

## インピーダンス制御の接触安定性についての一考察

榎 泰輔\*<sup>1</sup> 館 暲\*<sup>2</sup>

## Contact Stability Analysis on Some Impedance Control Methods

Taisuke Sakaki\*<sup>1</sup> and Susumu Tachi\*<sup>2</sup>

This paper aims at the analysis of the contact stability of impedance control implemented to a robot manipulator. It is important for next generation robots to realize compliant motion to environment. Impedance control is one of the compliance control methods. However, there are still contact stability problems that the control system is unstable when the robot arm implemented with impedance control contacts to a stiff environment. In this paper, two methods of impedance control, Hogan's method and acceleration feedback method, are analyzed on the contact stability influenced with the locations of sensor and actuator. The target impedance, and modeling error are also considered. An one d.o.f. arm grasping a fixed stiff object is modeled and simulated under the consideration of unmodeled dynamics of the arm and the elasticity of the contact surface of the arm and its object. The analysis draws the results that the collocation of sensor and actuator does not always stabilize the contact task in the case of the existence of the unmodeled arm dynamics, and the stable regions of target impedance are different on these methods.

**Key Words** : Impedance Control, Contact Stability, Non-collocation

## 1. はじめに

工場外の整備されていない環境で活動することを想定した次世代ロボットには、対象物に対して柔軟な接触作業を行う機能が必要である。そのような環境では、非定型で一過性の作業が多く、作業対象物の形状や位置が前もって分かっていることが少ない。したがって、このような環境でたくみに作業を行うには、作業対象物に対して柔軟に接触できることが前提となる。

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に、インピーダンス制御がある。この制御は、機械的なインピーダンス（慣性・粘性・剛性）をアームの手先に柔らかさとして実現しようとするものである。これまで、この制御の適用手法として、いろいろなアルゴリズムが提案されてきた。アームの手先に力センサを装着し、外力情報を直接計測して制御系を構成する方法は、Hoganによって提案された[1]。力センサを用いずに角加速度を計測して制御系を構成する、いわゆる加速度フィードバック法は、館・榎らによって提案されている[2]。また、小菅らは仮想内部モデル追従制御系を用いた方法を、梅野らは外乱オブザーバを用いた方法

[9]を提案している。

しかし、インピーダンス制御を実用化するには、解決しなければならない課題がいくつかある。そのひとつは、インピーダンス制御を適用したアームを堅い環境に接触させると制御系が不安定になるという問題である。例えば、アームの手先に実現しようとするインピーダンスの目標値（目標インピーダンス）のうち、目標慣性の値を小さくとると、堅い環境への接触時に制御系が不安定になることが報告されている[8][12]。インピーダンス制御に限らず、一般に、力制御を適用したアームを剛性の高い堅い環境に接触させると、制御系が不安定になることが知られている。これを接触安定問題という[3]-[7]。これは、アクチュエータとセンサとを配置する場所が異なるいわゆる non-collocation の場合、アームを堅い環境に接触させると、アームを駆動するアクチュエータとアーム手先の力センサとの間に、それまで考慮していなかった減速機やリンクなどの剛性の影響が現れるためである。こうした接触安定問題を解決する方法として、アクチュエータとセンサとを同じ場所において、アクチュエータの状態を、直接、制御情報に用いる、アクチュエータとセンサの collocation が有効であることが知られている。

インピーダンス制御における接触安定問題について、従来いくつかの研究があるものの、制御の実現法や安定化の条件を制限しており十分な解析がなされていない。インピーダンス制御の接触安定性では、主として Hogan の方法について以下のよ

原稿受付 1993年4月15日

\*1株式会社安川電機

\*2東京大学先端科学技術研究センター

\*1Yaskawa Electric Corporation

\*2RCAST University of Tokyo

うな研究がなされている。例えば Volpe らは、Hogan の方法について、衝撃力を低減させて接触を安定化するような目標インピーダンスの条件を目標慣性について導出した[8]。Kazerooni らは、モデル化できない動特性の影響を考慮し、Hogan の方法について目標慣性と粘性の影響を解析している[12]。Sharon らは macro-micro manipulator なる大小の2重の構造を持つアームを用いて安定的な接触作業を実現したが[4]、安定に実現できる目標インピーダンスの範囲を十分に検討していない。Lawrence は制御の位相遅れを考慮し、安定的な制御を行うための目標インピーダンスの設定範囲を検討したが[5]、モデル化の難しいアーム動特性の影響を考慮に入れていない。羅らは、Hogan の方法を一般化した上で、可動な対象物を安定的に押す動作を解析したが[11]、固定された対象物への接触安定性について検討しておらず、アームの動特性を動的制御ですべて補償できるとする仮定をおいている。これらの研究では、まとめると、次のような問題点が残っている。第一に、モデル化の難しい振動要素がアームに存在する場合、狭義の力制御についてはセンサとアクチュエータの collocation によって接触を安定化できることが知られているものの[3]-[7]、インピーダンス制御にこの議論をそのまま適用できるかどうか明らかでない。特に、センサとアクチュエータの配置が collocation となっている加速度フィードバック法について、接触安定性の検討がなされていない。第二にインピーダンス制御の各種の実現法において、目標インピーダンスの各パラメータの接触安定性に対する影響の解析が十分でない。第三に、モデル化誤差・変動の影響を考慮に入れた解析が少ない。

そこで、この論文では、Hogan の方法[1]と館らの加速度フィードバック法[2]という2つの手法をとりあげ、シミュレーションによって接触安定性を定性的に解析することを試みる[14]。Hogan の方法ではセンサとアクチュエータの配置が non-collocation であり、加速度フィードバック法では collocation である。これらの手法に対し、モデル化の難しい振動要素がアームに存在するときに、センサとアクチュエータの配置の接触安定性に対する影響を調べる。このとき、目標インピーダンスの各パラメータ、モデル化誤差・変動の影響も考慮する。

