動的補償器を用いたロボットアームの力制御系に対する特性改善*

佐野明人^{*1}, 古荘純次^{*1}, 大脇智徳^{*2}Characteristic Improvement of Force Control System of Robot Arms
by Using Dynamic Compensator

Akihito SANO, Junji FURUSHO and Tomonori ŌWAKI

A robot under end-point force control may often exhibit unstable behavior upon contact with the environment. To avoid these dynamic problems, control gains are usually reduced until stable behavior is obtained. In this study, dynamic compensators are adopted in force control loop in order to maintain high control gains. The force control of robot manipulators is analyzed in consideration of the flexibility of the driving system. The experimental results show that the proposed control methods give quick force response, and do not have so sensitive properties to parameter variations.

Key Words: Robotics, Automatic Control, Force Control, Dynamic Compensator, Flexible Driving System

1. はじめに

現在の産業用ロボットでは、基本的に一定環境下で一定軌道に追従することが考えられており、その制御方式は位置制御が主流である。しかし、この制御方式では、外部環境のわずかな変化に対しても順応することが困難である。そこで、このような場合、対象からの拘束に順応することが可能な力制御機能を付加することが有効である。次世代のロボットが、人間の行っている環境との接触を伴う高度な作業領域に少しでも参入していくためには、力制御の能力を高めていく必要がある⁽¹⁾⁽²⁾。

力制御においては、関節トルクを正確に制御できることが重要である。DD(ダイレクトドライブ)ロボットは、電流を制御することによって、関節トルクをほぼ正確に制御できる。しかし、トルク重量比が小さいDDロボットは、自重を支えることも困難であったり、可搬重量と自重との比が小さいなどの問題があり、産業用ロボットとしては水平多関節ロボットで実現されている程度である。また、コストの面からもその実現

は一部のロボットに限られている。一方、実際の現場で用いられているほとんどのロボットは、何らかの減速機を使用している。これらの減速機には弾性、摩擦、トルク変動等があるため、モータへ供給する電流の制御が必ずしも関節トルクを制御することにはならず、力制御の質を低下させている^{(3)~(7)}。そこで多くの場合、各関節ごとにまず局所位置あるいは速度フィードバック制御を行い、次に手首力覚センサからの力信号を用いて局所フィードバック制御器への目標値を補正する階層的な力制御方式が採用されている。

本研究は、減速機付のロボットアームを用いた力制御について検討する。著者らは、外界と接触しながら行われる力制御では、ロボットの姿勢(環境との相対的な姿勢も含む)、関節剛性、力覚センサの剛性などの変化によって、大きくその制御性能が変化することを前報⁽¹⁶⁾で報告した。本論文では、力制御系に動的補償器を導入することにより、その制御性能がどのように改善されるかについて、実験およびシミュレーションの両面から検討する。

第2章では、駆動系に弾性を有するスカラー形アームのモデル化を行う。まず、手先効果器を含むアームの運動方程式を導く。本研究では、手先効果器を作業面に対して与えられた力で押し付けながら、面に沿って

* 原稿受付 平成5年6月18日。

^{*1} 正員、電気通信大学 (〒182 調布市調布ヶ丘1-5-1)。^{*2} 豊田工機(株) (〒448 刈谷市野田町北地蔵山1-7)。

移動させることを考える。そこで、次に手先効果器が作業面に拘束された場合の運動方程式をラグランジェの未定乗数を用いて誘導する。さらに、定常状態まわりで線形化を行う。第3章では、本研究で採用し関節速度制御を基礎とした力制御則について、その階層構造に注目して具体的に述べる。また、簡単な定数フィードバック制御を行い、力制御系の基本的な特性を明確にする。第4章では、第3章の結果を踏まえ、安定性および応答性向上を目的として、極零相殺形の動的補償器を導入する。得られた動的補償器を用いてシミュレーションを行い、固有値軌跡および周波数応答の観点から詳しく格闘する。第5章では、実際にロボットアームを用いた実験を行い、閉ループ周波数特性および過渡特性が飛躍的に改善されることを示す。第6章では、通常問題となる制御対象の特性変動についても検討を加え、本制御系のロバスト性について考察する。

