

# 冗長マニピュレータのインピーダンス制御： 冗長性を利用した関節インピーダンスの調節法

辻 敏 夫\*<sup>1</sup> アハマド ヤジディ\*<sup>2</sup>

## Impedance Control for Redundant Manipulators : An Approach to Joint Impedance Regulation Utilizing Kinematic Redundancy

Toshio TSUJI\*<sup>1</sup> and Achmad JAZIDIE\*<sup>2</sup>

The present paper argues that kinematic redundancy of manipulators should be positively utilized in terms of impedance control, and proposes a new impedance control method for redundant manipulators. The proposed method can control not only end-effector impedance using one of conventional impedance control methods but also joint impedance which has no effect to end-effector motion of the manipulator. Regulation of the joint impedance enables to specify dynamic behavior of joints for unknown external forces beforehand. By setting impedance of specific joints very large, for example, it becomes possible to suppress the motion of the corresponding joints and reduce joint degrees of freedom of the manipulator substantially.

In this paper, firstly, joint impedance controller is incorporated to the end-effector impedance control system, and a sufficient condition about joint impedance for satisfying a given end-effector impedance is derived. Then, the optimal joint impedance corresponding to a given desired joint impedance is analytically derived using the least square method. Finally, computer simulations are performed using a four-joint planar manipulator in order to confirm of the validity of the method.

**Key Words :** Impedance Control, Kinematic Redundancy, End-effector Impedance, Joint Impedance

### 1. ま え が き

インピーダンス制御とは、目的とする作業に応じてマニピュレータの手先に機械インピーダンスを設定し、位置と力の制御を統一的に取り扱う方法である。Hogan[1]は、手先の位置、速度、力を計測し、分解加速度制御[2]の考え方をを用いてマニピュレータの手先インピーダンスを望ましい値に設定する方法を示した。その後、ヤコビ行列の逆行列を用いない方式[3]や力センサを用いない方式[4]などの実現法、外乱やモデル化誤差の影響を考慮したロバスト化[5]~[8]、接触に伴う安定性の解析[9][10]など数多くの研究が行われており、環境との相互作用を制御するための重要な枠組みを与えている。

一方、目標とする作業に必要な自由度以上の関節自由度を有するマニピュレータを冗長マニピュレータと呼ぶ。マニピュレータの冗長性は、特異姿勢や障害物の回避などに見られるように作業の融通性、汎用性を高める効果を持っており、特に逆運動学問題に関してこの冗長性を利用する研究が活発に行われている[11]。本稿では、インピーダンス制御の枠組みでマニピュレータの冗長性を積極的に利用する方法を提案する。

現在まで、マニピュレータの冗長自由度を利用したインピーダンス制御に関する研究は少なく、わずかに Newman and Dohring[12]の Augmented Impedance Control, 彭と足立[13]による拡張インピーダンス制御が報告されているだけである。Augmented Impedance Control は冗長自由度の数だけ新しい作業変数を定義し、その作業変数に対するインピーダンスを手先インピーダンスと連立させることによって冗長性を利用しようというもので、任意の受動的な環境と接触した場合でもその安定性が保証されている。ただし、この方法では手先慣性の制御は行われておらず、実質的には能動剛性制御[14]となっている。一方、彭らは関節角度に関する微分可能な評価関数を導入し、この評価関数の最適化のための条件式をやはり手先インピーダンスと連立させることによって制御則を導いている。この方法では手先でインピーダンス制御を行いながら、冗長性を利用した姿勢制御が可能である。

これらの研究に対して、インピーダンス制御の静的な場合と考えられるコンプライアンス制御に関しては冗長自由度を利用したいくつかの方法が提案されている。例えば、金子、横井、谷江によるダイレクトコンプライアンス制御[15][16]は、関節コンプライアンス行列をマニピュレータの冗長性を利用して対角化する方法で、各関節のトルクサーボ系を1入力1出力系で実現でき、センサとアクチュエータの間の colocation[17]を常に保証することができる。このダイレクトコンプライアンス

原稿受付 1993年5月28日

\*1広島大学工学部

\*2広島大学大学院工学研究科

\*1Faculty of Engineering, Hiroshima University

\*2Graduate School of Engineering, Hiroshima University

制御をインピーダンス制御に拡張することを目的として、動的ダイレクトコンプライアンス制御[18]、独立関節インピーダンス制御[19]が提案されているが、いずれも手先加速度と関節加速度の関係に近似式を用いており、厳密な手先慣性の制御は難しい。また、辻、高橋、伊藤は手先のコンプライアンスを制御しながら関節のコンプライアンスを目標値に近付ける方法[20]、手先のコンプライアンスだけでなくマニピュレータ上の他の点に関するコンプライアンスも制御可能な多点コンプライアンス制御法[21][22]を提案している。なお、横井、前川、谷江によって提案された冗長アームのコンプライアンス制御法[23]は、文献[20]の方法において目標関節コンプライアンスを対角行列に設定した場合に相当する。