## 2. 接触安定性のシミュレーション解析

### 2.1 本報告で解析する接触の状態と不安定化要因

まず、動特性の異なる次の2つの状態に接触作業を分けて考える。

- ・ 過渡的な接触の状態
- ・ 定常的な接触の状態

接触の状態は、過渡的な状態から定常的な状態にうつる。過渡的な接触の状態とは、アームが環境に衝突し環境の接触面ではねている状態を指す。この状態は、アームが環境に接したり離れたりするので非線形で複雑な動特性を持つ[10]。また、定常的な接触の状態とは、過渡的な接触状態の後、アームが環境に連続的に接触している状態を指す。アームが環境を把持している状態もこれに含まれる。

次に、アームで力制御を行った時に接触が不安定になる要因を考える。不安定化の要因として、従来より次の諸点が指摘さ

れている[3]-[8]。

- 1) 減速機などの動特性によるモデル化できない高次の振動モード、
- 2) センサとアクチュエータの non-collocation、
- 3) 衝突時の衝撃力、及び衝突時の非線形な振動、
- 4) 接触面の低粘性、
- 5) アクチュエータ出力の非線形性、
- 6) 制御の位相遅れ。

これらの要因のうち1)と2)についてはすでに前章で説明した。要因3)は過渡的な接触状態での現象である。要因4)-6)は接触の状態によらず、接触安定性に影響する要因である。要因4)は、接触面の粘性が低いとアームの運動エネルギーを吸収することができないことを指す。要因5)と6)は、いずれも制御を正確に実行することができないために接触の不安定を生ぜしめるものである。実際の接触作業においては、アームの機構、アクチュエータやコントローラの種類、適用する力制御の方式によって、接触を不安定化する支配的な要因が異なる。このように接触の過程と不安定化の要因は極めて複雑となり、これらを一度に解析することは難しい。

以上のことから、インピーダンス制御における接触安定問題を解析する第一ステップとして、次のように問題を単純化して考察をすすめることにする。

- 1) インピーダンス制御による接触の過渡的な状態は複雑で解析が難しいため、アームが環境を把持した定常的な接触の状態のみを考える。これから接触安定の必要条件を導く。
- 2) アームに存在するモデル化の難しい振動要素を1次振動モードに単純化する。モデル化が難しく、制御系に用いるモデルに取り込めない振動要素の影響を調べる。これは、今回、センサとアクチュエータの配置の有効性を検討するには十分である。
- 3) 環境の動特性を剛性のみとする。環境の動特性は文献[10]のように慣性・粘性・剛性の2次系がより一般的である。しかし、粘性要素は接触時のアームのエネルギーを散逸するため、これを除いて接触安定性に対してより厳しい条件とする。

### 2.2 接触系の構成とアームに実現した仮想動特性の導出

2.1での条件にそって、本報告で解析する接触系のモデルの構成を示し、次にアーム手先に制御によって実現した仮想動特性を導出する。

アームが環境を把持した定常的な接触状態を表す系を接触系と呼ぶ。これは次のように構成される。アームの実際の動特性とインピーダンス制御系とをまとめてアーム手先の仮想動特性  $G(s)$  とする。アームが環境に作用する力を  $F_e$  とすると、Fig. 1に示すように環境からアームへの外力  $-F_e$  に対するアーム先端の運動  $X_s$  の伝達関数が  $G(s)$  である。これは手先に実現した仮想アドミタンス、すなわちインピーダンスの逆数に相当する。環境は、これと接するアーム手先から運動  $X_s$  をうけて、外力  $-F_e$  を発生しアームに伝える。接触安定性を解析した従来の文献[7][8]では、アームと環境とを合わせた動特性を導出し、これとアームに適用する力制御系を組み合わせで解

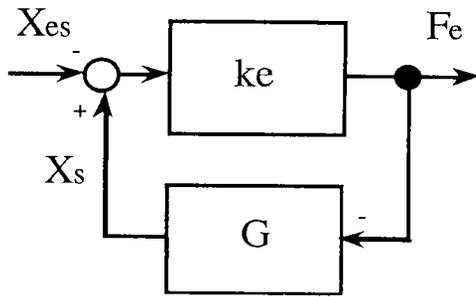


Fig. 1 Block diagram of arm-object contact system.

$X_s$ : arm endpoint position  
 $X_{es}$ : object surface position  
 $F_e$ : external force  
 $k_e$ : object elasticity  
 $G$ : arm endpoint virtual dynamics

析している。このため環境の動特性は固定されており、この動特性の変動に伴う制御系の挙動を観測する手順が複雑になる。これに対し、本報告で適用した方法では、アームの動特性と環境の動特性を分離しているため、環境の動特性（本報告では環境の剛性）の変動に伴う制御系の挙動の観測が容易である。

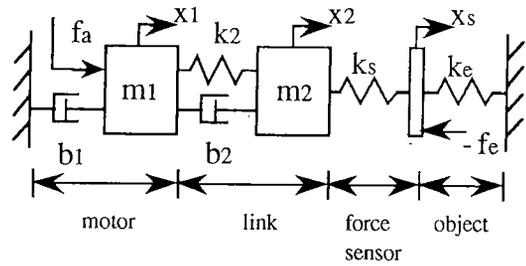
シミュレーションを行うために、アームと環境のモデル化を行う。まず、アーム手先の力センサを用いてセンサとアクチュエータの配置が non-collocation のアーム、力センサを用いないでセンサとアクチュエータの配置が collocation のアームの、2つのアーム構成を想定する。次に、減速機やリンクの剛性による高次の振動モードを、2次系でモデル化した固有周波数約 11 Hz の 1次振動モードに単純化する。アームの自由度数は 1 自由度とする。また、環境を高剛性のばねとする。定常的な接触状態を解析するため、環境とアームは初期状態から常に接触しているものとする。アームのモデル化誤差については、3.1 と 3.2 の解析では、モデルの値が真値に対し 20% 少ないとする。また、3.3 では、モデルの値が真値に対し 50% と 150% の大きさをもつようにモデル化誤差が生じた場合を考察する。

