

## 周波数特性に基づく力制御系の一設計法\*

和田 洋<sup>\*1</sup>, 小菅 一弘<sup>\*2</sup>  
福田 敏男<sup>\*2</sup>, 渡辺 桂吾<sup>\*3</sup>

## Design of a Force Controller Based on Frequency Characteristics

Hiroshi WADA, Kazuhiro KOSUGE,  
Toshio FUKUDA and Keigo WATANABE

This paper proposes a method to design a force controller based on frequency characteristics. Generally, force control algorithms are classified into two types, the explicit force control algorithms such as Hybrid position/force control and the implicit force control algorithms such as impedance control. The explicit force control algorithms control the contact force directly, implicit force control algorithms control the manipulator motion-force relation. Recently, the equivalence of these two types of algorithms has been shown by A. A. Goldenberg (1992), and R. Volpe and P. Khosla (1993). In this paper, we propose a method to design an explicit force controller based on the equivalence to the impedance controller, so that the resultant control system has the desired frequency characteristics. The method is applied to a manipulator with one degree of freedom and experimental results illustrate the effectiveness of the proposed method.

**Key Words:** Robotics, Manipulator, Impedance Control, Hybrid Position/Force Control, Frequency Characteristics

## 1. 緒 言

バリ取り作業、グラインダ作業、組立作業というようなマニピュレータのエンドエフェクタと環境との間に干渉が生じる作業を行う場合には、ロボットの力制御法が必要となる<sup>(1)(2)</sup>。

力制御の代表的なものには、マニピュレータと環境との間に生じる力が目標値と等しくなるように力を直接制御する、位置と力のハイブリッド制御法<sup>(3)~(5)</sup>（以下では、ハイブリッド制御法と記す）や、マニピュレータに加わる力とマニピュレータの運動との関係を動的に制御することで、間接的に、マニピュレータと環境との間に生じる干渉力を制御する、ステイフネス制御<sup>(6)</sup>、ダンピング制御<sup>(7)</sup>、インピーダンス制御法<sup>(8)(9)</sup>などの方法がある。従来、これら的方法は、互いにまったく違った制御法として、研究されてきたが、最近、Explicitな力制御法は、本質的には、インピーダンス制御と等価な制御法であることが指摘された<sup>(10)(11)</sup>。こ

のことは、おのおのの制御法をまったく独立したものとしてとらえるのではなく、互いの制御法の短所を補うように、利点をうまく融合することにより、各制御法の性能を向上する可能性をもつていていることを意味している。そこで、本研究では、この Explicitな力制御法とインピーダンス制御との等価性に着目し、力制御系を設計する方法について考える。

以下、本稿では、ハイブリッド制御法とインピーダンス制御法との等価性について議論し、次に、この等価性に基づき、制御系が望ましい周波数特性をもつよう用力制御ゲインを設計する問題について考える。例として、グラインダ作業などのように、エンドエフェクタと環境との間に外乱が生じる場合を取り上げて、提案する方法で外乱が抑制できることを示す。最後に、1自由度マニピュレータを用いたシミュレーション結果および実験結果により、提案する設計法の有効性を示す。

2. ハイブリッド制御法と  
インピーダンス制御法の等価性

本章では、線形システムに対するハイブリッド制御法とインピーダンス制御法の等価性<sup>(10)</sup>をもとにして、非線形ダイナミクスをもったロボットマニピュレータ

\* 原稿受付 平成5年5月20日。

\*<sup>1</sup> 正員、(株)豊田自動織機製作所メカトロ開発部(474 大府市共和町茶屋8)。

\*<sup>2</sup> 正員、名古屋大学工学部(464-01 名古屋市千種区不老町1)。

\*<sup>3</sup> 正員、佐賀大学理工学部(840 佐賀市本庄町1)。



タに基づいて、ハイブリッド制御における力制御ゲインを設計する方法を提案する。このような設計法を用いることにより、従来は試行錯誤的に求められていた力制御のゲインが、周波数特性に基づいて、一意に設計することができる。式(13), (14)より、力制御ゲイン、およびダンピングゲインと、インピーダンスパラメータには次式に示すような関係が成立する。

この式に基づいて、力制御ゲイン、およびダンピングゲインを設計する。

### 3. 力制御ゲインの設計法

本章では、力制御ゲインの設計法の例として、グラインダ作業などのように、エンドエフェクタと環境との間に外乱が生じる場合について、力制御ゲインを設計する問題を考える。ここでは、説明を簡単にするために、図2に示すような1リンク型マニピュレータ系を考える。このシステムのダイナミクスは次式のように示すことができる。