本稿では、文献[20]の問題設定に従って関節インピーダンスに対する目標値を想定し、手先のインピーダンスを制御しながら同時に関節インピーダンスを目標値に近付ける方法を提案する。たとえば、作業空間に存在する障害物やマニピュレータの機構的な制約のため特定の関節剛性の値をできるだけ大きくしたいとか、外力（マニピュレータの手先以外の部位にも加わるかもしれない）に対する関節の応答特性をあらかじめ規定しておきたい場合が考えられる。本稿で提案する方法は、手先インピーダンスを実現するための制御器に加えて、関節インピーダンスを直接調節する制御器を並列に制御系に組み込み、手先インピーダンスと関節インピーダンスを階層的に調節しようというもので、目標手先インピーダンスを満足する範囲内で最適な関節インピーダンスを実現することができる。以下、2.で冗長性を利用したインピーダンス制御系の構成を説明し、3.で最適な関節インピーダンスを計算する方法を示す。4.では計算機シミュレーションにより本手法の有効性を明らかにする。

## 2. 冗長インピーダンス制御系の構成

$m$ 関節マニピュレータの手先に外力  $-F_{ext} \in \mathbb{R}^l$  が加わった場合、マニピュレータの運動方程式は

$$M(\theta)\ddot{\theta} + h(\theta, \dot{\theta}) = \tau - J^T(\theta)F_{ext} \quad (1)$$

で与えられる。ただし、 $\theta \in \mathbb{R}^m$  は関節角度ベクトル、 $M(\theta) \in \mathbb{R}^{m \times m}$  は慣性行列、 $h(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^m$  は遠心力、コリオリ力、関節摩擦、重力などを表わす非線形項、 $\tau \in \mathbb{R}^m$  は関節駆動トルク、 $J(\theta) \in \mathbb{R}^{l \times m}$  はヤコビ行列（以下、 $J$ と略記）、 $l$  は作業空間の自由度である。いま、マニピュレータの手先の望ましいインピーダンスが

$$M_e d\ddot{X} + B_e d\dot{X} + K_e dX = -F_{ext} \quad (2)$$

と指定されたとする。ここで、 $M_e, B_e, K_e \in \mathbb{R}^{l \times l}$  はそれぞれ手先の目標慣性、目標粘性、目標剛性行列、 $dX = X - X_d \in \mathbb{R}^l$  は手先の現在位置  $X$  と仮想平衡位置  $X_d$  との偏差を表わす。

このとき、ヤコビ行列の逆行列を用いないインピーダンス制御則は以下のように与えられる[3]。

$$\tau = \tau_{effector} + \tau_{comp} \quad (3)$$

$$\tau_{effector} = J^T \{ V^{-1}(\theta) [ M_e^{-1} (-K_e dX - B_e d\dot{X}) + \ddot{X}_d - \dot{J}\dot{\theta} ] + [ I - V^{-1}(\theta) M_e^{-1} ] F_{ext} \} \quad (4)$$

$$\tau_{comp} = \tilde{h}(\theta, \dot{\theta}) \quad (5)$$

ただし、 $\tilde{h}(\theta, \dot{\theta}) = h(\theta, \dot{\theta})$  で、 $V(\theta) = JM^{-1}(\theta)J^T \in \mathbb{R}^{l \times l}$  はアームが特異姿勢にない限り正則、また外力  $-F_{ext}$  は計測可能と

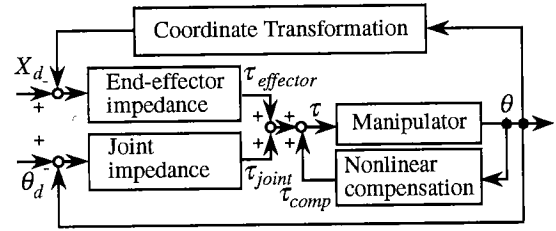


Fig.1 Block diagram of Hierarchical Impedance Control (HIC). The HIC can control joint impedance as well as end-effector impedance of the manipulator.

する。式(4)の  $\tau_{effector}$  はマニピュレータの手先のインピーダンスを調節するための関節トルク、式(5)の  $\tau_{comp}$  は運動方程式に含まれる非線形項を補償するための関節トルクである。

この制御則は冗長マニピュレータに対しても適用可能であるが、関節自由度の冗長性を積極的に利用することはできない。分解加速度制御を用いた方式[1]や力センサを用いない方式[4]も同様である。そこで、本論文ではアームの冗長自由度を関節トルクのレベルで利用するアプローチを採用し、関節インピーダンスを調節するための制御則を式(3)の手先インピーダンス制御則に並列に組み込むことを考える。すなわち、

$$\tau = \tau_{joint} + \tau_{effector} + \tau_{comp} \quad (6)$$

$$\tau_{joint} = -M_j d\ddot{\theta} - B_j d\dot{\theta} - K_j d\theta \quad (7)$$