手先に実現した仮想アドミタンスの伝達関数は、インピーダンス制御の手法とこれを適用するアームの構成によって異なる。以下に Hogan の方法と加速度フィードバック法の 2 種の制御を、1次振動モードをもつアームに適用した場合の伝達関数を求める。Fig. 2 にそれぞれの場合のアームの構成を示す。以下では、簡単化のため、モータとリンクの動特性をそれぞれ次のようにおく。

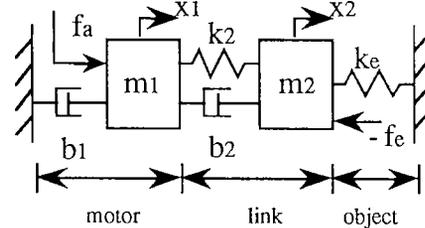
$$M_1(s) = m_1 s^2 + b_1 s \quad (1)$$

$$M_2(s) = m_2 s^2 + b_2 s + k_2 \quad (2)$$

$M_1$  と  $M_2$  を結合した動特性がアーム動特性の真値である。制御系に用いるアームの動特性モデルを  $M$  とする。 $M$  の値はアームの慣性のみをモデル化した値とする。 $M_1$  や  $M_2$  に含まれる振動要素は同定することができず、制御系にとりこめないとする。以下ではこうした振動要素が接触系の安定性に及ぼす影響を調べる。なお、簡単化のため、アーム質量の真値はモータとリンクの慣性値の和  $m_1 + m_2$  とする。また、適用するアームによってアーム手先の位置を表す記号が異なることに注意され



(a) Arm including first mode with a force sensor.



(b) Arm including first mode without force sensors.

Fig. 2 Dynamics model of contact task system between robot and its object.

たい。

#### a. 1次振動モードをもつアームに Hogan の方法を適用した場合

力センサをアーム手先に装着して外力を直接計測し、目標インピーダンスにしたがってアーム手先の運動を制御するのが Hogan の方法である。これはアームの手先で外力を直接計測することで正確な力制御が可能であるが、アーム手先以外の部分で力制御を行うことはできない。

Fig. 2(a) に示すような、1次振動モードと力センサを含むアームの動特性は、

$$f_a = m_1 \ddot{x}_1 + b_1 \dot{x}_1 + k_2(x_1 - x_2) + b_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (3)$$

$$k_2(x_1 - x_2) + b_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = m_2 \ddot{x}_2 + k_s(x_2 - x_s) \quad (4)$$

$$k_s(x_2 - x_s) = k_e x_s = f_e \quad (5)$$

である。ここで  $x_1, x_2, x_s$  はそれぞれモータ、リンク、力センサの位置を表す。これらは、アームの出力が零のときにアームと環境とが互いに力を作用せず接している状態を原点とする。また、 $f_a$  はモータの出力、 $f_e$  はアームが環境に作用する力、 $k_s$  は力センサの剛性、 $k_e$  は環境の剛性を表す。これらをラプラス変換してまとめると、

$$F_a(s) = A(s)X_s + B(s)F_e \quad (6)$$

となる。ただし、(1)(2)から、

$$A(s) = \frac{[M_1 + b_2 s + k_2]M_2 - (b_2 s + k_2)^2}{b_2 s + k_2} \quad (7)$$

$$B(s) = \frac{[M_1 + b_2 s + k_2][M_2 + k_s] - (b_2 s + k_2)^2}{k_s(b_2 s + k_2)} \quad (8)$$

とする。

さて、アーム手先の位置  $X_s$  から、環境からアームへの外力  $F_e$  への関係を表す目標インピーダンス  $Z_o$  を周波数領域で、

$$Z_o = -\frac{F_e}{X_s} = m_o s^2 + b_o s + k_o \quad (9)$$

と表す。ここで  $m_0, b_0, k_0$  はそれぞれ目標慣性、目標粘性、目標剛性の各係数である。式(9)を時間領域で、

$$-f_e = m_0(\ddot{x}_1 - \ddot{x}_d) + b_0(\dot{x}_1 - \dot{x}_d) + k_0(x_1 - x_d) \quad (10)$$

と表す。ここで  $x_d$  はアーム手先の目標位置である。また、普通、アーム手先の位置  $x_s$  は直接計測できないのでモータの位置  $x_1$  を用いる。

式(10)をもとに次のように制御系を組む。まず、この式によって実行すべきアーム手先の運動は、

$$\ddot{x}_1 = \ddot{x}_d - \frac{1}{m_0} \{b_0(\dot{x}_1 - \dot{x}_d) + k_0(x_1 - x_d) + f_e\} \quad (11)$$

となる。そこで、アームの質量のみをモデル化して  $M$  と表すと、Hogan のインピーダンス制御則は、

$$f_a = M \left[ \ddot{x}_d - \frac{1}{m_0} \{b_0(\dot{x}_1 - \dot{x}_d) + k_0(x_1 - x_d) + f_e\} \right] + f_e \quad (12)$$

となる。これは Hogan の方法を一般化したものである [6]。式(11)(12)をまとめてラプラス変換すると、

$$F_a(s) = M X_d + \left(1 - \frac{M}{Z_0}\right) F_e \quad (13)$$

である。この方法を用いた場合にアーム手先に実際に実現できる仮想アドミタンスは、外力  $-F_e$  からアームの手先の位置  $X_s$  までの伝達関数である。式(6)-(13)から伝達関数  $G_1$  は次のようになる。

$$G_1 = -\frac{X_s}{F_e} = \frac{k_s(M - Z_0)(b_2s + k_2) + Z_0\{(M_1 + b_2s + k_2)(M_2 + k_s) - (b_2s + k_2)^2\}}{k_s Z_0\{(M_1 + b_2s + k_2)M_2 - (b_2s + k_2)^2\}} \quad (14)$$

