

# サーボ系をベースとしたインピーダンス制御における 接触安定性の改善方法

榊 泰輔\*1 館 暁\*2

## A Stabilizing Method of Contact Tasks on Servo-based Impedance Control

Taisuke Sakaki\*1 and Susumu Tachi\*2

This paper proposes a new control algorithm of servo-based impedance control of robot manipulator for stabilization of contact task. There still has been stability problem of servo-based impedance control when a manipulator contacts to a stiff environment with a small viscosity coefficient of target impedance. The paper shows a stabilizing method for impedance control even with a small target viscosity. The proposed control system modifies the target dynamics model, but has no necessity to change the servo-control system. The simulations and contact task experiments show an extremely similar response to a target impedance and verify sophisticated contact stability with an one-tenth target viscosity and with over two times larger velocity more than the stability conditions limited for conventional control methods.

**Key Words:** Servo-Based Impedance Control, Contact Stability

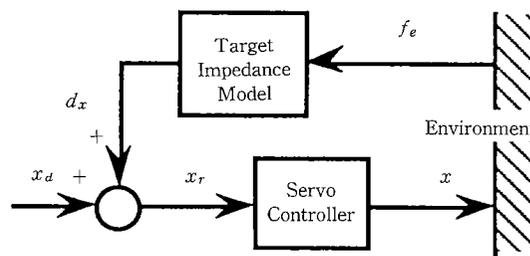
### 1. はじめに

本論文では、サーボ系として市販のサーボ・コントローラを用いたモーションベースのインピーダンス制御における接触安定性の改善方法について提案する[4].

インピーダンス制御は、ロボットアームが環境に対して柔軟な接触作業を行うための力制御法のひとつである[1][2]. Peg-in-holeなどの作業、バイラテラル制御、ダイレクト・ティーチ、複腕アームや多指ハンドの協調制御による接触作業においては、アーム手先の柔軟性が不可欠である。インピーダンス制御は、アームの動的な応答が慣性・粘性・弾性からなる機械的なインピーダンスになるように外力に対するアーム先端の運動を制御し、柔軟性を実現する。その手法のひとつであるモーションベースのインピーダンス制御の概念図をFig.1に示す。これは、アームの手先に備えた力センサによって外力を計測し、これと目標インピーダンスモデルとから目標軌道に対する偏差を計算し、目標軌道と偏差との和を運動指令としてサーボ系に与える制御系である。一方、モーションベースとは対照的に、力センサを用いなくて、アームの位置・速度・加速度と目標インピーダンスとからアームの手先に発生すべき力を算出し、これをトルク制御によって実現する、トルクベースのイン

ピーダンス制御がある[2]. 本論文ではトルクベースの方法については扱わないこととする。

市販のサーボ・コントローラを用いるモーションベースのインピーダンス制御は、高減速比の減速ギアを内蔵した産業用ロボットで容易に実現できる。例えば、杉本らは、目標インピーダンスと外力とから速度の指令値を計算して速度サーボ系に入力する方法を提案している[7]. 井上・館らはバイラテラル制御に応用した例で、目標インピーダンスと外力とから位置の指令値を計算し、位置サーボ系に入力する方法を示している[5]. これらの方法は、インピーダンス制御の組み込みが容易で製造と開発のコストが小さくてすむ。また、コントローラのサーボ系は改作せずにそのまま使用することができ、目標インピーダンスから指令値を発生する部分のみを追加するだけでイ



**Fig. 1** Motion-based Impedance Control Method.  
 $x_d$ : target trajectory.  $d_x$ : deviation by impedance model.  
 $x_r$ : reference trajectory.  $x$ : actual arm trajectory.  
 $f_e$ : external force.

原稿受付 1994年3月14日

\*1(株)安川電機 つくば研究所

\*2東京大学 先端科学技術研究センター

\*1Yaskawa Electric Co.

\*2University of Tokyo

ンピーダンス制御を構成することができる。一方、モーションベースのインピーダンス制御には、ロボットの動特性を補償することによる方法も種々提案されている。例えば、小菅らは仮想内部モデル追従制御系を用いた方法を[9]、梅野らは外乱オブザーバを用いた方法を提案している[10]。これらは、アームの加速度を直接制御しようとするもので精度の良い制御系を構成することができるが、多数のDSPを用いたり制御系の高度な設計を必要とするなどサーボ・コントローラのハード・ソフトをとともに改作する必要があるため、開発のコストがかかるという問題点がある。このため、現在のところ産業用としては、市販のコントローラを用いたインピーダンス制御の方が簡単でより実用性が高いといえる。