である。ここで、 $M_j, B_j, K_j \in \mathbb{R}^{m \times m}$  はそれぞれ関節の慣性、粘性、剛性行列、 $d\theta = \theta - \theta_d \in \mathbb{R}^m$  は関節の現在角度  $\theta$  と仮想平衡角度  $\theta_d$  との偏差を表わす。(7)式の  $\tau_{joint}$  はマニピュレータの関節インピーダンスを直接調節するための関節トルクである。このとき、 $\tau_{joint}$  を

$$\bar{J}^T \tau_{joint} = 0 \quad (8)$$

が常に成立するように選ぶと、 $\tau_{joint}$  はマニピュレータの手先の運動に関与せず、手先に実現されるインピーダンスは(2)式に一致することがわかる。ここで、 $\bar{J} \equiv M^{-1}(\theta)J^T V^{-1}(\theta)$  である。式(8)は、力に関する零空間[24]を利用して、関節インピーダンスを調節するためのトルクを決定することを意味している。このとき、手先インピーダンス制御を行ないながら、関節インピーダンスを  $\tau_{joint}$  によって調節することが可能となる。

以上の制御系の構成を Fig. 1 に示す。本稿で提案するインピーダンス制御系では手先インピーダンスを調節するための位置/力フィードバックループに加えて、関節インピーダンスを制御するための関節フィードバックループを並列に組み込んだ構成となっている。なお、本稿では手先インピーダンス制御則としてヤコビ行列の逆行列を用いない方式[3]を取り上げたが、本方式は分解加速度制御を用いた方式[1]や力センサを用いない方式[4]にも適用できる。また、外乱やモデル化誤差の影響を考慮した方式[5]–[8]も同様である。次章では、式(8)の条件を満足する関節インピーダンス行列を導出する。

## 3. 関節インピーダンスの調節法

### 3.1 関節インピーダンス行列の導出

式(8)を満足するための十分条件は、式(7)から明らかなよう

に

$$\bar{J}^T M_j = 0 \quad (9)$$

$$\bar{J}^T B_j = 0 \quad (10)$$

$$\bar{J}^T K_j = 0 \quad (11)$$

が同時に満足されることである。ここでは式(9)を用いて関節慣性行列  $M_j$  の計算法を説明する。

まず式(9)のマトリクス方程式の一般解は

$$M_j = (I - \bar{J}\bar{J}^+) Z_1 \quad (12)$$

で与えられる[20]。ただし、 $(\cdot)^+$  は擬似逆行列で、 $Z_1$  は任意の行列である。式(12)で与えられる  $M_j$  は常に式(9)を満足する。問題は式(12)に含まれる任意行列  $Z_1$  を目的に応じて設定する方法である。本稿では、関節インピーダンスに対する目標値を想定し、式(9)、(10)、(11)を満足する範囲内で関節インピーダンスを目標値に近付けることを考える。

いま、準正定な目標関節慣性行列  $M_j^* \in \mathbb{R}^{m \times m}$  が与えられたとする。このとき、式(12)において評価関数  $G(M_j)$ ,

$$G(M_j) = \|W(M_j^* - M_j)\| \quad (13)$$

を最小にするように行列  $Z_1$  を定めることにする。ここで、 $W \in \mathbb{R}^{m \times m}$  は正定で対角な重み行列で、 $W$  の各対角要素は  $M_j^*$  の各行に対する優先度を表す。ただし、本稿では式(8)で与えられる手先力と関節トルクの関係式に基づいて冗長自由度を利用しているため、各関節トルクに対応する形でしか優先度を指定できないことに注意されたい。またマトリクスノルムとしては

$$\|A\| = [\text{tr}(A^T A)]^{1/2} = \left[ \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m a_{ij}^2 \right]^{1/2} \quad (14)$$

を用いる。ただし、 $A = [a_{ij}] \in \mathbb{R}^{m \times m}$  で、 $\text{tr}[\cdot]$  は行列のトレースである。

この問題は最小2乗法により解くことができ、最適解は

$$M_j = \Gamma M_j^* \quad (15)$$

$$\Gamma = I - \{\bar{J}(W^{-1}\bar{J})^+ W^{-1}\}^T \quad (16)$$

で与えられる(付録参照)。 $I$  は単位行列を表わす。特に、 $W = I$  の場合は、

$$M_j = (I - \bar{J}\bar{J}^+) M_j^* \quad (17)$$

となる。

以上の議論は、関節粘性行列  $B_j$ 、関節剛性行列  $K_j$  に対しても全く同様に成り立つ。慣性行列、粘性行列、剛性行列の計算と同じ重み行列  $W$  を用いると、

$$B_j = \Gamma B_j^* \quad (18)$$

$$K_j = \Gamma K_j^* \quad (19)$$

となる。 $B_j^*, K_j^* \in \mathbb{R}^{m \times m}$  はそれぞれ目標関節粘性行列、目標関節剛性行列である。このようにして、手先インピーダンス制御を実行しながら(すなわち式(8)を満足する範囲内で)、冗長自由度を利用して関節インピーダンスを調節することが可能となる。