### b. 1次振動モードをもつアームに加速度フィードバック法を適用した場合

力センサを用いずに外力を推定し、目標インピーダンスにしたがってアーム手先から環境への力を制御するのが加速度フィードバック法である。これは、外力を直接計測せず各関節の角加速度から外力を推定するので、力センサを用いる方法に比べ力制御の精度がやや劣る。力制御の精度をあげるには、精密な角加速度センサあるいは角加速度推定装置が必要である。

Fig. 2(b)に示すような1次振動モードを含むアームの動特性は、Fig. 2(a)と同様にして、

$$f_a = m_1\ddot{x}_1 + b_1\dot{x}_1 + k_2(x_1 - x_2) + b_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) \quad (15)$$

$$k_2(x_1 - x_2) + b_2(\dot{x}_1 - \dot{x}_2) = m_2\ddot{x}_2 + f_e \quad (16)$$

である。これらをラプラス変換してまとめると、

$$F_a(s) = C(s)X_2 + D(s)F_e \quad (17)$$

となる。ただし、式(1)(2)から、

$$C(s) = M_1 + \frac{m_2s^2(b_2s + k_2)}{M_2} \quad (18)$$

$$D(s) = \frac{b_2s + k_2}{M_2} \quad (19)$$

とする。式(9)の目標インピーダンス  $Z_0$  より、加速度フィードバック法の制御則を式(10)と同様に次のように表す。

$$f_a = M\ddot{x}_d + m_0(\ddot{x}_d - \ddot{x}_1) + b_0(\dot{x}_d - \dot{x}_1) + k_0(x_d - x_1) \quad (20)$$

この方法を用いた場合の仮想アドミタンスの伝達関数は、式(17)-(20)より、次のようになる。

$$G_2 = -\frac{X_2}{F_e} = \frac{(M_1 - M + Z_0) + (b_2s + k_2)}{M_2(M_1 - M + Z_0) + m_2s^2(b_2s + k_2)} \quad (21)$$

## 3. 接触系の安定性の評価

この章では、根軌跡法を接触系に適用して、Hogan の方法と加速度フィードバック法の安定性を解析する。これらの接触系は、Fig. 1のようなフィードバック制御系に等価である。接触系の1巡伝達関数  $G_0$  は

$$G_0 = k_e G \quad (22)$$

である。ここで環境の剛性  $k_e$  をゲイン定数とみると、この根軌跡は、ちょうど環境の剛性  $k_e$  が0から $\infty$ まで変化したときの閉ループ系の安定性の変化を表す。また、極零マップは、開ループ  $G_0$  の極と零点の位置を表す。この極は  $k_e = \infty$  のときの Fig. 1 の閉ループ系の極に相当し、零点は  $k_e = 0$  のときの閉ループ系の極の位置を表す。これらの図を調べることで、Fig. 1 に示した接触系の安定性を環境の剛性の大きさに合わせて解析することができる。以下のシミュレーション解析では、目標インピーダンス  $Z_0$  (慣性  $m_0$ , 粘性  $b_0$ , 剛性  $k_0$ ) とモデル化誤差を変えながら、接触系の根軌跡と極零マップを計算する。ここで、シミュレーションの条件として、

$$\begin{aligned} m_1 &= 2.97[\text{Kg}], \\ b_1 &= 22.8[\text{N}/(\text{m}/\text{s})], \\ m_2 &= 0.88[\text{Kg}], \\ b_2 &= 2.28[\text{N}/(\text{m}/\text{s})], \\ k_2 &= 4209[\text{N}/\text{m}], \\ k_s &= 5000[\text{N}/\text{m}], \end{aligned}$$

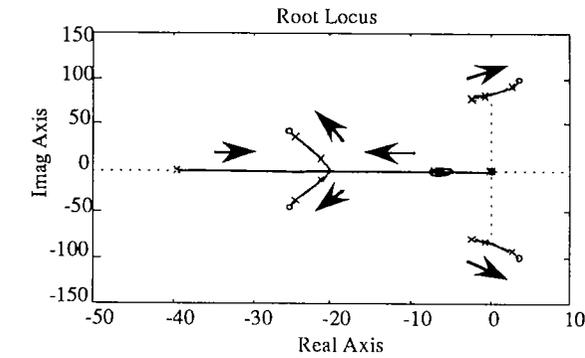
と設定した。

### 3.1 1次振動モードをもつアームにHoganの方法を適用した場合

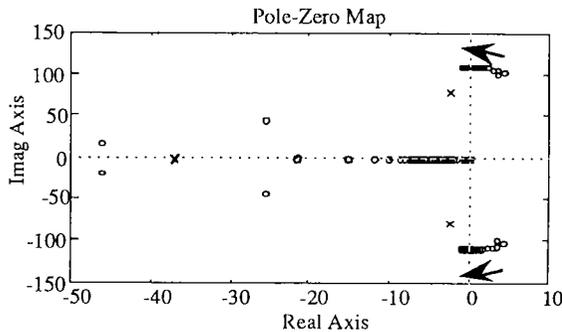
Hogan の方法は以下の特徴をもつ。まず、センサとアクチュエータの関係は non-collocation である。すなわち、アクチュエータの位置から離れたアーム手先に力センサをとりつけ、外力を直接計測してフィードバックする。また、インピーダンス制御されたアームの手先に現れる伝達関数  $G_1$  は、分子が6次で分母が6次である。したがって、根軌跡上に開ループ  $G_1$  の零点が6個と極が6個生じる。

Fig. 3(a)は根軌跡で、環境の剛性値の変化にそった接触系の極の移動の傾向を表す。ここでは目標インピーダンスの慣性パラメータを真値より小さく設定し、粘性パラメータも小さく設定している。この図では、開ループ  $G_1$  の極はすべて左半平面に存在するが、2個の零点が右半平面に生じている。このときループゲインである環境の剛性  $k_e$  を上げていくと、Fig. 1 に示した閉ループ系の極が、軌跡にそって不安定領域に移動する。図から  $k_e = 1000[\text{N}/\text{m}]$  を越えたところで、閉ループ系すなわち接触系が不安定になることが分かる。この閉ループ系の極の移動は、目標インピーダンスを変化させた以下の例においても共通した傾向を示す。