ここで、 $\tau$  は間接を駆動する入力トルク、 $M$  はマニピュレータの慣性項、 $D$  は粘性項、 $f_e$  は環境から受ける力、 $f_{dist}$  はマニピュレータの先端に作用する外乱を示す。一方、式(9)で示すように、環境のダイナミクスをばね-ダンパ系として、制御入力  $f_u$  を、式(20)のように定めると、2 章と同様にして、式(21)が導出される。

$$f_u = f_d + K_f(f_d - f_e) - K_v \dot{x} \quad \dots \dots \dots \quad (20)$$

$$M_d \ddot{\theta} + D_d \dot{\theta} + K_d \theta = f_d - \frac{1}{1+K_f} f_{dist} \dots\dots\dots(21)$$

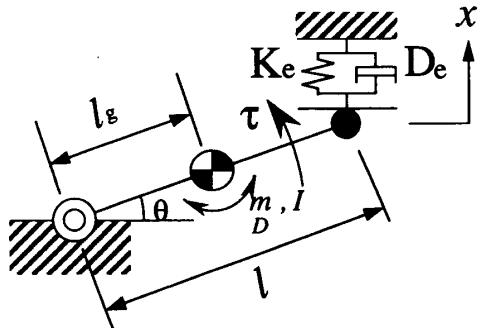
ここで、

$$D_d = \frac{1}{1+K_f} \left[ \frac{D}{l} + K_v l + (1+K_f) D_e l \right] \dots\dots (23)$$

である。ただし、力制御を行っている場合、マニピュレータが環境と接触しているときには、 $\theta$ はほぼ一定であると考えられ、ここでは、 $\theta \approx 0$ と仮定する。式(21)より、外乱  $f_{dist}$  から出力  $f$  までの伝達関数  $G_{dist}$  は、式(21)より、次式のようになる。

$$G_{dist}(s) = -\frac{K_e + D_e s}{1 + K_f} \cdot \frac{l}{M_d s^2 + D_d s + K_d} \quad \dots (25)$$

ここで、システムにある周波数  $\omega_{dist}$  の外乱  $f_{dist}$  が加わる場合において、ゲイン  $K_f$ ,  $K_v$  を設計する問題



## 図 2 力学モデル

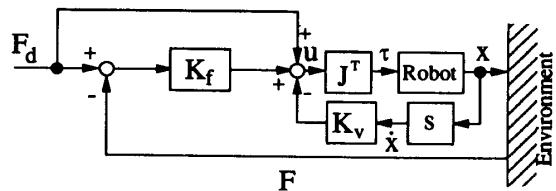


図 3 力制御系

について考える。まず、制御系が  $f_{dist}$  を十分に抑制できるような等価なインピーダンス制御系にパラメータ  $M_d$ ,  $D_d$ ,  $K_d$  を設計する。したがって、式(22), (23)より、力制御ゲイン  $K_f$ , ダンピングゲイン  $K_v$  は次式のように示すことができる。

$$K_v = \frac{1}{l^2} \left[ \frac{M}{M_d} (D_d - D_e l) - D \right] \dots \dots \dots \quad (27)$$

図3にこの制御系のブロック線図を示す。

#### 4. シミュレーション

本研究で提案するゲイン設計法の有効性を示すために、グラインダ作業などのように、マニピュレータと環境(対象物)との間に、特定の周波数をもつような外乱が生じる場合を想定し、この外乱を抑制する問題に対して、シミュレーションを行った。図2はシミュレーションで用いた力学モデルである。またマニピュレータ、および対象物のパラメータは、5章に示すような実験に用いる値を用いた。これらのパラメータを表1に示した。最初に、開ループ系、すなわち、式(20)において、 $K_f=0$ 、 $K_v=0$ の場合の、外乱から出力までの周波数特性を図4に示す。この図に示されるように、4.79(Hz)に、共振周波数が存在することがわかる。次に、エンドエフェクタと環境との間に生じる外乱の周波数が、ちょうど、共振周波数と一致する場合のような最悪ケースの場合のシミュレーションを行った。エンドエフェクタと環境との間に加わった外乱を図5に

表 1 マニピュレータ、対象物の各パラメータ

$l$	0.34 (m)
$l_g$	0.22 (m)
$m$	19.19 (kg)
$I$	0.349 ( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ )
$D$	0.376 ( $\text{N} \cdot \text{s/m}$ )
$K_e$	10004.7 ( $\text{N/m}$ )
$D_e$	50.0 ( $\text{N} \cdot \text{s/m}$ )