### 3.2 準正定な関節インピーダンス

冗長マニピュレータではたとえ手先インピーダンスの安定性が保証されたとしても、関節運動が必ずしも安定であるとは限らない。ここでは前節の関節インピーダンスの計算法に、マニピュレータの関節運動の安定性を考慮することを考えよう。

関節運動を安定に保つためには、式(7)から明らかなように

関節慣性行列  $M_j$ 、関節粘性行列  $B_j$ 、関節剛性行列  $K_j$  をすべて準正定行列となるよう選ばばよい(十分条件)。一般に行列  $M_j \in \mathbb{R}^{m \times m}$  が準正定であるための必要十分条件は

$$M_j = M_j^{1/2} M_j^{T/2} \quad (20)$$

を満たす行列  $M_j^{1/2} \in \mathbb{R}^{m \times m}$  が存在することである[25]。ただし、 $M_j^{T/2} = (M_j^{1/2})^T$  を表わす。上式を式(8)に代入すると

$$\bar{J}^T M_j^{1/2} M_j^{T/2} = 0 \quad (21)$$

となる。一般に、 $M_j^{1/2} \neq 0$  であるから、上式が成り立つためには

$$\bar{J}^T M_j^{1/2} = 0 \quad (22)$$

が成立せねばならない。

目標関節慣性行列  $M_j^*$  は準正定で与えられるので、常に  $M_j^* = M_j^{*1/2} (M_j^{*1/2})^T$  なるマトリクス  $M_j^{*1/2} \in \mathbb{R}^{m \times m}$  が存在する。したがって前節において  $M_j^*$  を  $M_j^{*1/2}$  に、 $M_j$  を  $M_j^{1/2}$  に読みかえれば、マトリクス方程式式(22)の解のうち最も目標値  $M_j^{*1/2}$  に近い解を求めることができる。

$$M_j^{1/2} = \Gamma M_j^{*1/2} \quad (23)$$

上式を式(20)に代入すると

$$M_j = \Gamma M_j^* \Gamma^T \quad (24)$$

となる。このとき、関節粘性行列  $B_j$ 、関節剛性行列  $K_j$  は前節と同様に

$$B_j = \Gamma B_j^* \Gamma^T \quad (25)$$

$$K_j = \Gamma K_j^* \Gamma^T \quad (26)$$

と計算できる。このようにして、関節運動の安定性を保証することが可能となる。

以上のようにして、与えられた目標関節インピーダンスに最も近いという評価を用いて、マニピュレータの手先の運動に関与しない関節インピーダンス行列を求めることができた。次章では計算機シミュレーションにより本手法の有効性を示す。

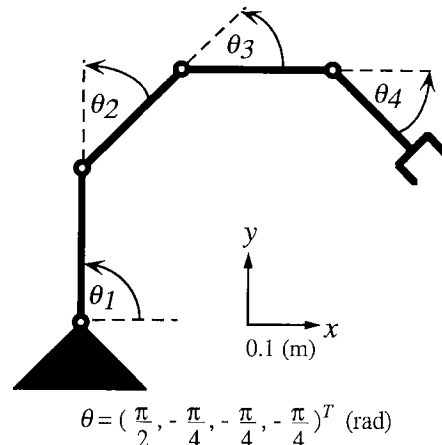


Fig.2 A four-joint planar manipulator used in computer simulations.

#### 4. 関節インピーダンス行列の計算例と外力に対する応答特性

まず, Fig. 2 に示す平面 4 関節マニピュレータ (作業空間の自由度は手先の位置のみとする:  $l=2$ ) を用いて, 関節剛性行列  $K_j$  を計算した. マニピュレータのリンクパラメータを Table 1 に, 計算結果を Table 2 に示す. Table 2 は Fig. 2 の姿勢において, 手先ステイフネス行列  $K_e$  を  $K_e = \text{diag.}(100, 100)$  [N/m] (diag.[ $\cdot$ ]は対角行列を表わす) とした場合で, a. では(19)式, b.では(26)式を用いている. 表中の  $G(K_j)$  は,

$$G(K_j) = [\text{tr} \{ (K_j^* - K_j)^T (K_j^* - K_j) \}]^{\frac{1}{2}} \quad (27)$$

で, 目標関節剛性行列  $K_j^*$  と計算された関節剛性行列  $K_j$  との差を表している.

Table 2 から, 計算された関節剛性行列が目標関節剛性行列を反映していること, 重み行列  $W$  の要素を大きくすることにより  $K_j$  の対応する行が  $K_j^*$  に近づき  $W$  が有効に働いていることがわかる. また, Table 2 の a.では計算された関節剛性行列  $K_j$  は対称行列にはならないが, b.では, 目標関節剛性行列との差を示す  $G(K_j)$  は a.に比べて増加するものの, 関節剛性行列  $K_j$  は常に準正定行列となり関節運動の安定性が保証され

ている.