2. 制御対象のモデル化

2.1 駆動系に弾性を有するモデル 本研究で使ったアームのモデルを図1に示す。図に示すように、第2リンクの先に手先効果器が取り付けられたモデルとなっている。また、第2リンクと手先効果器の間に力覚センサがある。本ロボットアームの駆動系には弾性が存在するので、アームの関節角を θ_{a1} , θ_{a2} とし、モータの回転角を θ_{m1} , θ_{m2} とする。また、第2リンクに対する手先効果器の相対位置を $(\bar{x}_1, \bar{x}_2)$ とする。これらを用いて、一般化座標ベクトル Φ は、次のように定義される。

$$\Phi = [\theta_a^T, \theta_m^T, \bar{x}^T]^T \quad (1)$$

ここで、 θ_a , θ_m および $\bar{x}$ は、それぞれ関節角度ベクトル、モータ回転角ベクトル、力覚センサの変形量ベクトルである。また、図1中に示すモータの慣性モーメント J_{m1} , J_{m2} は、モータ電機子の慣性モーメントと減速機の高速軸側の慣性モーメントを合せたものであ

図1 手先効果器を有する2リンクモデル

る。

ラグランジュの運動方程式を解くことにより、アームの運動方程式は次のように与えられる。

$$A(\Phi) \ddot{\Phi} + b(\Phi, \dot{\Phi}) = \begin{bmatrix} M_a \\ M_m \\ F_e \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 $A(\Phi)$ は 6×6 の慣性行列、 $b(\Phi, \dot{\Phi})$ は遠心力項を表している。また、 M_a , M_m および F_e は、それぞれ一般化座標 θ_a , θ_m および $\bar{x}$ に対応する一般化力ベクトルである。ここで、手先効果器に作用する力ベクトル F_e は、具体的に次式で与えられる。

$$F_e = -H_e \bar{x} \quad (3)$$

H_e : 力覚センサのばね定数行列

また、 M_a および M_m の各要素は、具体的には次のようなものである。

M_{aj} : 第 j 関節を駆動する減速機の出力トルク。すなわち、第 j 関節駆動トルク。

M_{mj} : 電機子に流れる電流により電磁気学的に発生するトルク T_{mj} と減速機入力軸からの反作用トルクの和。すなわち、第 j モータに作用するトルクの和。

本実験では、ロボットアームの減速機としてハーモニックドライブギアを使用しているので、Goodら⁽⁹⁾が提案したモデルを用いて、第 j 関節駆動系のモデルを与える。ただし、第 j 関節のねじれ角を ϵ_j とし、 θ_{aj} と θ_{mj} との関係が次のように表されるものとする。

$$\theta_{aj} = n_j \theta_{mj} + \epsilon_j \quad (4)$$

n_j : 第 j 関節駆動系の減速比

このとき、Goodらのモデルから、 M_a および M_m の各要素は、次のように与えられる⁽⁹⁾⁻⁽¹¹⁾。

$$\left. \begin{aligned} M_{aj} &= -c_{aj} \dot{\theta}_{aj} - c_{bj} (\dot{\theta}_{aj} - n_j \dot{\theta}_{mj}) \\ &\quad - k_j (\theta_{aj} - n_j \theta_{mj}) - P_{aj} \text{sign}(\dot{\theta}_{aj}) \\ M_{mj} &= -c_{mj} \dot{\theta}_{mj} + n_j c_{bj} (\dot{\theta}_{aj} - n_j \dot{\theta}_{mj}) \\ &\quad + n_j k_j (\theta_{aj} - n_j \theta_{mj}) - P_{mj} \text{sign}(\dot{\theta}_{mj}) + T_{mj} \end{aligned} \right\} \quad (j=1, 2) \quad (5)$$

c_{aj} , c_{bj} , c_{mj} : 粘性摩擦係数 $\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s} / \text{rad}$