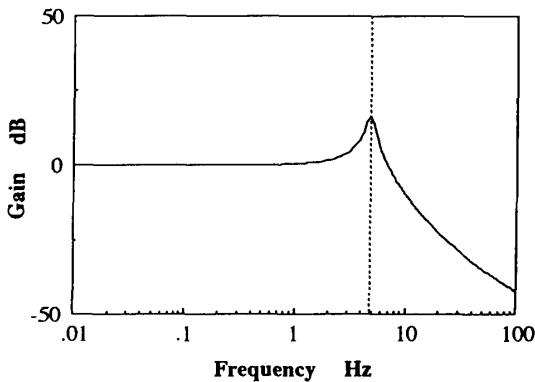
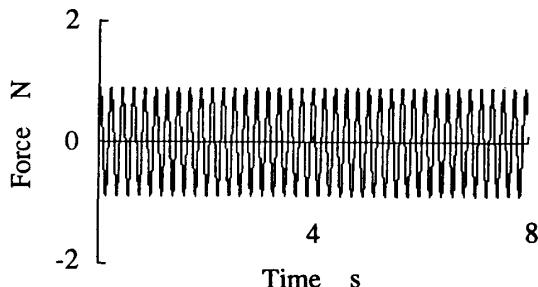
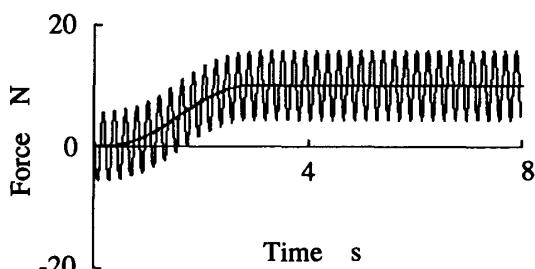
図 4 伝達関数のボード線図( $K_f=0, K_v=0$ )

図 5 エンドエフェクタと環境との間に生じる外乱

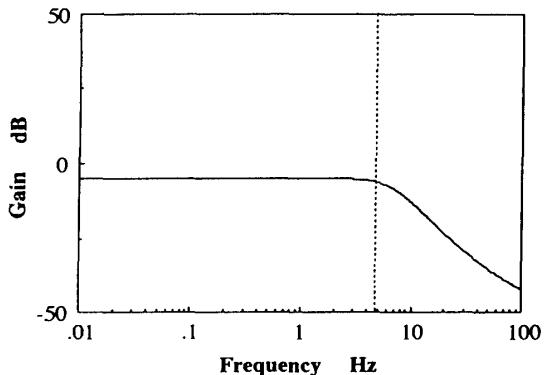
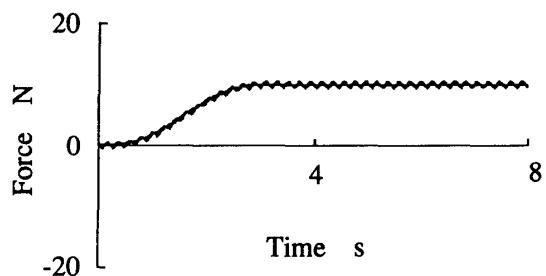
図 6 シミュレーション結果( $K_f=0, K_v=0$ )

示し、シミュレーション結果を図 6 に示す。

そこで、この最悪ケースの場合の外乱を抑制するために、3章で提案したゲイン設計法を用いることにする。ここでは、設計指針をシステムに加わる外乱に対して、-5(dB)以下にするような力制御ゲインを設計することとして、シミュレーションを行った。詳細な設計法については、付録に記す。表 2 に、この場合の力

表 2 各ゲインおよびインピーダンスパラメータの値

$K_f$	0.78
$K_v$	534.25
$M_d$	2.11
$D_d$	119.77
$K_d$	3401.59

図 7 伝達関数のボード線図( $K_f=0.78, K_v=534.25$ )図 8 シミュレーション結果( $K_f=0.78, K_v=534.25$ )

制御ゲインおよびインピーダンスパラメータを示す。これらのパラメータから、外乱から出力までの伝達関数は図 7 のようになり、図 8 にシミュレーション結果を示す。このように、インピーダンスパラメータを用いた周波数特性に基づく設計法を用いることで、外乱抑制に対して、有効な力制御ゲインの設計法が可能となることが示された。