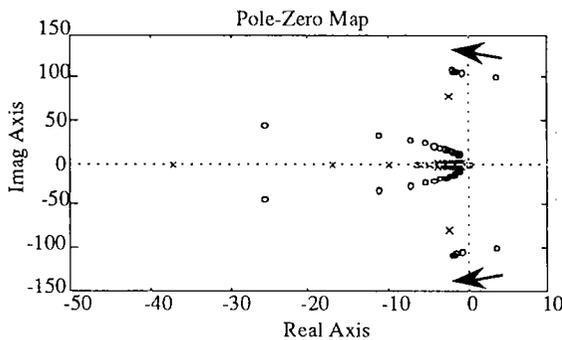
目標インピーダンスのパラメータによって接触系の安定性が変化することが、Fig. 3(b)とFig. 3(c)の極零マップに表れている。これらの極零マップは、目標インピーダンスのあるパラメータを変化させたときの開ループ  $G_1$  の極と零点の位置の変化を示す。前に述べたように、極零マップの極は  $k_e = 0$  のときの接触系の極に相当し、零点は  $k_e = \infty$  のときの接触系の極の



(a) Root locus of closed loop of arm-object contact system.  
 $k_e=0 \rightarrow \infty$  [N/m].  
 $m_o=1$  [Kg] ( $< m_1+m_2=3.85$  [Kg]),  
 $b_o=50$  [N/(m/s)],  $k_o=10$  [N/m]: fixed.  
 $x$ : poles at  $k_e=0, 1000$  and  $k_e=10000$  [N/m].



(b) Pole-zero map of open loop transfer function  $G_1$ .  
 $b_o=50 \rightarrow 1000$  [N/(m/s)].  
 $m_o=1$  [Kg] ( $< m_1+m_2=3.85$  [Kg]),  
 $k_o=10$  [N/m]: fixed.



(c) Pole-zero map of open loop transfer function  $G_1$ .  
 $m_o=1 \rightarrow 10$  [Kg].  
 $b_o=50$  [N/(m/s)],  $k_o=10$  [N/m]: fixed.

Fig. 3 Hogan's method applied to the arm including first mode.

位置を表す。Fig. 3(b)では、目標インピーダンスの慣性パラメータをFig. 3(a)と等しくとり、粘性パラメータを小さい値から大きい値へ変化させた。Fig. 3(c)では、目標インピーダンスの粘性パラメータをFig. 3(a)と等しくとり、慣性パラメータを小さい値から大きい値へ変化させた。

Fig. 3の根軌跡と極零マップが示すように、目標インピーダ

ンスのうち、目標慣性と粘性の値がともに小さいと不安定になりやすい。接触系を安定化するには、目標インピーダンスの慣性と粘性のパラメータのうち、どちらかの値を大きくする必要がある。一方のパラメータの値を小さくするときは、もう一方のパラメータの値を大きくすれば接触系が安定化する。例えば、Fig. 3(b)の極零マップが示すように、目標粘性を大きくすると開ループ  $G_1$  の零点は左半平面に移動するので接触系は安定化する。これはループゲインである環境剛性  $k_e$  を大きくしても閉ループである接触系の極が右半平面に移動しないためである。逆に、目標粘性が小さいときは、目標慣性の値を大きくすると、Fig. 3(c)に示すように接触系は安定化する。このように、Hoganの方法では目標慣性と目標粘性の値をとともに小さく設計することができない。

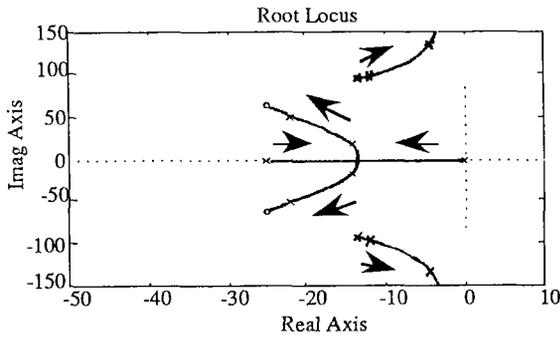
また、目標インピーダンスの値を変えたときの接触系の安定性の変化は連続的である。Fig. 3(b)(c)によれば、目標インピーダンスのパラメータの変化につれて、右半平面と左半平面の間を開ループ  $G_1$  の零点が連続的に移動し、 $G_1$  の極は左半平面にとどまっている。開ループ  $G_1$  の零点が左半平面にあると、ループゲイン  $k_e$  の大きにかかわらず常に閉ループ系の極が安定領域に存在するため、環境の剛性の任意の値に対して接触系は常に安定となる。また、この零点が右半平面にあれば、環境剛性が大きくなるにつれて閉ループ系の極が不安定領域に移動し、接触系は不安定になる。ここで、開ループ  $G_1$  の極が左半平面にとどまるのは、 $G_1$  をみると分かるように、分母にある  $Z_o$  が他の開ループの極に影響しないためである。したがって、 $Z_o$  の2個の極以外の開ループ  $G_1$  の極は極零マップの左半平面に固定される。

以上より、1次振動モードをもつアームにHoganの方法によるインピーダンス制御を適用する場合には、目標慣性あるいは目標粘性のいずれかの値を大きくすることが、接触系の安定度を増すために必要である。

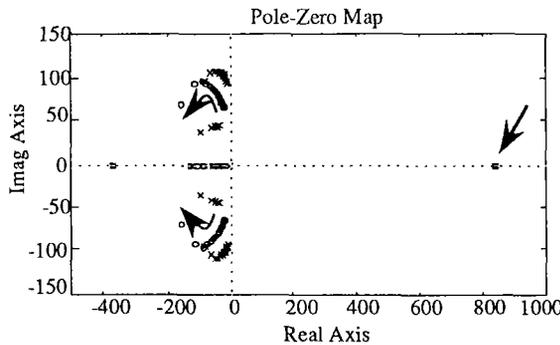
### 3.2 1次振動モードをもつアームに加速度フィードバック法を適用した場合