$k_j(\cdot)$: 非線形ばね係数関数 $\text{N} \cdot \text{m}$

P_{aj} , P_{mj} : クーロン摩擦係数 $\text{N} \cdot \text{m}$

また、トルク T_{mj} は次式で与えられる。ただし、直流サーボモータを電圧制御することを考える。

$$\left. \begin{aligned} T_{mj} &= C_{Tj} i_j \\ v_j &= R_j i_j + c_{vj} \dot{\theta}_{mj} \quad (j=1, 2) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

C_{Tj} : トルク定数 $\text{N} \cdot \text{m} / \text{A}$

i_j : 電機子電流 A

v_j : 入力電圧 V

R_j : 巻線抵抗 Ω

c_{vj} : 逆起電力定数 $V \cdot s / \text{rad}$

2.2 拘束条件下での運動方程式およびその線形化

本節では、手先効果器が作業面に拘束されている状態の運動方程式を求める。作業面への拘束条件を $q(\Phi) = 0$ で表すことにする。この拘束条件式を満たす運動方程式は、ラグランジェの未定乗数 Γ を用いて、次のように与えられる⁽¹²⁾。

$$A(\Phi) \ddot{\Phi} + d(\Phi, \dot{\Phi}) = S(\Phi) \Gamma + Dv \quad \cdots (7)$$

$$S(\Phi) = \left[\frac{\partial q}{\partial \Phi} \right]^T \quad \cdots (8)$$

ここで、

$$d(\Phi, \dot{\Phi}) = b(\Phi, \dot{\Phi}) + C\dot{\Phi} + e(\Phi) + p$$

$$D = [0_{2 \times 2}, \text{diag}\{c_{T1}/R_1, c_{T2}/R_2\}, 0_{2 \times 2}]^T$$

$$v = [v_1, v_2]^T$$

ただし、 C , $e(\Phi)$, p は、それぞれ粘性行列、非線形ばね項および固体摩擦項を表している。 $A(\Phi)$ および $b(\Phi, \dot{\Phi})$ を含め各係数行列の詳細については、文献(16)を参照されたい。また、このとき、拘束条件を満たす拘束力 Γ は次のように与えられる⁽¹³⁾⁽¹⁴⁾。

$$\Gamma = -(S^T A^{-1} S)^{-1} \{ S^T A^{-1} (-d(\Phi, \dot{\Phi}) + Dv) + \dot{S}\dot{\Phi} \} \quad \cdots (9)$$

次に、定常状態 ($\Phi = \Phi_s$, $\dot{\Phi} = 0$, $v = v_s$, $\Gamma = \Gamma_s$) のまわりで線形化を行う。ただし、遠心力項 $b(\Phi, \dot{\Phi})$ は 2 次の微小項なので無視し、クーロン摩擦も無視して、さらに非線形ばねを線形ばね (ばね定数を $\bar{k}_1$, $\bar{k}_2$ とする) で近似する。このとき、式(7)および式(9)は次のようになる

$$A_s \Delta \ddot{\Phi} + C \Delta \dot{\Phi} + (E - W) \Delta \Phi = D \Delta v + S_s \Delta \Gamma \quad \cdots (10)$$

$$\Delta \Gamma = (S_s^T A_s^{-1} S_s)^{-1} S_s^T A_s^{-1} \{ C \Delta \dot{\Phi} + (E - W) \Delta \Phi - D \Delta v \} \quad \cdots (11)$$

ただし、 $A_s = A(\Phi_s)$, $S_s = S(\Phi_s)$ であり、 E および W は次のような行列である。

$$E = \begin{bmatrix} E_{11} & E_{12} & E_{13} \\ E_{21} & E_{22} & E_{23} \\ E_{31} & E_{32} & E_{33} \end{bmatrix}$$

$$\left. \begin{aligned} E_{11} &= \text{diag}\{\bar{k}_1, \bar{k}_2\} \\ E_{12} &= E_{21} = \text{diag}\{-n_1 \bar{k}_1, -n_2 \bar{k}_2\} \\ E_{22} &= \text{diag}\{n_1^2 \bar{k}_1, n_2^2 \bar{k}_2\} \\ E_{13} &= E_{23} = E_{31} = E_{32} = 0_{2 \times 2}, E_{33} = He \end{aligned} \right\}$$

$$W = \left\{ \left[\frac{\partial}{\partial \Phi_1} \left[\frac{\partial q}{\partial \Phi} \right] \right]_{\Phi=\Phi_s}^T \Gamma_s, \dots, \left[\frac{\partial}{\partial \Phi_6} \left[\frac{\partial q}{\partial \Phi} \right] \right]_{\Phi=\Phi_s}^T \Gamma_s \right\}$$