つぎに Fig. 2 の姿勢で静止しているマニピュレータの手先に外力を加え, アームの応答特性を調べた. Fig. 3, 4 は外力  $-F_{ext} = (-20, 20)^T$  [N] に対するアームの応答で, Fig. 3 では従来のインピーダンス制御 (式(3)(4)(5)), Fig. 4 では冗長性を利用したインピーダンス制御 (式(4)-(7), (15), (18), (19)) を用いている. いずれも手先インピーダンスは,  $M_e = \text{diag.}(1, 1)$  [Kg],  $B_e = \text{diag.}(20, 20)$  [N/(m/s)],  $K_e = \text{diag.}(100, 100)$  [N/m] で, Fig. 4 では目標関節インピーダンスを  $M_j^* = \text{diag.}(0.1, 0.01, 0.1, 0.01)$  [Kgm<sup>2</sup>],  $B_j^* = \text{diag.}(20, 2, 20, 2)$  [Nm/(rad/s)],  $K_j^* = \text{diag.}(1000, 100, 1000, 100)$  [N/rad], 重み行列を  $W = \text{diag.}(50, 1, 50, 1)$  とした. 手先インピーダンスの各自由度, 目標関節インピーダンスの各関節自由度とも, 減衰係数は 1 となる. なお, 仮想平衡位置  $X_d$ , 仮想平衡角度  $\theta_d$  はいずれも Fig. 2 に示す初期値とし, アームの動力学計算にはアッペル法を用いた[26].

アームの手先の運動は Fig. 3, 4 で完全に一致しており, 設定した手先インピーダンスが実現されていることがわかるが, Fig. 3 ではアームの姿勢が大きく変化している. 特に, 本稿では式(5)のように関節空間で非線形形の補償を行っているため, 関節の粘性摩擦は存在しない. このため手先の運動が終了しても関節の運動が残っていることを示している. これに対して, Fig. 4 の冗長性を利用したインピーダンス制御では, 高い剛性特性を指定された第 1, 第 3 関節はほとんど動かず, 第 2, 第 4 関節で手先の運動を実現している. また, 第 2, 第 4 関節の運動も指定された目標関節インピーダンスの特徴をよく反映している. このように, 冗長性を利用することにより, 外力に対するアームの応答特性を目標インピーダンスと重み行列を用いて調節できることがわかる.

Table 1 Link parameters of the four-joint planar manipulator.

	link $i$ ( $i=1, 2, 3, 4$ )
length [m]	0.2
mass [kg]	1.57
center of mass [m]	0.1
moment of inertia [kgm <sup>2</sup> ]	0.8

Table 2 Computed results of joint stiffness matrices under the hierarchical impedance control. The end-effector stiffness matrix  $K_e$  is given as  $K_e = \text{diag.}(100, 100)$  [N/m].

Type	Desired joint stiffness matrix, $K_j^*$ [Nm/rad]	Weighting matrix, $W$	Computed joint stiffness matrix, $K_j$ [Nm/rad]
a. Hierarchical impedance control, eq. (19)	$\begin{bmatrix} 10.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 100.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 100.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 10.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 5.8 & 3.2 & 27.1 & 4.1 \\ 0.3 & 26.9 & -36.4 & 2.5 \\ 2.7 & -36.4 & 66.4 & -1.3 \\ 4.1 & 25.1 & -13.2 & 4.9 \end{bmatrix}$ $G(K_j) = 103.8$ [(Nm/rad)]
	$\begin{bmatrix} 10.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 100.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 100.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 10.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 10.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 10.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.9 & 218.5 & 158.6 & 0.8 \\ 0.2 & 88.6 & -6.7 & 0.2 \\ 0.2 & -6.7 & 95.9 & 0.1 \\ 0.8 & 220.5 & 99.2 & 0.7 \end{bmatrix}$ $G(K_j) = 363.0$ [(Nm/rad)]
b. Hierarchical impedance control with positive semi-definite joint impedance, eq. (26)	$\begin{bmatrix} 10.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 100.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 100.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 10.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 1.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 1.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 12.5 & -7.8 & 17.8 & 1.6 \\ -7.8 & 21.1 & -34.2 & 12.9 \\ 17.8 & -34.2 & 58.2 & -17.4 \\ 1.6 & 12.9 & -17.4 & 12.1 \end{bmatrix}$ $G(K_j) = 109.6$ [(Nm/rad)]
	$\begin{bmatrix} 10.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 100.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 100.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 10.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 10.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 10.0 & 0.0 \\ 0.0 & 0.0 & 0.0 & 1.0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 729.1 & 183.1 & 137.4 & 639.3 \\ 183.1 & 78.9 & -12.3 & 188.8 \\ 137.4 & -12.3 & 92.4 & 80.4 \\ 639.3 & 188.8 & 80.4 & 584.9 \end{bmatrix}$ $G(K_j) = 1361.9$ [(Nm/rad)]