しかし、既存のコントローラを用いたインピーダンス制御では、目標粘性を小さくすると、剛性の高い対象物に接触したときに制御系の安定性が低下する[3]～[5]。このため、目標粘性を大きくして接触を安定にする方法をとることが多い[5]。このとき以下のような問題が生じる。

#### ○目標インピーダンスの設定上の問題：

接触を安定にするため、目標インピーダンスの設定の自由度が小さくなる。また、あまり粘性係数が大きいと1次応答に近くなりインピーダンス制御の意味がなくなる。

#### ○インピーダンス制御の応用上の問題：

バイラテラル制御や直接教示に適用した場合、操作が重くなりオペレータへの負担が大きい。

本論文では、サーボ系をベースとするインピーダンス制御において、

○目標インピーダンスに対応して分母のみで構成する従来の動特性モデルに分子項をくわえ、

○接触作業時の全体の制御系の応答性・安定性を考慮して動特性モデルの分子項を設計する。

という新しい制御アルゴリズムを提案する。これにより目標粘性を小さくしても、応答性と接触安定性の良い制御系を構成できることから、

○目標インピーダンスの設定の自由度が大きい、

○バイラテラル制御、直接教示での操作が軽い、

という特徴をもつ制御系を構成できる。本論文では1自由度の制御系において考察する。なお、アームが実現しようとする目標インピーダンスなどの動特性の目標モデルを、ここでは動特性モデルとよぶ。

## 2. サーボ系をベースとした新しいアルゴリズム

インピーダンス制御を適用したアームの接触が不安定になるのは、対象物の剛性が高いと、接触によって現れるフィードバック系のループゲインが等価的に高くなるためである[3][6]。一般に、サーボ系 $N$ をベースとして動特性モデル $G$ を仮想的に実現する制御系によって接触作業を実行したとき、対象物の剛性 $K_e$ をふくむ、フィードバック系と等価な系が現れる。これを接触系とよぶ[3]。接触系の構成をFig. 2にあらわす。この接触系の一巡伝達関数は $G_0=K_eGN$ である。対象物の剛性 $K_e$ が高いことは、このフィードバック系のループゲインが高いことと等価である。このとき、サーボ系 $N$ に位相

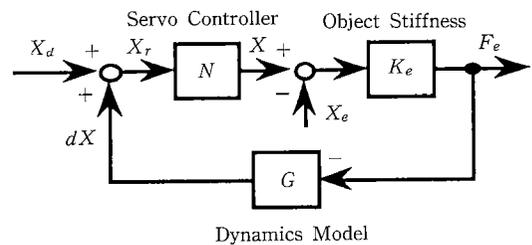


Fig. 2 Arm-Object Contact System.

$X_d$ : target position.  $dX$ : deviation by impedance model.  $X_r$ : reference position.  $X$ : actual position.  $X_e$ : object position.  $F_e$ : external force.  $N$ : servo controller transfer function.  $K_e$ : object stiffness.  $G$ : target dynamics model including target impedance model.

遅れがあると、このフィードバック系すなわち接触系が不安定になる[8]。

この問題を解決するため、サーボ系 $N$ の位相遅れを等価的にキャンセルしてほぼ $N=1$ とすることで接触系を安定化することを目的として、以下の方策を実行する。

- (1) 接触系の一巡伝達関数 $G_0$ から、動特性モデル $G$ に加える分子項の次数を決定する。
- (2) 周波数応答から応答性・安定性を考慮して分子項の時定数を決定する。

以下、これを詳しく説明する。

なお、以下の議論において次の3点を前提とする。

- (1) アームは剛体であると仮定し、減速ギアやリンクの剛性は無視する。
- (2) 定常的に対象物に接触している状態のみを考察し、接触・非接触の過渡的な状態は考えない。
- (3) 対象物の動特性は剛性のみとする。

### 2.1 動特性モデルの分子の次数の決定

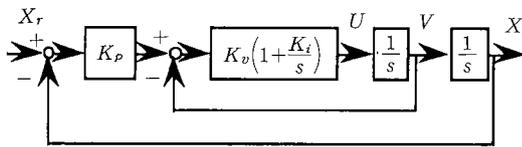
まず、動特性モデル $G$ を仮想的に実現する制御系についての一般的指針を説明する。動特性モデル $G$ の分子の次数を以下のように決定する。

- (1) 動特性モデルの伝達関数 $G=G_n/G_d$ とサーボ系の伝達関数 $N=N_n/N_d$ の分子・分母の各次数を求める。ここで各々の項の次数を $O(G_n)$ ,  $O(G_d)$ ,  $O(N_n)$ ,  $O(N_d)$ とする。
- (2) 動特性モデル $G$ とサーボ系 $N$ を直列に結合した、接触系の一巡伝達関数 $GN$ の分子と分母の次数差 $L$ を求める。