加速度フィードバック法は以下の特徴を持つ。まず、センサとアクチュエータが collocation の関係をもつ。すなわち、力センサを用いず加速度を含むアクチュエータの運動から外力を推定するため、運動を計測するセンサとアクチュエータが同じ位置にある。また、インピーダンス制御されたアーム手先の動特性を表す伝達関数  $G_2$  は、分子2次で分母4次である。したがって、根軌跡上に開ループの零点が2個と極が4個生ずる。

Fig. 4(a)は根軌跡で、環境の剛性値の変化にそった接触系の極の移動の傾向を表す。ここで目標インピーダンスその他をFig. 3(a)に等しい条件とした。以下、目標インピーダンスを変えてもこの傾向は共通している。目標インピーダンスの慣性パラメータを真値より小さくとり粘性パラメータも小さく設定しているにもかかわらず、開ループ  $G_2$  の極と零点がすべて左半平面に存在している。したがって、ループゲインである環境の剛性  $k_e$  を上げていくと、閉ループ系の極が軌跡にそって虚軸の方に移動するが、右半平面へは移動しないため閉ループ系が不安定になることはない。この例では漸近線と実軸との交点は  $s=-1.295$  である。このとき Fig. 1 に示した接触系は環境



(a) Root locus closed loop of arm-object system.  
 $k_e=0 \rightarrow \infty$  [N/m].  
 $m_0=1$  [Kg] ( $< m_1+m_2=3.85$  [Kg]),  
 $b_0=50$  [N/(m/s)],  $k_0=10$  [N/m]: fixed.  
 x: poles at  $k_e=0, 1000$  and  $k_e=10000$  [N/m].



(b) Pole-zero map of open loop transfer function  $G_2$ .  
 $m_0=1 \rightarrow 0.1$  [Kg].  
 $b_0=50$  [N/(m/s)],  $k_0=10$  [N/m]: fixed.

Fig. 4 Tachi and Sakaki's acceleration feedback method applied to the arm including first mode.

の剛性の任意の値に対して常に安定である。このことから、目標粘性と目標剛性が正值なら、それらのパラメータの値とは無関係に、実慣性より小さい目標慣性でも接触系が安定となることが分かる。

目標インピーダンスのパラメータを変化させたときの、接触の安定性の変化は Fig. 4(b)の極零マップに表れている。この図は、目標インピーダンスの粘性パラメータを Fig. 3(a)と等しくとり、慣性パラメータを  $1.0$  [Kg] から  $0.1$  [Kg] へ変化させたときの開ループ  $G_2$  の極と零点の位置の変化を示す極零マップである。

目標インピーダンスのうち、接触系の安定性に影響するのは目標慣性パラメータだけである。目標粘性パラメータと剛性パラメータは、接触系の安定性に影響しない。この点が Hogan の方法と異なる。これは、伝達関数  $G_2$  の分子の項  $(M_1 - M + Z_0)$  の  $s^2$  の係数が正であるかぎり、開ループ  $G_2$  の2個の零点は左半平面に必ず存在するためである。  $G_2$  の分子の項  $(M_1 - M + Z_0)$  の  $s^2$  の係数がこれ以外の場合については 3.3 で検討する。

また、加速度フィードバック法では、目標粘性を固定した場合、Hogan の方法よりも小さい目標慣性を設定できる。この

シミュレーションでは、目標粘性を固定した場合、目標慣性の値の下限を Hogan の方法に比べて  $1/10$  以下に設定しても接触系を安定にすることができた。

Fig. 4(b)によれば、目標慣性を変化させたときの、接触系の安定性の変化は不連続である。目標慣性  $m_0=1.0$  [Kg] では、開ループ  $G_2$  のすべての極と零点が左半平面に存在する。しかし、  $m_0$  を  $1.0$  [Kg] から  $0.1$  [Kg] へ減少させていくと、  $m_0=0.1$  [Kg] に近い値で、開ループ  $G_2$  の1組みの極と零点が右半平面にジャンプする。これは次のように説明できる。伝達関数  $G_2$  で分子・分母の各最高次数を含む項は、分子では  $(M_1 - M + Z_0)$ 、分母では  $M_2(M_1 - M + Z_0)$  である。  $m_0$  を小さくしていくと、項  $(M_1 - M + Z_0)$  の最高次の係数が、あるところで正から負の値に変化する。このとき分子・分母の各最高次の係数が同時に負の値となり、開ループ  $G_2$  の極と零点が右半平面に生じる。 Fig. 4(b)では、  $m_0=0.1$  [Kg] に近い値のときこのジャンプが生じ、右半平面に  $G_2$  の極と零点が移動した。この極と零点の組みは互いに接近しているため、閉ループ系において不安定な極が生じることになる。このとき、他のパラメータである目標粘性や目標剛性を変化させても、右半平面の極と零点の組みの位置を左半平面に移動させることはできない。このように、目標インピーダンスのうち、目標慣性を実慣性に比べて極端に小さくしてある値以下にすると接触系の不安定化を招く。

以上より、加速度フィードバック法では、Hogan の方法に比べ、小さい粘性パラメータと実慣性より小さい慣性パラメータを含む目標インピーダンスを設定できる。ただし、目標インピーダンスの慣性パラメータを実慣性に比べて極端に小さくすると接触系の不安定化を招く。