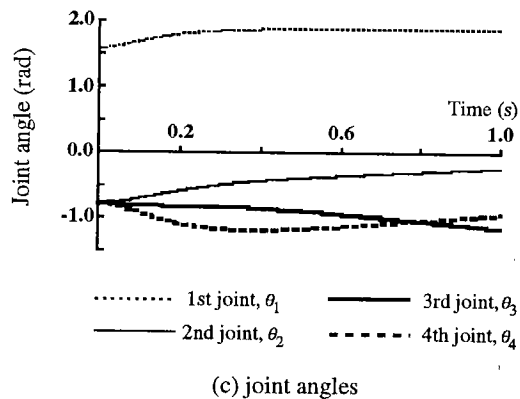
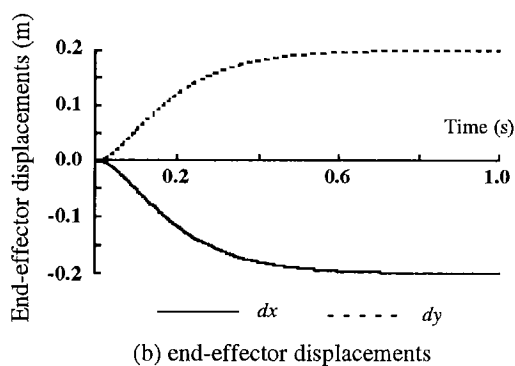
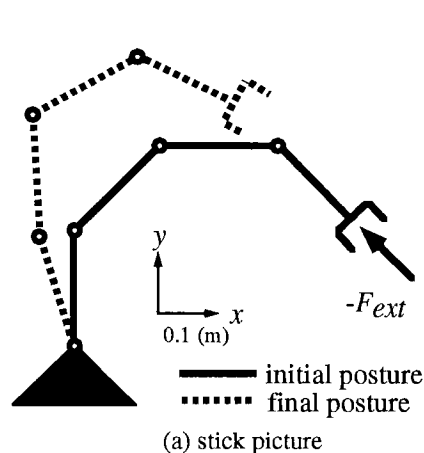


Fig.3 Motion profile of the four-joint manipulator for external force under the conventional impedance control.

## 5. まとめ

本論文では、関節自由度の冗長性を積極的に利用した冗長インピーダンス制御法を提案した。この方法は、手先インピーダンスを実現するための制御器に加えて、関節インピーダンスを直接調節する制御器を並列に制御系に組み込み、手先インピーダンスに影響を与えない範囲で関節インピーダンスを調節しようというもので、与えられる目標関節インピーダンスに応じて最適な関節インピーダンスを実現することができる。目標関節インピーダンスを考えることにより、外力に対するアームの応答特性をあらかじめ調節することができ、特定の関節の動きを

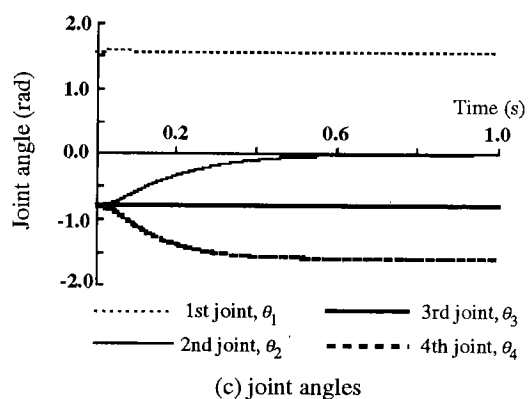
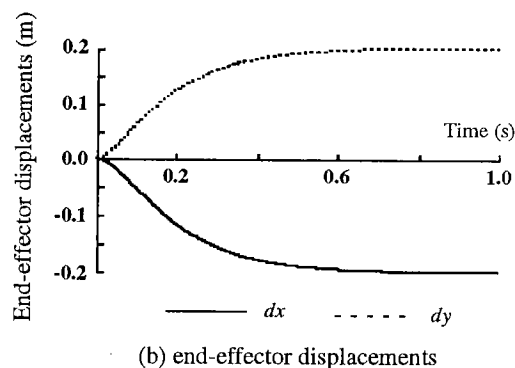
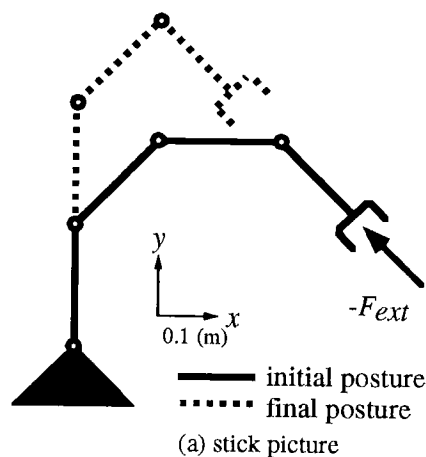


Fig.4 Motion profile of the four-joint manipulator for external force under the hierarchical impedance control.