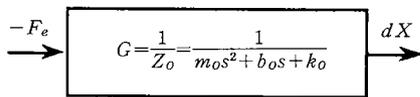
$$L = (\text{分母の次数}) - (\text{分子の次数}) \\ = (O(G_d) + O(N_d)) - (O(G_n) + O(N_n))$$

- (3) 動特性モデル $G$ に分子項を追加する。その次数は、 $G$ の分母の次数と $L$ との小さい方の値以下とする。

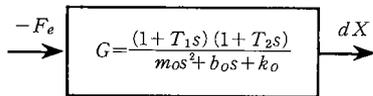
次に、典型的なサーボ系を例にとりて、目標インピーダンスを動特性モデルとした場合の分子の次数の決め方を説明する。高減速比の減速ギアを内蔵したアームにおける、速度のPI制御と位置のP制御からなるP-PIサーボ系をFig. 3に示す。目標インピーダンス(目標慣性 $m_0$ , 目標粘性 $b_0$ , 目標剛性 $k_0$ )を $Z_0=m_0s^2+b_0s+k_0$ とすると、動特性モデルは $G=1/Z_0$



**Fig. 3** P-PI type Position Servo Controller.  
 $K_p$ : proportional position feedback gain.  $K_v$ : proportional velocity feedback gain.  $K_i$ : integral velocity feedback gain.  $X_r$ : reference position.  $U$ : command torque.  $V$ : velocity.  $X$ : position.



(a) Conventional Dynamics Model.



(b) Proposed Dynamics Model.

**Fig. 4** Conventional and Proposed Dynamics Models.  
 $G$ : dynamics model.  $Z_o$ : ( $m_o, b_o, k_o$ ): target impedance.  
 $T_1, T_2$ : time constants of numerator of dynamics model.

である。このときサーボ系をベースとしたインピーダンス制御による接触系の一巡伝達関数  $GN$  は

$$GN = \frac{1}{m_o s^2 + b_o s + k_o} * \frac{K_p K_v (s + K_i)}{s^3 + K_v s^2 + K_v (K_p + K_i) s + K_p K_v K_i}$$

となる。この場合の次数差  $L$  は、

$$L = (2+3) - (0+1) = 4$$

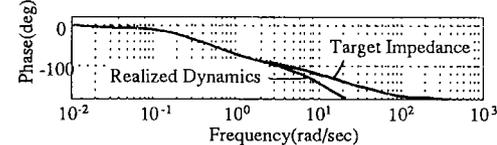
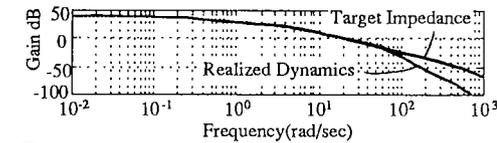
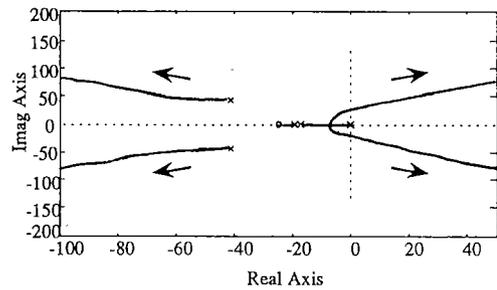
なので、動特性モデル  $G$  に 2 次の分子の項を追加する。Fig. 4 に、従来の方法と提案する方法による動特性モデル  $G$  の構成を示す。

### 2.2 動特性モデルの分子の時定数の決定

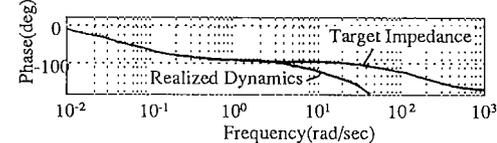
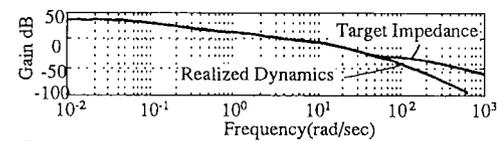
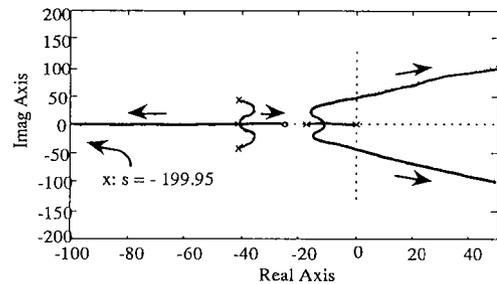
前記のサーボ系を例にとって動特性モデルの分子の時定数の決定方法を説明する。まず、次のような条件が与えられたとする。