### 3.3 モデル化誤差の安定性への影響

ここではモデル化誤差の安定性に対する影響を検討する。 Fig. 5 にそれぞれの制御法で、モデルの値  $M$  (ただし本論文では慣性のみをモデル化) が真値の50%の場合 (Fig. 5(a) (c)) と150%の場合 (Fig. 5(b) (d)) の根軌跡を示す。Hogan の方法では、モデル  $M$  が真値の50%のとき、環境の剛性が  $k_e=10000$  [N/m] 以下で制御系が安定であるのに対し (Fig. 5(a)), モデル  $M$  が真値の150%のとき、  $k_e=1000$  [N/m] 以下でも制御系が不安定になりうる (Fig. 5(b))。一方、加速度フィードバック法では、モデル  $M$  が真値の50%のとき、任意の環境の剛性に対して制御系は安定である (Fig. 5(c))。しかし、モデル  $M$  が真値の150%のとき (Fig. 5(d))、開ループの1組みの極と零点が右半平面に生じてしまい制御系は不安定となる。これは 3.2 で述べたように、モデル  $M$  が真値に比べて大きくなると、伝達関数  $G_2$  の分子の項  $(M_1 - M + Z_0)$  の  $s^2$  の係数が負になるためである。以上のシミュレーションの結果から、モデル  $M$  が真値に比べて小さい場合には接触系の安定性が増し、逆に大きい場合には安定性が減少する傾向のあることが分かる。

## 4. 考 察

これまでの解析をもとに次の4つの点について考察する。

1) Hogan の方法と加速度フィードバック法の2つの手法に共通して次のことが分かった。すなわち、1次振動モードを持

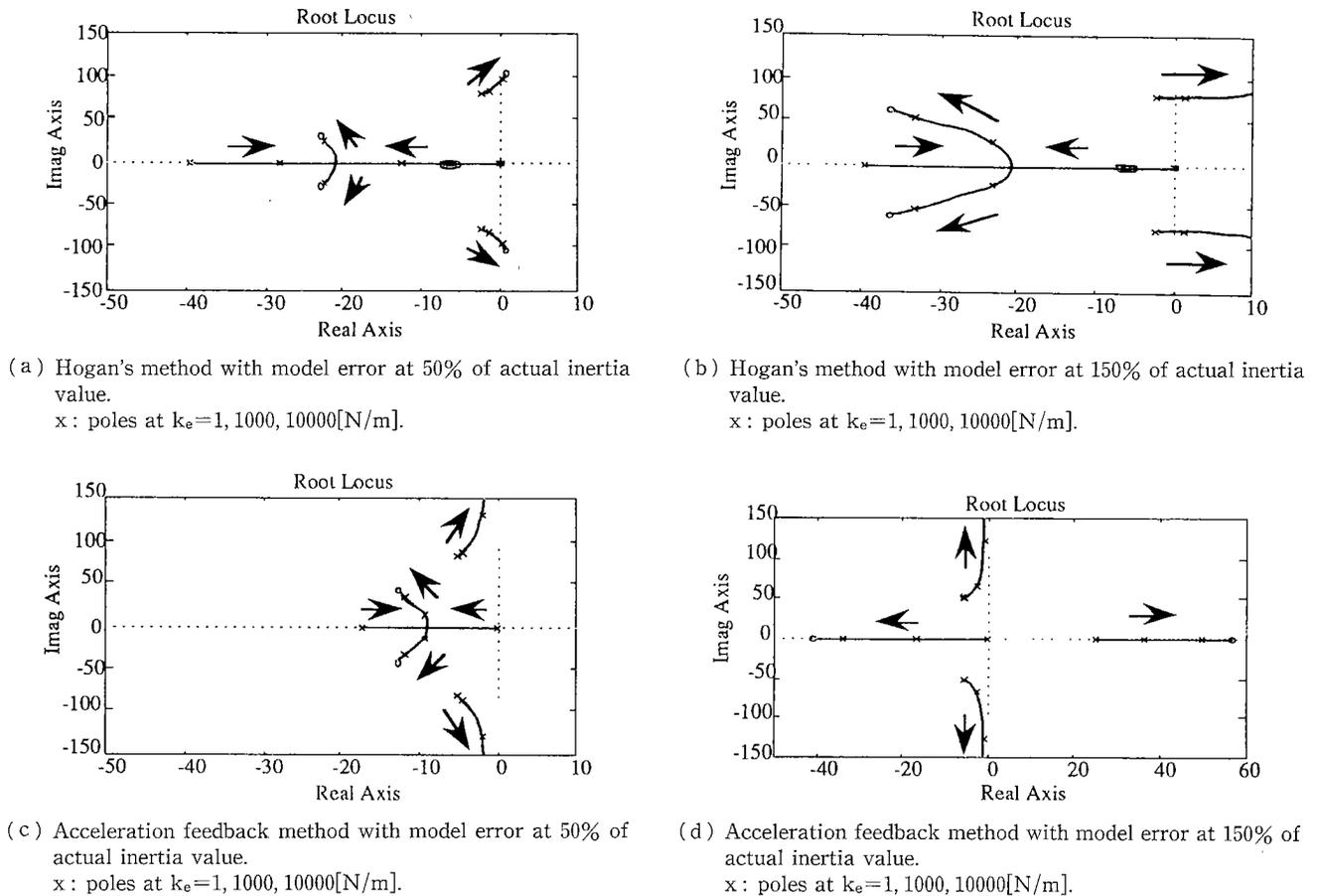


Fig. 5 Influence of model error to contact stability.