非常に重くしてマニピュレータの姿勢変化を調節したり、見かけの自由度を減らしたい場合などに有効である。なお、本手法で実現される関節インピーダンスは、一般にその目標値には一致しないため、目標関節インピーダンスと重み行列の設定に注意を要する場合がある。これらの行列を作業目的、環境に応じてどのように設定するかについては、今後、詳しく検討する必要があると考えている。

本稿で提案したインピーダンス制御則は、手先インピーダンスを制御するための関節トルク  $\tau_{effector}$  (式(4)), 関節インピーダンスを調節するための関節トルク  $\tau_{joint}$  (式(7)), マニピュレータの運動方程式にあらわれる非線形項を補償するための

トルク  $\tau_{comp}$  ((5)式) の3種類の制御トルクの計算からなる。今後はこの3種類の計算を並列演算器を用いて効率良く実現する方法を検討するとともに、関節インピーダンス特性のより簡便な記述法、関節インピーダンス調節以外の冗長自由度の利用法、クランク回転作業などの実作業への適用などについて考察する予定である。最後に日頃からご指導いただき豊橋技術科学大学伊藤宏司教授、広島大学工学部金子真教授に謝意を表します。

### 参考文献

- [1] N. Hogan, "Impedance Control; An Approach to Manipulation, Parts I, II, III," ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 107, 1, pp.1-24, 1985.
- [2] J. Y. S. Luh, M. W. Walker and R. P. Paul, "Resolved Acceleration Control of Mechanical Manipulators," IEEE Trans. Automatic Control, AC-25, pp.468-574, 1980.
- [3] N. Hogan, "Stable Execution of contact tasks using impedance control," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp.1047-1054, 1987.
- [4] 館, 榎, 荒井, 西澤, ボロ, "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, 7, 3, pp.172-183, 1989.
- [5] H. Kazerooni, T.B. Shridan and P.K. Houpt, "Robust Compliance Motion for Manipulators, Part I; The Fundamental Concepts of Compliant Motion," IEEE J. Robotics and Automation, RA-2-2, pp. 83-92, 1986.
- [6] H.Kazerooni, P.K. Houpt and T.B. Shridan, "Robust Compliance Motion for Manipulators, Part II; Design Method," IEEE, J. Robotics and Automation, RA-2-2, pp. 93-105, 1986.
- [7] W. S. Lu and Q. H. Meng, "Impedance Control with Adaptation for Robotic Manipulation," IEEE Trans. on Robotics and Automation, 7, 3, pp. 408-415, 1991.
- [8] 西田, 原田, 今村, 木邑, "マニピュレータのロバスタインピーダンス制御", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, B, pp. 1-4, 1991.
- [9] E. Colgate and N. Hogan, "An Analysis of Contact Instability in terms of Passive Physical Equivalents," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 404-409, 1989.
- [10] 羅, 伊藤(正美), "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, 26-4, pp. 61-68, 1990.
- [11] C.A. Klein and C. Huang, "Review of Pseudoinverse Control for Use with Kinematically Redundant Manipulators," IEEE Trans. System, Man and Cybernetics, SMC-13, pp. 245-250, 1983.
- [12] W.S. Newman and M.E. Dohring, "Augmented Impedance Control: An Approach to Compliant Control of Kinematically Redundant Manipulators," Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 30-35, 1991.
- [13] 彭, 足立, "冗長マニピュレータのインピーダンス制御", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, B, pp. 5-8, 1991.
- [14] J. K. Salisbury, "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates," Proc. IEEE Conference on Decision and Control, pp. 95-100, 1980.
- [15] 金子, 横井, 谷江, "シリアルアームのダイレクトコンプライアンス制御", 日本機械学会論文集 (C編), 54, 503, pp. 1510-1514, 1988.
- [16] 横井, 金子, 谷江, "パラレルアームのダイレクトコンプライアンス制御", 日本機械学会論文集 (C編), 54, 505, pp. 2131-2139, 1988.
- [17] S.D. Eppinger and W.P. Seering, "Understanding Bandwidth Limitations in Robot Force Control", IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 904-909, 1987.
- [18] 横井, 金子, 谷江, "2自由度パラレルリンクアームのダイレクトコンプライアンス制御 (第4報: 動的効果を考慮した制御則の検討)", 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, B, pp. 7-8, 1990.
- [19] 寺西, 吉川, "ロボットアームの独立関節インピーダンス制御", 日本機

械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会講演論文集, B, pp. 9-12, 1991.