- 対象物の剛性の最大値:  $K_e = 1000$  [N/m]
- 目標インピーダンス:  
 $Z_o$ : (1[kg], 20[N/(m/s)], 10[N/m])
- サーボ系のゲイン:  $K_p = 25, K_v = 100, K_i = 25$

Fig. 5 に示す根軌跡とボデ線図からわかるように、従来の方法では硬い対象物に接触すると制御系が不安定になる。Fig. 2 の開ループ  $GN$  の伝達関数の次数差は 4 である。したがって、ループゲインにあたる対象物の剛性  $K_e$  が大きくなるにつれて、Fig. 2 の閉ループの極が不安定な領域に移動することが、Fig. 5 の根軌跡からわかる。また、Fig. 5 のボデ線図は対象物の剛性値  $K_e = 1000$  [N/m] に対し接触系の安定余裕がないことを示している。したがって、高々ばねばかりのばね程度の剛性をもつ対象物に接触しても、従来の方法では不安定にな



**Fig. 5** Root Locus and Bode Plot of Conventional Method with Small Target Viscosity.  
 $Z_o$ : ( $m_o, b_o, k_o$ ) = (1[kg], 20[N/(m/s)], 10[N/m]).  $K_e = 0 \rightarrow \infty$  [N/m] in Root Locus.  $K_e = 1000$  [N/m] in Bode Plot.



**Fig. 6** Root Locus and Bode Plot of Conventional Method with Large Target Viscosity.  
 $Z_o$ : ( $m_o, b_o, k_o$ ) = (1[kg], 200[N/(m/s)], 10[N/m]).  $K_e = 0 \rightarrow \infty$  [N/m] in Root Locus.  $K_e = 1000$  [N/m] in Bode Plot.

ることがわかる。

一方、接触の安定性を上げるには、目標粘性  $b_o$  を上げればよいことが従来より知られている[4]。目標粘性  $b_o$  のみを 10 倍にした場合の根軌跡とボデ線図を Fig. 6 に示す。目標粘性  $b_o$  が小さい場合に比べ、安定余裕が若干増加していることがわかる。しかし、接触系の一巡伝達関数の次数は変わらない

ため、環境の剛性がある値以上に高くなるとやはり接触が不安定になる。

目標インピーダンスのパラメータを変えずに接触安定性を上げるには、以下のようにして動特性モデル  $G$  に分子の項を加える。

- (1) サーボ系の応答性を理想的 (伝達関数=1) と仮定し、対象物の剛性の最大値と目標インピーダンスとから、接触安定性をボード線図その他で判定する。接触不安定と判定した場合は、目標インピーダンスを修正する。
- (2) サーボ系の遅れを加味した場合の接触安定性を、目標インピーダンスと対象物の剛性の最大値とから判定する。
- (3) サーボ系の遅れを加味した場合の接触が不安定な場合、目標インピーダンスに追従する周波数帯域  $\omega_o$  を

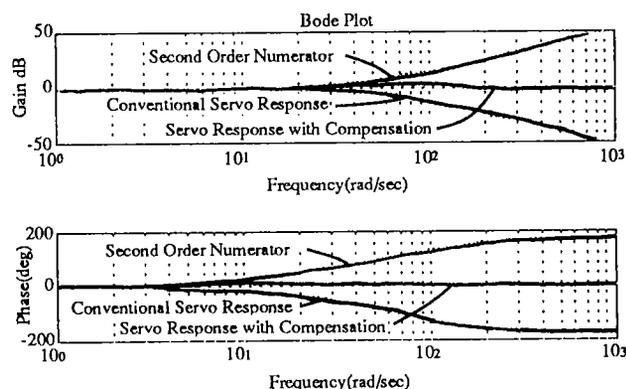


Fig. 7 Conventional and Compensated Servo Responses.

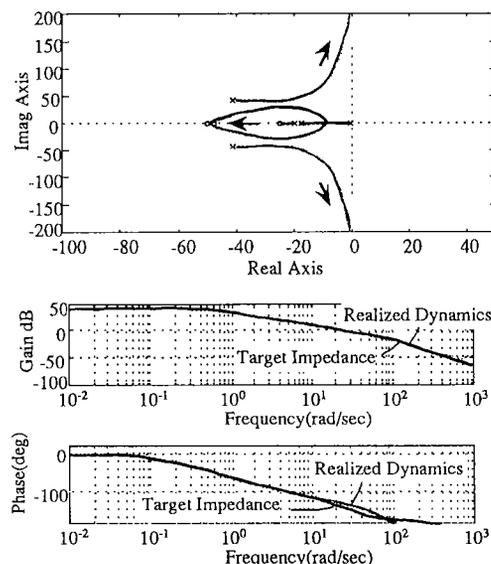


Fig. 8 Root Locus and Bode Plot of Proposed Method with Small Target Viscosity.  
 $Z_o: (m_o, b_o, k_o) = (1[\text{kg}], 20[\text{N}/(\text{m}/\text{s})], 10[\text{N}/\text{m}])$  with numerator  $(1+0.02 \text{ s})(1+0.0208 \text{ s})$ .  $K_e=0 \rightarrow \infty[\text{N}/\text{m}]$  in Root Locus.  $K_e=1000[\text{N}/\text{m}]$  in Bode Plot.