式(11)を式(10)に代入することにより、最終的な線形

モデルが得られる。

3. 関節速度制御を基礎とした力制御

3.1 階層制御構造 力制御の方法には、以下に示す三つのタイプがある。(1)各関節を直接力制御するタイプ。(2)各関節を速度制御するタイプ。(3)各関節を位置制御するタイプ。この中で、最も基礎的かつ重要だと考えられるのは、(2)の関節速度制御を基礎とした力制御である。

本研究では、(2)の力制御方式を採用した。各関節ごとに局所速度フィードバック制御を行い、次に手首力覚センサからの力信号を用いて、局所フィードバック制御器への目標値を補正する⁽⁸⁾。この方法を用いることで、各関節における固体摩擦や駆動系のトルク変動にある程度対処できる。

下位レベル: 図2(a)に示すように、各関節速度は通常産業用ロボットで行われているように、セミクロードループ制御によって制御される。すなわち、厳密には関節速度が制御されるのではなく、モータの速度が制御される。ここで、DC サーボモータの速度制御は、次式に示す PI 制御を行う。

$$\left. \begin{aligned} v_j &= K_{pj}(\omega_{refj} - \dot{\theta}_{mj}) + K_{jzj} \dot{z}_j \\ \dot{z}_j &= \omega_{refj} - \dot{\theta}_{mj} \quad (j=1, 2) \end{aligned} \right\} \quad \cdots (12)$$

上位レベル: 図2(b)に示すように、上位レベルでは各関節への目標角速度 ω_{refj} を次式のように与える。

$$\omega_{refj} = \bar{\omega}_{refj} + \Delta \omega_{refj} \quad (j=1, 2) \quad \cdots (13)$$

ここで、 $\bar{\omega}_{refj}$ は手先効果器を作業面に沿わせながら、与えられた速度で移動させるために必要なモータ回転速度であり⁽¹⁵⁾、また $\Delta \omega_{refj}$ は、力偏差 ($f_{ref} - f$) および作業面に沿った方向の位置偏差 ($p_{ref} - p$) から決定されるモータ速度目標値の補正量である。

3.2 定数フィードバック制御 力制御系の基本特性を調べるために、上位レベルの制御として定数フィードバック制御を採用した場合について最初に少し検討しておく。式(13)に示す速度目標値の補正量 $\Delta \omega_{refj}$ は、定数フィードバック制御の場合は次のよう

(a) 下位レベル制御

(b) 上位レベル制御(定数フィードバック制御の場合)

図2 階層制御構造

表 1 各係数値

	Link-1	Link-2	Effector	Unit
a	0.1422	0.1405	—	m
b_1	0.31	—	—	m
r	0.31	0.19	0.130767	m
m_a	4.96	5.08	0.15	kg
J_a	0.1072416	0.0367925	0.0	kg m ²
m_{m2}	—	0.25	—	kg
J_m	8.9475×10^{-5}	4.298×10^{-5}	—	kg m ²
$\bar{k}$	5199.06	1229.06	—	N m/rad
c_v	0.194	0.17536	—	V s/rad
c_T	0.18718	0.175364	—	N m/A
R	18.1	12.1	—	Ω
n	0.01	0.01	—	—
P_a	0.0	0.0	—	N m
P_m	0.0680	0.0147	—	N m
c_a	1.89	1.0	—	N m s/rad
c_b	0.3	0.1	—	N m s/rad
c_m	0.00068	0.00017	—	N m s/rad
α	—	—	36.587	deg