## 5. 実験

**5.1 実験装置および実験方法** 4 章で示したシミュレーション結果を実証するために実験を行った。本研究で用いた実験装置を、図 9 に示す。この装置は、図 2 に示すような 1 リンク型ニピュレータで、マニピュレータの各パラメータ（マニピュレータの長さ、質量、リンクから重心までの距離、重心回りの慣性モーメント）および環境のパラメータの値は、前述したよ

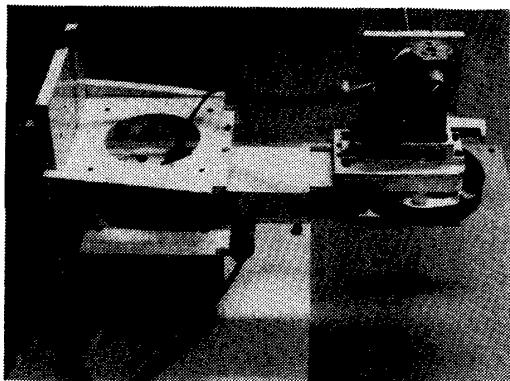


図 9 実験装置

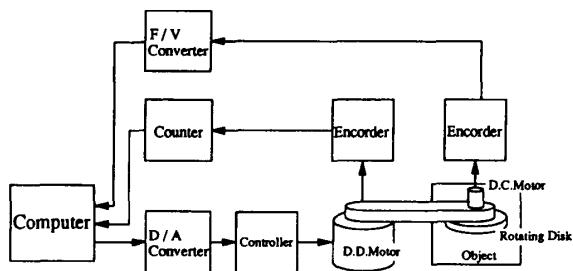
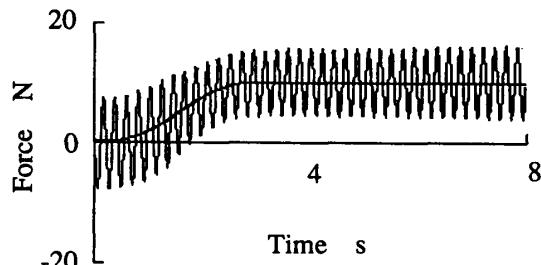
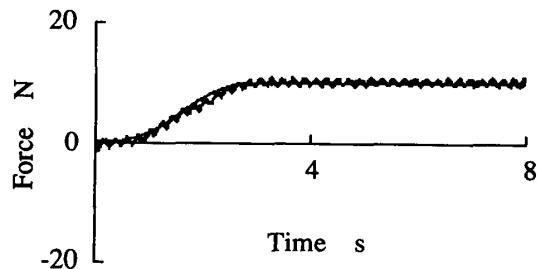


図 10 システム構成図

図 11 フィードフォワード入力のみの場合の実験結果  
( $K_f=0, K_v=0$ )

うに、表 1 に示すようなシミュレーションで用いたものと同じ値である。アクチュエータには、ダイレクトドライブモータ(ヤマハ発動機製、ROBUST YRS-150)を用いた。また、外乱を発生させる装置として、マニピュレータ先端に回転軸に対して、質量が不釣合いな回転板を取付けて、この回転板を回すことにより、外乱を発生させた。この回転板を駆動するアクチュエータには、D.C. サーボモータを用いた。また、制御系はパーソナルコンピュータを用いて、構成した。制御系のサンプリングタイムは 4 (ms)とした。図 10 に実験装置のシステム構成図を示す。

**5・2 実験結果** 図 11 にフィードフォワード入力のみの場合の実験結果を示し、図 12 に、シミュレーションと同様に、外乱の影響を  $-5$  (dB)以下にするよう

図 12 提案する設計法を用いた場合の実験結果  
( $K_f=0.78, K_v=534.25$ )

な、力制御ゲイン、即ち、表 2 に示すような力制御ゲインを用いた場合の実験結果を示す。この結果に示されているように、シミュレーション結果と同様、フィードフォワード入力のみの場合は、外乱が抑制できていないが、インピーダンスパラメータを適切に設定し、力制御ゲインを設計した場合には、外乱が抑制されることが示された。

## 6. 結論

本研究では、ハイブリッド制御法とインピーダンス制御法の等価性を用いることで、外乱を抑制するような力制御ゲインの設計法を提案した。また、1 リンク型マニピュレータを用いて、シミュレーションおよび実験を行い、提案するゲイン設計法の有効性を示した。

提案する制御系は、回転ツールを用いたバリ取り、グラインダ作業などのようにマニピュレータ先端に加わる特定の周波数をもつ外乱を抑制するのに効果的であり、複雑な制御系を構成することなく、外乱の抑制が可能となる。