決定する。 $\omega_o$  は目標インピーダンスのゲインのクロスオーバー周波数以上であれば十分である。

- (4) サーボ系の遅れを解析し周波数帯域  $\omega_o$  を考慮して、動特性モデルの分子項の伝達関数を決定する。このとき分子項の次数は 2.1 節で議論した手順による。また、時定数は、 $\omega_o$  より低い帯域では目標インピーダンスに追従し、 $\omega_o$  より高い帯域では接触安定性を実現するように決定する。

次に、動特性モデルの分子項の設計例を上手順ののちで示す。(1)まず、サーボ系の応答性を理想的とし目標インピーダンスと対象物の剛性の最大値とを考慮した接触安定性は Fig. 5 のボード線図に示されている。この場合、サーボ系の応答が理想的であれば接触は安定である。(2)しかし、サーボ系の遅れを加味した場合の接触は不安定である。(3)そこで、目標インピーダンスに追従する周波数帯域を、クロスオーバー周波数付近の  $\omega_o=30[\text{rad}/\text{sec}]$  とする。(4)一方、分子が 1 次で分母が 3 次の伝達関数を持つサーボ系を、2 次遅れ系で近似して考えると、この遅れ要素をキャンセルする進み要素として、例えば時定数 0.02 と 0.0208 の 2 次進み要素を採用できる。改善されたサーボ系の伝達関数と用いた進み要素、従来のサーボ系の応答を Fig. 7 に示す。進み要素によりサーボ系はほぼ理想的な応答性を持つようになる。この進み要素を動特性モデルに加える分子項とする。分子項  $(1+0.02\text{s})(1+0.0208\text{s})$  を加えて修正した動特性モデル  $G$  による接触安定性を Fig. 8 に示す。ボード線図において安定余裕の十分あることが示されている。また、このとき接触系の一巡伝達関数の次数差が 2 次となることから、理論上、根軌跡のループゲインにあたる対象物の剛性  $K_e$  が大きくなっても閉ループの極は安定である。

### 3. 接触作業実験

1 軸のリニアスライダを用いた実験で、サーボ系をベースとしたインピーダンス制御の接触安定性を検証する。Fig. 9 に実験装置を示す。スライダは、ボールスクリュウを通して DC サ

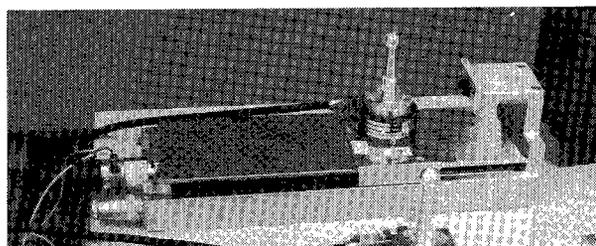
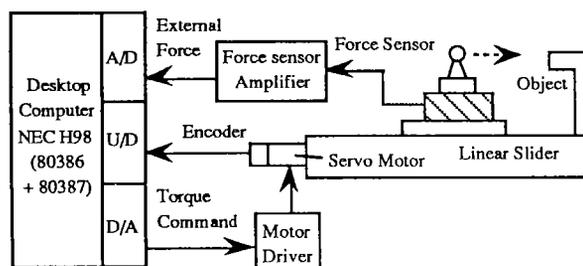


Fig. 9 One D. O. F. Linear Slider and its Control Block.