つアームにインピーダンス制御を適用した場合、センサとアクチュエータの collocation は接触安定性の必要十分な条件ではない。センサとアクチュエータの配置がどちらであっても、モデル化できない振動要素がアームに存在すると、接触が不安定になりうる。このとき目標インピーダンスとモデル誤差が接触安定性に影響する。これは、単純な力制御における接触安定性の議論とは異なる性質である。力制御では、一般に、センサとアクチュエータの collocation を実現すれば、モデル化できない振動要素がアームに存在しても接触の安定性を高くできるといわれている。しかし、インピーダンス制御においてはこの議論はあてはまらない。

2) 本報告では、アームと環境との接触が定常的な状態をモデル化してシミュレーションを行った。定常的な接触状態では、全体の動特性を線形化して考えることができ、取り扱いが比較的容易である。本報告では、アームが環境を把持した状態を接触系としてモデル化して解析した。この接触系は通常のフィードバック制御系とみなすことができる。すなわち、環境の剛性値をフィードバック制御系のループゲイン、アーム手先に実現した仮想アドミタンスをフィードバックゲインと考えた。これから、根軌跡や極零マップを用いて、環境の剛性値の変化にそった接触系の安定性を解析することができた。

一方、過渡的な接触状態では、アームが環境に接したり離れたため、全体の動特性が非線形で複雑な系となる。例え

ば、文献[10]ではアームのはねかえりを含む過渡的な振動の状態を考慮した安定条件を導いている。しかし、これはアームの制御系を位置と速度の線形フィードバックに限定しており、インピーダンスのような仮想的な動特性を実現する制御系に直接あてはめることができない。一方、インピーダンス制御におけるこのような接触安定性の解析は従来より少なく、特に加速度フィードバック法についての検討はこれまで全くなかった。

本報告では、インピーダンス制御における接触安定問題を解明する第一ステップとして、定常的な接触状態のみの解析を試みた。これは接触安定の必要条件を導いたことになる。したがって、本論文の解析で不安定となるような条件では、過渡的な接触の状態も含めて接触が不安定になる。しかし、これは接触の安定性の十分条件ではない。アームによる実際の接触作業を考えると、過渡的な接触状態における衝突時のアームの挙動も考慮した必要十分な安定条件を導くことが求められる[8][10]。そこで要因3)としてあげた衝突時の衝撃力及び衝突による非線形な振動を取り上げることが、今後の重要な課題となる。

3) モデル化誤差における応答と安定性との関係について考察する。解析したどちらの制御法においても、アーム動特性のモデルの値の誤差が大きくなると目標インピーダンス応答との誤差は大きくなる。しかし、モデルの値を真値に比べて小さくとれば、目標インピーダンス応答との誤差が大きくなるもの

の、接触安定性を向上させることができる。逆に、モデルの値を真値に近くとれば、目標インピーダンス応答は実現できるが接触安定性は低下する。このように、インピーダンス応答と接触安定性は二律背反である。ただし、モデルの値を真値に比べて大きくしたとき接触安定性について2つの手法では次のような違いがある。Hoganの方法では、モデルの値を真値に比べて大きくしていくと、開ループ $G_1$ の零点のみが右半平面に移動するため、環境の剛性が低いときは接触の安定が保たれる場合がある。環境の剛性が大きくなると閉ループ系の極が右半平面に存在することになり制御系が不安定になる。加速度フィードバック法では、モデルの値を真値に比べて大きくしていくと、開ループ $G_2$ の1組みの極と零点があるところから右半平面に移動するため、環境の剛性がいかなる値でも制御系が不安定になる。

4) そのほか考察していない接触の不安定化要因があるが、議論を簡単にするため本報告では取り上げていない。例えば、2.1で示した要因5)は、DDモータ以外の、トルク制御に非線形性のあるアクチュエータを用いたアームを想定する場合に必要である。同じく要因6)は、コントローラの制御遅れが無視できない場合に考慮すべきである。

## 5. ま と め

Hoganの方法と加速度フィードバック法の2つのインピーダンス制御法における接触安定性について、1次振動モードを有するアームを想定したシミュレーションによって定性的な評価を行った。この解析では、センサとアクチュエータの配置が collocation であっても、モデル化の難しい振動要素がアームに存在する場合、接触が不安定になりうるということが分かった。このとき、目標インピーダンスの設定値、及びモデル化誤差が接触安定性に影響することもわかった。さらに、2つの手法にそれぞれ固有の結果も得られた。以上のような解析結果をふまえ、今後、過渡的な接触の状態の解析や、種々の不安定化要因を考慮した制御系の改良を行っていく所存である。

## 謝 辞

本研究を進めるにあたり、貴重な助言を頂いた株式会社安川

電機つくば研究所の三浦博孝所長、二見茂氏、御厨美和氏、井上康之氏に感謝いたします。

## 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] 館, 神, 荒井他: カ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] S. D. Eppinger and W. P. Seering: On dynamic models of robot force control, Proc. IEEE Int. Conf. Rob. & Autom, pp. 29-34, 1986.
- [4] A. Sharon, N. Hogan and D. E. Hardt: High bandwidth force regulation and inertia reduction using a macro/micro manipulator system, Proc. IEEE Int. Conf. Rob. & Autom, pp. 126-132, 1988.
- [5] D. A. Lawrence: Impedance control stability properties in common implementations, Proc. IEEE Int. Conf. Rob. & Autom., pp. 185-190, 1988.
- [6] 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, vol. 9, no. 6, 1991.
- [7] C. H. An and 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.
- [8] R. Volpe and P. Khosla: Experimental verification of a strategy for impact control, Proc. IEEE Int. Conf. Rob. & Autom., pp. 1854-1860, 1991.
- [9] 梅野, 堀: 2自由度ロボ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.
- [10] 正司, 稲葉, 福田, 細貝: 衝突を含むロボットマニピュレータの安定制御(第1報, 1本の自由度マニピュレータの押付け制御の安定性), 日本機械学会論文集C編, vol. 56, no. 527, pp. 1847-1853, 1990.
- [11] 羅, 伊藤: コンプライアントマニピュレーションのためのロボットの制御設計, 計測自動制御学会論文集, vol. 26, no. 4, 427-434, 1990.
- [12] H. Kazerooni, P. K. Houpt and T. B. Sheridan: The fundamental concept of robust compliant motion for robot manipulators, Proc. IEEE Int. Conf. Rob. & Autom., pp. 418-427, 1986.
- [13] 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, 60-71, 1988.
- [14] 神, 館: インピーダンス制御の接触安定性の解析, 第10回日本ロボット学会学術講演会予稿集, pp. 627-628, 1992.



神 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。IEEE/IAS 1991 Annual Meeting 論文賞を受賞。  
(日本ロボット学会正会員)



館 暉 (Susumu Tachi)

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)