に与えられる(図 2 参照)。

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega_{ref1} \\ \Delta\omega_{ref2} \end{bmatrix} = (NJ)^{-1} \begin{bmatrix} k_f(f_{ref} - f) \\ k_p(p_{ref} - p) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (14)$$

ただし,

- k_f : 力ゲイン
- k_p : 位置ゲイン
- f_{ref} : 力目標値
- p_{ref} : 位置目標値
- N : 減速比行列
- J : ヤコビ行列

アームの外形を $\theta_{a1}=30^\circ$, $\theta_{a2}=80^\circ$ (図 1 参照)に選
び, 本研究で使したロボットアームの各係数値(表 1
参照)を用いて, 数学モデルによる解析を行った。図
3(a)に力ゲイン k_f に関する固有値軌跡を示す。図か
らわかるように, 制御系の応答に大きく影響する虚軸
近くの固有値が 3 組現われる。このうち固有値 P は,
力ゲインを変化させてもほとんど動かない固有値であ
り, これは, 手先効果器の作業面に沿った振動に対応
しているものと思われる。また, 力ゲインを上げてい
くと, 真っ直ぐに不安定側へと移動している固有値 Q
と, わずかではあるが安定側へと移動している固有値
 R がある。このことから, 固有値 Q が力制御系の安定
性を支配していることがわかる⁽¹⁶⁾。

また, 図 3(b)は, 図 2(b)の破線で囲まれた部分の
開ループ周波数応答, すなわち力制御ループをカット
したときの一巡伝達関数の周波数応答を示している。
図からわかるように, 位相が 180° 遅れる周波数におい
てゲイン特性にピークを持っており, このピークを持
っており, このピークは先ほどの固有値 Q に対応し
ている。このピークの高さは約 42 [dB] であり, 位相

(a) 固有値軌跡

(b) 開ループ周波数応答(マニピュレータシステム)

図 3 固有値軌跡および開ループ周波数応答
(定数フィードバック制御時)

図 4 動的補償器を用いた力制御系

遅れは約 180° となっている。そこで, k_f を -42 [dB]
としたとき安定限界となる。

4. 極零相殺形動的補償器の導入

本章では, 力制御系の特性改善のために動的補償器
の導入を行う。図 4 に示すように力フィードバックル
ープの中に動的補償器が付加される。

本研究では, 2 次の動的補償器を用いることにし,
その伝達関数を次のように表すことにする。

$$H(s) = \frac{1 + as + bs^2}{(1 + T_1s)(1 + T_2s)} \dots\dots\dots (15)$$

また, 動的補償器を用いたときの速度目標値の補正量
 $\Delta\omega_{refj}$ は, 次のように与えられる。

$$\begin{bmatrix} \Delta\omega_{ref1} \\ \Delta\omega_{ref2} \end{bmatrix} = (NJ)^{-1} \begin{bmatrix} y(s) \\ k_p(p_{ref} - p) \end{bmatrix} \dots\dots\dots (16)$$

$$y(s) = H(s) k_f (f_{ref} - f) \dots\dots\dots (17)$$

ここで, y は動的補償された力信号である。

本論文では, 固有値 Q を安定化させるために, 固有値 Q の出発点 ($\sigma_Q \pm \omega_Q j = -9.89 \pm 126.0j$) を補償器の零点で相殺する極零相殺形補償器を導入する。すなわち, 式(15)の分子多項式の係数 a および b は, 固有値 Q と極零相殺が生じるよう決定した。分母多項式の係数 T_1 および T_2 は, 図5(a)に示すように動的補償器のゲイン特性が, 零点に起因するディップを除いてほぼフラットになるように決定した。すなわち, $T_1 = T_2 = 1/\omega_Q$ と選んだ。

まず, 極零相殺形補償器を導入した場合の固有値軌跡を図5(b)に示す。図からわかるように, 不安定側へと移動していた固有値 Q が, ほとんど移動しなくなっている。次に, 図4の a, b でカットした場合の開ループ周波数応答は図5(c)のようになる。図3(b)と