ーボモータにより駆動される。スライダのテーブルに力センサを装着し、スライドする方向に作用する外力を計測する。テーブルの位置はモータの回転角度から求める。また、2次のデジタル・ローパスフィルタをふくむ微分によって角度から角速度をもとめ、テーブルの速度に換算する。計算機では、外力およびテーブルの位置・速度と設定した目標インピーダンスとから、指令位置を計算する。計算機ではまた、位置のP制御と速度のPI制御によりデジタルサーボ系を構成する。サーボ系によるトルク指令をモータドライバに出力する。なお、ボールスクリュウのピッチは10[mm]、エンコーダは1000[p/rev]を4通倍して用いた。また、力センサの定格は50[N]、制御周期は2[ms]である。対象物は金属の表面に堅いゴムをはりつけたものである。

従来の方法と、動特性モデルを修正する新しい方法とを比較するため、動特性モデル  $G$  の構成を変えて、対象物に接触させる。このときの位置と力の応答を計測する。この新しい方法は第2章で設計した動特性モデルによるものである。

Fig. 10(a)に示した実験結果は、従来の方法によるもので、目標粘性を小さくした場合である。対象物への接触直後か

ら振動的で不安定となる。Fig. 10(b)の実験結果は、従来の方法によるもので、目標粘性を大きくした場合である。これが接触を安定化させるひとつの方法である。ただし、接触は安定的であるが対象物へ作用する力が大きい。Fig. 10(c)は、新しい方法によるもので、目標粘性を小さくした場合である。接触は安定的で、しかも対象物へ作用する力が小さい。Fig. 10(d)は、新しい方法によるものであるが、対象物への接近速度を2.5倍に上げた結果を示す。接近速度を上げてても接触は安定的で、しかも対象物へ作用する力が過大にならなかった。

#### 4. 考 察

(1) 提案した手法は、本論文で取り上げた以外の構成のサーボ・コントローラにも容易に適用することができる。本論文ではP-PI位置サーボ系をもとに動特性モデルを設計したが、例えばP-P位置サーボ系でも同様に設計できる。P-P位置サーボ系の場合は、サーボ系の伝達関数は分子が0次で分母が2次である。したがって、Fig. 2の接触系の一巡伝達関数は、目標インピーダンスを考慮すると分子が0次で分母が4次となり、次数差は4次である。したがって、動特性モデルにやはり