- [20] 辻, 高橋, 伊藤(宏), "冗長性を利用したマニピュレータの関節コンプライアンス調節", 計測自動制御学会論文集, 26, 5, pp. 557-563, 1990.
- [21] 辻, 高橋, 伊藤(宏), "冗長マニピュレータの多点コンプライアンス制御", 計測自動制御学会論文集, 26, 12, pp. 1406-1413, 1990.
- [22] 辻, 高橋, 伊藤(宏), "手先拘束を考慮したマニピュレータの多点コンプライアンス制御", 計測自動制御学会論文集, 27, 1, pp. 85-92, 1991.
- [23] 横井, 前川, 谷江, "冗長ロボットアームのためのコンプライアンス制御の一手法", 日本ロボット学会誌, 11, 1, pp. 121-130, 1993.
- [24] O. Khatib, "Motion/Force Redundancy of Manipulators," Proc. 1990 Japan-U.S.A. Symposium on Flexible Automation, 1, pp. 337-342, 1990.
- [25] 児玉, 須田, "システム制御のためのマトリクス理論", 計測自動制御学会, 1974.
- [26] 増田, 二川, 有本, 宮崎, "アッペル法による閉ループ力学系の運動解析", 日本ロボット学会誌, 4, 1, pp. 9-15, 1986.

### 付録 関節インピーダンス行列の最小2乗解

まず,  $W=I$  の場合について考えよう。このとき, 式(13)の評価関数は

$$G(M_j) = \|M_j^* - M_j\| \quad (A.1)$$

となる。式(12)を上式に代入すると,

$$G(Z_1) = [\text{tr} \{ (M_j^* - (I - \bar{J}\bar{J}^+)Z_1)^T (M_j^* - (I - \bar{J}\bar{J}^+)Z_1) \}]^{1/2} \quad (A.2)$$

となる。問題は  $G(Z_1)$  を最小にする行列  $Z_1$  を求めることである。最適解に関する必要条件は,

$$\partial G(Z_1) / \partial Z_1 = 0 \quad (A.3)$$

が成立することであるから, (A.2)を(A.3)に代入して, 展開すると,

$$(I - \bar{J}\bar{J}^+)Z_1 = (I - \bar{J}\bar{J}^+)M_j^* \quad (A.4)$$

を得る。ただし, トレースの微分公式<sup>23)</sup>

$$\partial \text{tr}[AZ_1B] / \partial Z_1 = A^T B^T \quad (A.5)$$

$$\partial \text{tr}[AZ_1^T BZC] / \partial Z_1 = BZ_1CA + B^T Z_1^T C^T \quad (A.6)$$

および, 擬似逆行列  $A^+$  に関する性質,  $(A^+ A)^T (A^+ A) = (A^+ A)^T = A^+ A$  を用いた。  $A, B, C$  はそれぞれ適切なサイズの行列である。

(A.4)を式(12)に代入すると

$$M_j = (I - \bar{J}\bar{J}^+)M_j^* \quad (A.7)$$

を得る。上式は式(9)の連立方程式の(A.1)式の評価関数に関する最小2乗解を与える。

次に重み行列が一般に  $W$  で与えられる場合を考えよう。まず式(9)を

$$\bar{J}^T W^{-1} W M_j = (W^{-1} \bar{J})^T W M_j = 0 \quad (A.8)$$

と変形し,  $W M_j$  に関して一般解を求めると

$$W M_j = [I - (W^{-1} \bar{J})(W^{-1} \bar{J})^+] Z_2 \quad (A.9)$$

となる。  $Z_2 \in R^{m \times m}$  は任意の行列である。上式を評価関数  $G(M_j)$  (式(13))に代入し, 行列  $Z_2$  に関して最小化すると(A.4)式と同様に

$$[I - (W^{-1} \bar{J})(W^{-1} \bar{J})^+] Z_2 = [I - (W^{-1} \bar{J})(W^{-1} \bar{J})^+] W M_j^* \quad (A.10)$$

を得る。(A.10)を(A.9)に代入し整理すると

$$\begin{aligned} M_j &= W^{-1} [I - (W^{-1} \bar{J})(W^{-1} \bar{J})^+] W M_j^* \\ &= [I - [\bar{J}(W^{-1} \bar{J})^+ W^{-1}]^T] M_j^* = \Gamma M_j^* \end{aligned} \quad (A.11)$$

となる。上式の  $M_j$  は評価関数  $G(M_j)$  (式(13))を最小化することになる。



辻 敏夫 (Toshio TSUJI)

1959年12月25日生。1985年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年同大学工学部助手，1994年同助教授，現在に至る。人間とロボットの運動制御，ニューラルネット，マン・マシンシステムなどの研究に従事。計測自動制御学会，日本機械学会，電気学会，電子情報通信学会などの

会員。

(日本ロボット学会正会員)



アハマド ヤジディ (Achmad JAZIDIE)

1959年2月19日生。1984年インドネシア，スラバヤ工業大学電気工学科卒業。1992年広島大学大学院工学研究科情報工学専攻修了。現在同大学大学院工学研究科博士課程後期システム工学専攻在学中，日立国際奨学財団奨学生。多関節，冗長マニピュレータの制御に関する研究に従事。