(a) 動的補償器

(b) 固有値軌跡

(c) 開ループ周波数応答(動的補償器+マニピュレータ)

図5 固有値軌跡および周波数応答
(極零相殺形補償器導入時)

図5(c)の周波数応答を比較するとわかるように, 図5(c)では, 位相が 180° 遅れる周波数におけるゲイン曲線のピークがなくなっており, 安定限界ゲインがおよそ -22 [dB] まで上がっている。すなわち, より高ゲインのフィードバックが可能となる。以上の解析結果から, 極零相殺形補償器が力制御系の安定性向上に効果があると言える。そこで, 本研究では, この極零相殺形の動的補償器をロボットアームを用いた実際の制御実験に適用する。

5. 動的補償器を用いた制御実験

図6に示す2リンクアームを用いて, 動的補償器の効果について実験的に検討を行う。実験では, 二つのCPUを用いた並列処理を行う。具体的には, PC-9801DA (80386+80387) で下位レベルの制御および入出力操作を行い, トランスピュータ (T800) で上位レベルの補償器演算を行う。ただし, これら二つのCPU間のデータ交信は, 4KByteのデュアルポートメモリを用いて行われる。また, サンプルングタイムは 0.5 [msec] である。実験では, 4章で得られた極零相殺形の動的補償器を双一次変換で離散化して用いる。また, 比較のために定数フィードバック制御実験も行った。

まず, 時間応答の観点から検討する。図7にステップ応答を示す。図7(a)および図7(b)は, 定数フィードバックにおける時間応答である。ただし, 図(a)は, カゲインが 3.77×10^{-3} の場合(安定限界ゲインにほぼ対応する)であり, 図(b)はそのおよそ半分の 1.88×10^{-3} の場合である。さらに, 図7(c)は, 極零相殺形補償器導入後の力応答である。ただし, カゲインは 1.51×10^{-2} を用いている。図(a)からわかるように, 動的補償器を用いない場合には, カゲインを 3.77×10^{-3} とすると, 振動的な応答となってしまいほとんど実用には耐えられない。また, 図(b)の場合, 安定であるも

図6 2リンクアーム

の立ち上がりが遅くなっている。一方、極零相殺形補償器を導入することにより、図(c)に示すように、力ゲインが高いにもかかわらず、非常に安定であり、また

(a) 定数フィードバック ($k_f = 3.77 \times 10^{-3}$)

(b) 定数フィードバック ($k_f = 1.88 \times 10^{-3}$)

(c) 動的補償器 ($k_f = 1.51 \times 10^{-2}$)

図7 ステップ応答(制御実験)

(a) 定数フィードバック ($k_f = 1.88 \times 10^{-3}$)

(b) 動的補償器 ($k_f = 1.51 \times 10^{-2}$)

図8 閉ループ周波数応答(制御実験)

立ち上がり時間も非常に短くなっている。

次に、力目標値 f_{ref} を入力とし、力応答 f を出力とする閉ループ周波数応答の観点から検討を行う。図8(a)は $k_f = 1.88 \times 10^{-3}$ 時の定数フィードバックの場合の閉ループ周波数応答を示し、図8(b)は $k_f = 1.51 \times 10^{-2}$ 時の極零相殺形補償器を導入した場合の閉ループ周波数応答である。図(a)からわかるように、定数フィードバックの場合、高周波域におけるゲイン曲線にピークを持っている。また、力ゲインが十分上げられないので、低周波域においてもゲイン特性が0 [dB] よりずっと下にあり、目標値への追従性が悪くなっている。また、図(b)からわかるように、極零相殺形補償器を導入することにより、ゲイン曲線のピークがなくなっており、さらにゲイン特性が高周波域までフラットに伸びている。以上の実験結果より、極零相

(a) $Z_N = 2\sigma_N \pm \omega_N j$

(b) $Z_N = \pm \omega_N j$

(c) $Z_N = \sigma_N \pm 1.2\omega_N j$

(d) $Z_N = \sigma_N \pm 0.8\omega_N j$

図9 モデル化誤差の影響(周波数応答)