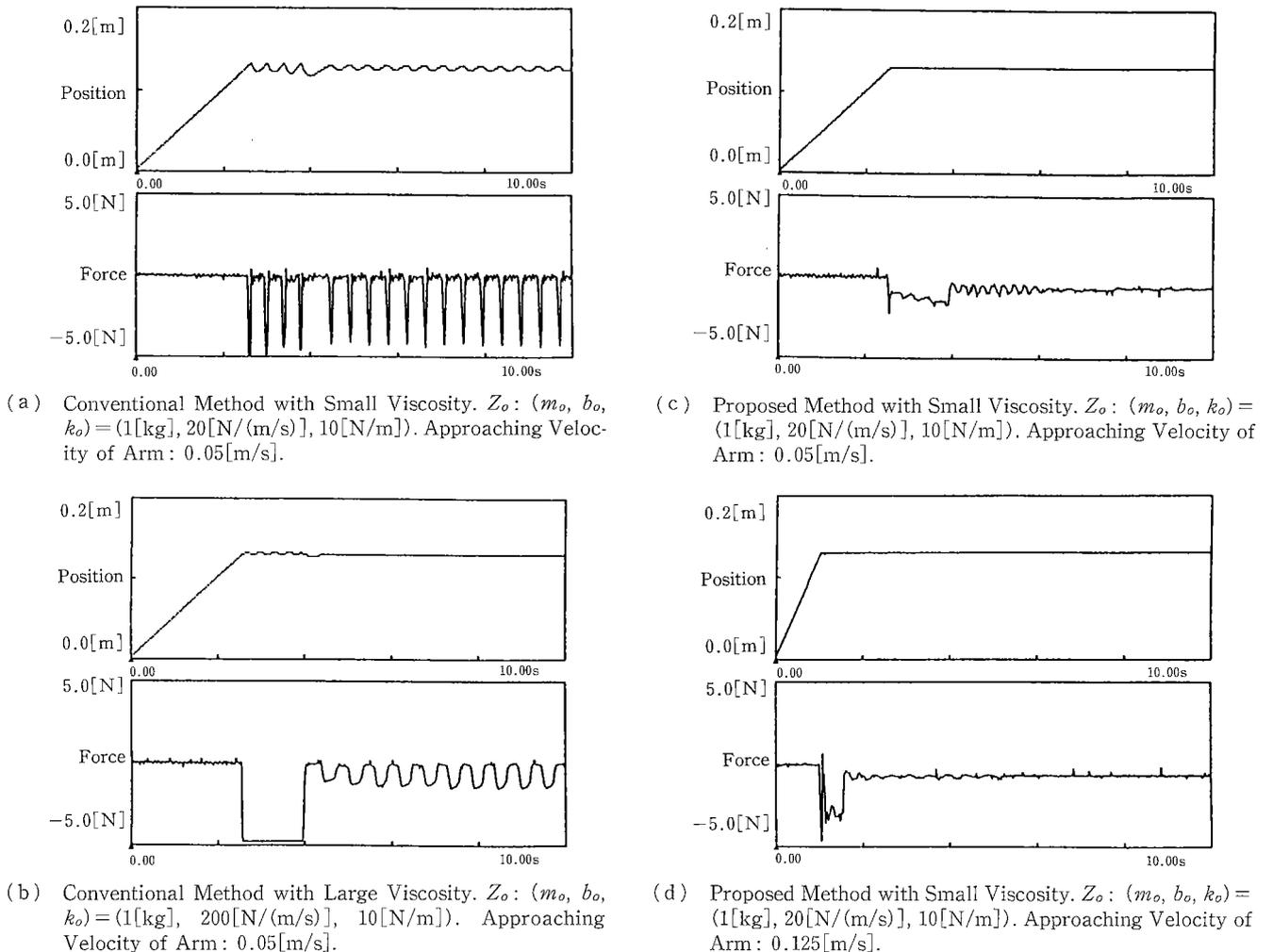


Fig. 10 Experimental Results of Contact Tasks.

2 次の分子項を加えれば接触を安定化することができる。

(2) 提案した手法は、本論文で取り上げた以外の構成の動特性モデルであっても容易に適用できる。本論文では動特性モデルとして2次の目標インピーダンスを採用してモデルの分子項の設計を行ったが、バネとダンパだけの1次モデルでも同様に設計できる。位置サーボ系をP-PIとしたとき動特性モデルを1次とすると、Fig. 2の接触系の一巡伝達関数は分子が1次で分母が4次となり、次数差は3次となる。したがって、動特性モデルに例えれば1次の分子項を加えれば接触を安定化できる。

(3) サーボ系の構成自体を改良することでインピーダンス制御の応答性を高める文献[9][10]のようなアプローチと提案する手法とは次の点で異なる。前者の方法はサーボ系の構成自体を変更しているため、対象物への接触・非接触にかかわらず、常に改良したサーボ系が働く。これに対し提案する手法は、サーボ系を変更せずに動特性モデルを修正しているため、外力がかかったときのみサーボ系の応答性が結果的に改善されて接触を安定化する。確かに前者のアプローチでは、アーム各軸のサーボ系の応答性が十分高ければ位相遅れなく目標インピーダンスを実現でき、接触の安定性も高めることができる。すなわち、Fig. 7に示したような、伝達関数が1に近い理想的な応答を持つサーボ系を構成できればよい。しかし、前者の方法は非接触時にも改良したサーボ系が働くため、高周波領域まで伝達関数が1に近いサーボ系を実現することが難しい。それは高周波の外乱によってサーボ系が不安定になるからである。このため高周波の外乱を除去する目的で、低周波領域で高く高周波領域で低くなるようにサーボ系の応答を設計するのが普通である。一方、提案する手法は、Fig. 7に示したような理想的なサーボ系の応答を実現するのは接触時のみであって、非接触時は既存のサーボ系が働く。接触時には、接触系全体の応答が目標インピーダンスに従うため、ローパスフィルタの働きをもつ目標インピーダンスによって高周波の外乱が除去される。このように、提案する手法は外乱除去のためにサーボ系および動特性モデルを設計変更する必要がなく、接触時のサーボ系の応答を高周波領域まで等価的にほぼ1にできるため、前者のアプローチに比較して接触の安定性をより向上させることができると考える。

(4) 2章で述べているように、本論文では、アームが剛体であること、定常的に接触している状態のみを考察すること、対象物の動特性を剛性のみとすること、の3点を前提としている。以下、これらの妥当性を検討する。第1の仮定について、本論文ではサーボ系の位相遅れのみに着目しているため、機構の弾性要素は無視している。また、本論文の実験ではアームの剛性の高い理想的状態で実験している。多関節ロボットに本論文の手法を適用した場合、従来よりも接触の安定性が改善されるものの、非常に剛性の高い環境に接触する場合は、減速器やリンクの弾性要素の影響を考慮する必要がある。機構の弾性要素も考慮した手法の開発は次の課題である。第2の仮定について、実際の接触は接触・非接触の非線形な現象である。本論文では、このような非線形の接触・非接触の状態は複雑で解析が難しいので、接触している状態のみを考察した。これは安定性

の必要条件を導くことに相当する。この手法が実際に有効であることは本文に示すように実験にて確認している。非接触状態も含めた解析は今後の課題である。第3の仮定について、剛性以外の動特性をもつ対象へ接触した場合の安定性は、その対象の動特性に依存する。例えば、慣性・粘性・剛性をもつ一般的な2次系の対象物では、対象物の動特性が接触系の一巡伝達関数の分子の方に入るので、より安定に接触することができる。本論文での解析は剛性のみより厳しい条件で行ったものである。