最後に、実験装置の製作にあたって、御協力を頂いた名古屋大学工学部技官 松浦英雄氏に感謝の意を表する。

## 付録

**力制御ゲイン  $K_f$  およびダンピングゲイン  $K_v$  の設計法** ここでは、ハイブリッド制御法とインピーダンス制御法の等価性に基づく力制御ゲインの設計法の例として、本文中にあるように、エンドエフェクタと環境との間に生じる外乱に対して、出力への影響を  $a$  (dB)以下にするような力制御ゲインの設計法について説明する。

外乱の影響を  $a$  (dB)以下にするために、式(25)から、次式のような関係式を導出する。

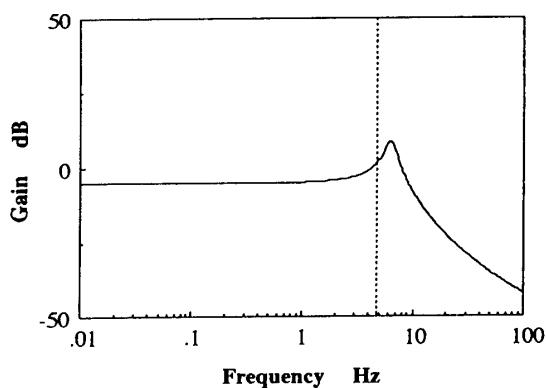


図 13 伝達関数のボード線図( $K_f = 0.78$ ,  $K_v = 0.0$ )

この式を変形すると、次式のようになる。

このようにして、 $K_f$  を設定する。

しかし、図13に示すように、システムに加わる外乱の周波数が、共振周波数付近であると、共振ピークが存在するために、 $K_f$ を設計しただけでは、外乱の影響を  $a$ (dB)以下にすることはできない。ただし、図13は、 $a = -5$ (dB),  $K_f = 0.78$ ,  $K_v = 0.0$ とした場合の周波数特性である。

したがって、システムに加わる外乱の周波数が、共振周波数付近であっても、外乱の影響を  $a$ (dB)以下にするためには、共振ピークをもたないような周波数特性にすればよい。そこで、式(25)を変形すると、次式のようになる。

$$G_{dist}(s) = K' \cdot (1 + Ts) \cdot \frac{w_n^2}{s^2 + 2\xi w_n s + w_n^2} \quad \dots (30)$$

ここで、

$$K' = \frac{1}{1+K_f}$$

$$T = \frac{D_e}{K_e}$$

$$w_n = \sqrt{\frac{K_d}{M_d}}$$

である。この式より、共振ピークをなくすためには、 $\xi$  を適切に設定すればよいことがわかる。また、 $M_d$  は、式(22)により得られるので、式(31)より、 $D_d$  が得られる。そこで、これらのインピーダンスパラメータを式(27)に代入することにより、適切なダンピングゲインを設計することができる。

文 献

- (1) Whitney, D. E., Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control, *Int. J. Robotics Research*, (1987), 3-14.
  - (2) 小菅, 力制御法の分類と制御システムの設計法, 日本ロボット学会誌, 19-6, (1991), 751-758.
  - (3) Raibert, M. H., and Craig, J. J., Hybrid Position and Force Control of Robot Manipulators, *Trans. ASME, J. Dynamics Systems, Measurement and Control*, Vol. 102, (1981), 126-133.
  - (4) Khatib, O., A Unified Approach for Motion and Force Control of Robotic Manipulators, *IEEE J. Robotics and Autom.* Vol. RA-3, No. 1, (1987), 43-53.
  - (5) 吉川, ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御-手先拘束の記述と間接駆動力の算出-, 日本ロボット学会誌, 3-6, (1985), 531-537.
  - (6) Salisbury, J. K., Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates, *Proc. of the 19th IEEE Conf. Decision and Control*, (1980), 95-100.
  - (7) Whitney, D. E., Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions, *Trans. ASME, J. Dynamics Systems, Measurement and Control*, (1977), 91-97.
  - (8) Hogan, N., Impedance Control Part I-Part III, *Trans. ASME J. Dynamics Systems, Measurement and Control*, 107(1985), 1-24.
  - (9) Hogan, N., Stable Execution of Contact Tasks Using Impedance Control, *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Autom.*, (1987), 1047-1054.
  - (10) Goldenberg, A. A., Analysis of Force Control Based on Linear Models, *Proc. of IEEE Int. Conf. Robotics and Autom.* (1992), 1348-1353.
  - (11) Volpe, R., and Khosla, P., A Theoretical and Experimental Investigation of Impact Control for Manipulators, *Int. J. Robotics Research*, (1993), 351-365.