図 10 モデル化誤差の影響(ステップ応答)

殺形補償器は、力制御系の安定性および応答性向上に非常に効果があると言える。

6. モデル化誤差の影響

動的補償器の係数設定が、モデル化誤差などにより本来設定されるポイントからずれて設定された場合の係数感度について検討を行う。特に、極零相殺を行っている動的補償器の零点 ($Z_N = \sigma_N \pm \omega_N j$) が制御に大きな影響を与えるので、零点に注目して検討する。

まず、零点の実部の値がずれた場合を検討する。図9(a)および(b)に実部が2倍 ($2\sigma_N$) および0倍 ($0\sigma_N$) にずれたときの周波数応答を示す。これからわかるように実部の誤差では、それほど影響がなく図8(b)と似た応答になっている。次に、虚部の値を $\pm 20\%$ ずらしたときの時間応答を図9(c)および(d)に示す。図からわかるように、ゲイン特性にピークを持っている。図10は対応するステップ応答を示している。若干振動的にはなっているが、十分よい応答となっている。また、図10(b)は図7(c)とほぼ同じ応答を示している。以上のずれが起こる原因としては種々のものが考えられる。ここでは、一つの例としてアームの姿勢変化を取り上げておく。たとえば、アーム先端が作業面に沿って中心位置から $+20\text{ cm}$ だけ移動したとき、問題となる固有値の虚部は $+19\%$ 、実部は -27% ずれる。すなわち、この程度の姿勢変化に対しては、制御性能がそれほど悪化しないことがわかる。

7. 結 論

駆動系に弾性を有するロボットアームの力制御系に動的補償器を導入し、以下の結果を得た。

(1) 作業面に拘束されたマニピュレータシステムの数学モデルを拘束力の概念を用いて導き、周波数応答、極などの観点から制御系設計について検討した。

(2) システムの応答に大きな影響を及ぼす虚軸に近い3組の固有値の特性について検討し、そのうちの1組の固有値をキャンセルする極零相殺形の補償器の導入が大きな効果を持つことを実験および理論の両面から示した。

(3) また、補償器の係数が本来設定されるポイントからずれて設定された場合の係数感度について、補償器の零点に注目して検討した。補償器の零点の虚部と実部をそれぞれ $\pm 20\%$ および2倍、0倍に変化させて実験を行った。その結果、ずれがない場合と比べて応答に若干の劣化は見られるものの、定数フィードバック時と比べて立ち上がりのよい応答となっている。

文 献

- (1) 例えば、日本ロボット学会誌, 9-6(1991), 745.
- (2) Raibert, M. H. and Craig, J. J., *Trans. ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 102-2(1981), 126.
- (3) An, C. H. and Hollerbach, J. M., *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, (1987), 890.
- (4) Eppinger, S. D. and Seering, W. P., *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, (1989), 392.
- (5) Chiou, B. C. and Shahinpoor, M., *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, (1989), 398.
- (6) Elosegui, P., Daniel, R. W. and Sharkey, P. M., *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, (1990), 246.
- (7) Kuno, T., ほか3名, *Robotics Research* 4, (1988), 207, The MIT Press.
- (8) 西本, 日本ロボット学会誌, 6-4(1988), 339.
- (9) Good, M. C., ほか2名, *Trans. ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 107-1(1985), 53.
- (10) 古荘・長尾・成瀬, 機論, 56-526, C(1990), 1462.
- (11) 古荘・長尾・佐野・成瀬, 機論, 56-528, C(1990), 2115.

- (12) 後藤・山本・神吉, 力学演習, (1971), 275, 共立出版.
 - (13) Hemami, H. and Wyman, B. F., *IEEE*, AC-24-4(1979), 526.
 - (14) 有本・宮崎, 日本ロボット学会誌, 1-3(1983), 167.
 - (15) Whitney, D. E., *Trans. ASME J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 94-3(1972), 303.
 - (16) 古荘・大脇・佐野, 機論, 58-550, C(1992), 1860.
-