(5) 接触の過渡的な応答について考察する。実験によれば、提案した手法を用いると、環境への接近速度を上げても接触が安定になり衝撃力も過大にならなかった。考察(4)でも述べたように、本論文では、接触の定常的な状態のみで過渡的な状態を考慮していない。しかし、外力に対する応答が目標インピーダンスに高周波領域まで一致する効果を提案した手法が持つことから、従来に比べ衝撃を緩和することが予想できる。このような過渡的な接触現象を含めた接触安定性の理論的な検討を進めることが今後の課題である。

(6) 本論文では1自由度系について検討しているが、提案した方法は多自由度系へも拡張可能である。これには、作業座標系の各軸方向に対して接触系を定義することで、接触安定性を検討できる。しかし、全体のアルゴリズムが複雑になるので、本論文で併記することは全体の分量から考えて適当でない。多自由度系に拡張した手法については別の論文等で詳しく議論したいと考える。

## 5. ま と め

実際のシステムでインピーダンス制御を実現する場合、接触の安定性に悪影響を及ぼすサーボ系の位相遅れを補償する制御アルゴリズムを提案した。このアルゴリズムは、目標インピーダンスに近い応答と高い接触安定性を実現できる。このための制御アルゴリズムと設計方法を具体的に示した。リニアスライダを用いた接触作業実験において、目標粘性を従来の1/10にしても安定した接触を行えることを検証した。今後、多自由度系への拡張、接触の過渡状態を含めた解析、また、アームの弾性要素の影響などの解析をすすめる所存である。

本研究をすすめるにあたり、研究の機会を与えてくださった(株)安川電機つくば研究所三浦博孝前所長、山崎重重所長、貴重な助言をいただいた同研究所の二見茂氏、下園直登氏、川辺満徳氏、井上康之氏、中村裕司氏に感謝します。

## 参 考 文 献

- [1] N. Hogan: "Impedance control part I-III," Trans. of ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement, and Control, vol. 107, pp. 1-24, 1985.
- [2] 榎, 榎, 荒井ほか: "力センサを用いないダイレクト・ドライブマニピュレータのインピーダンス制御," 日本ロボット学会誌, vol. 7, no. 3, pp. 175-187, 1989.
- [3] 榎, 榎: "インピーダンス制御の接触安定性についての一考察," 日本ロボット学会誌, vol. 12, no. 3, pp. 155-162, 1994.
- [4] 榎: "サーボ系をベースとしたインピーダンス制御における接触安定性の改善方法," 第11回日本ロボット学会学術講演会予稿集, vol. 1, pp. 257-260, 1993.

- [5] 井上, 舘, 荒井: “マスタスレーブ・マニピュレータのインピーダンス制御の一方法”, 日本ロボット学会誌, vol. 10, no. 4, pp. 64-74, 1992.
- [6] C. H. An, C. G. Atkeson, J. M. Hollerbach: “モデルに基づくロボットマニピュレータの制御”, 実教出版.
- [7] “ロボットアームのカフィードバック制御”, 計測と制御, vol. 25, no. 1, pp. 45-50 1986.
- [8] 宮崎, 萩原: “バイラテラル・マスタ・スレーブ・マニピュレータの並列型制御方式”, 日本ロボット学会誌, vol. 7, no. 5, pp. 446-452, 1989.
- [9] 小菅, 古田, 横山: “ロボットの仮想内部モデル追従制御系”, 計測自動制御学会論文集, vol. 21, no. 1, pp. 60-71, 1988.
- [10] 梅野, 堀: “2自由度ロバスタサーボ系の構成とマニピュレータの運動制御への応用”, 電学論 D, vol. 110, no. 11, pp. 1163-1170, 1990.



**榎 泰輔 (Taisuke Sakaki)**

1960年11月5日生。1985年、九州大学理学部数学科を卒業。(株)安川電機製作所(現(株)安川電機)に入社。1987年から1989年、通産省機械技術研究所客員研究員。1989年から(株)安川電機研究所つくば研究所研究員を経て現在に至る。工学博士。IEEE/IAS 1991 Annual Meeting 論文賞を受賞。

(日本ロボット学会正会員)



**舘 暉 (Susumu Tachi)**

1946年1月1日生。1968年、東京大学工学部計数工学科卒業。1973年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。工学博士、東京大学助手。1975年通産省機械技術研究所研究員。その後主任研究官、バイオロボティクス課長。1979年から1980年、マサチューセッツ工科大学客員研究員。1989年、東京大学助教授。1992年、東京大学教授に就任、現在に至る。IEEE/EMBS 学会賞、通商産業大臣賞などを受賞。

(日本ロボット学会正会員)