数値例では $f_d = 15 \text{ N}$ とする。実際にサーボ系の位置/力制御を行うときに、 dq_i/dt の大きさは大抵 1~3 rad/sec である。簡単な計算によって、 $\|\Delta \eta\|_2/k_{FP} \leq 4.3$ である。従って、力制御の伝達関数 (26) に於て、 $f_d = -15 \text{ N}$ に最大は $\pm 5 \text{ N}$ の外乱が加えられたと見なせる。ファジィ補償の

推定値がこの外乱項によって影響される。つまり、+5 Nの外乱を加えたとき、ファジィ補償の推定値が真値より約 57~90% 大きい。また、-5 Nの外乱を加えたとき、ファジィ補償の推定値が真値より 5.3~28.4% 小さい。但し、本論文で提案したファジィ補償の目的は、精密なバネ定数を推定するよりも、システムのオーバーダンピング現象を緩和することである。予測したバネ定数とその真値の差は推定によって数十倍から数十パーセントまで縮んでかつオーバーシュートが生じなければ、ファジィ補償の目的が十分達成したと考えられる。なお、(47)式は最も厳しい条件下で導出されたので、一般にセンサ分解能による等価外乱はそれほど大きくないことに注意されたい。

Fig. 12 では +5 N の外乱を加えたときのシステム応答を示す。等価バネ定数 $k_{eq}=15,000$ N/m, $k_{eq}=1,500$ N/m と $k_{eq}=150$ N/m に対してファジィ推論の結果はそれぞれ $k_{et}=28,644$ N/m, $k_{et}=2,349$ N/m と $k_{et}=285$ N/m である。ファジィ補償の効果は依然明かである。一方、-5 N の外乱に対してシステム応答を Fig. 13 に示す。等価バネ定数 $k_{eq}=15,000$ N/m, $k_{eq}=1,500$ N/m と $k_{eq}=150$ N/m に対してファジィ推論の結果はそれぞれ $k_{et}=10747.3$ N/m, $k_{et}=1149.4$ N/m と $k_{et}=142.1$ N/m である。オーバーシュートはほぼ見られない。

最後に、 x と y 座標方向に力制御、 z 座標方向に位置制御の一例を示す。 x と y 座標方向の等価バネ定数はそれぞれ 15,000 N/m, 150 N/m である。位置制御の目標は (0, 0.5, 0.4) から (0, 0.5, 0) までアームの手先を動かすことで、 x と y 座標方向の力制御の目標はそれぞれ -15 N と 20 N である。等価バネ定数が未知な場合に、ファジィ補償によって同定したバネ定数がそれぞれ 14,203.7 N/m と 182.8 N/m で、システム応答の改善は Fig. 14 によって明かである。

5. 結 論

本論文では、多自由度ロボットアームの位置/力制御に関して、ファジィ補償を用いた加速度分解制御を提案した。本制御法は以下の考え方に基づくものである。即ち、精密な制御に適している完全動的補償即ち加速度分

解制御と、あいまい情報処理能力の高いファジィ補償を結合することによって、より高度な制御性能を有する制御系を実現できる。シミュレーション結果に示したように、正確な対象モデルに基づく動的補償と、ヒューリスティックな制御ルールに基づくファジィ補償を同時に用いることによって、環境バネ定数が未知であってもオーバーシュートとオーバーダンピングの問題が解決でき、良好なシステム応答特性が得られた。なお、センサ分解能に対する本制御手法の有効性を、定量的解析とシミュレーションによって確認した。

最後に、摩擦項、ペイロードの変動や測定ノイズが存在する場合に、理想的なシステム応答を如何に実現することに関する研究が必要であり、今後の課題と考えている。

参 考 文 献

- 1) M. H. Raibert, and J. J. Craig : Hybrid position/force control of manipulators, Trans. ASME J. Dyn. Sys. Meas., Contr., Vol.103, pp.126-133, 1981
- 2) M. T. Mason : Compliance and force control for computer controlled manipulators, Trans. IEEE Sys., Man, Cyber. SMC-16(6), pp.418-432, 1981
- 3) M. H. Liu, W. S. Chang, and L. Q. Zhang : Dynamic and adaptive force controllers for robotic manipulators, Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1478-1483, 1988
- 4) N. Hogan : Impedance control an approach to manipulation, Part 1 : Theory, Part 2 : Implementation, Part 3 : Applications, Trans. ASME J. Dyn. Sys. Meas., Contr. Vol.107, pp.1-24, 1985
- 5) D. E. Whitney : Historical perspective and state of the art in robot force control, Int. J. Robotics Research, Vol.6, No.1, pp.3-14, 1987
- 6) 吉川, 杉江, 田中 : ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御—制御系設計と実験—, 日本ロボット学会誌, 6巻, 5号, pp.16-22, 1989
- 7) 鶴田, 光岡, 福田, 栗原 : 神経回路モデルによるロボットの力制御, 日本ロボット学会誌, 7巻, 1号, pp.47-51, 1989
- 8) Y. F. Li, and C. C. Lau : "Application of fuzzy control for servo systems", Proc. of IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation, pp.1511-1519, 1988
- 9) C. H. An, and J. M. Hollerbach : The role of dynamic models in the Cartesian force control of manipulators, Int. J. of Robotics Research, Vol.8, No.4, pp.51-72, 1989
- 10) 菅野道夫 : ファジィ制御, 日刊工業新聞社, 1988