

冗長性を有する上肢多自由度運動における インピーダンス変換法

正員 辻 敏 夫
准員 池 本 貴 志
正員 伊 藤 宏 司
非会員 長 町 三 生

電気学会論文誌C
(電子・情報・システム部門誌)
昭和63年7月号抜刷

Trans. IEE of Japan, Vol. 108-C, No. 7, July, 1988

冗長性を有する上肢多自由度運動における インピーダンス変換法

正員 辻 敏 夫 (広島大)
 准員 池 本 貴 志 (広島大)
 正員 伊 藤 宏 司 (広島大)
 非会員 長 町 三 生 (広島大)

1. ま え が き

運動インピーダンス (motor impedance) は運動変数 (変位, 速度, 加速度) と力変数 (力, トルク) との関係を表すもので, 運動に関する機械インピーダンス (スティフネス, 粘性, 慣性) を意味する。

運動, 姿勢の制御において, この運動インピーダンスを効果的に調節する方法を見出すことは, 生体上肢の制御メカニズムの解明やロボット・アームの制御則の開発を行う際の最も基本的な課題のひとつである。例えば, ベグの挿入, クランク回しなどの作業においては, スティフネス (あるいはコンプライアンス) を手先の座標系に関して調節することが望ましい⁽¹⁾。すなわち, 作業に応じて位置を制御する方向と力を制御する方向に適切なスティフネスを設定することにより, 位置と力の制御を統一的に取り扱うことができる。

ロボット・マニピュレータの手先コンプライアンスの制御には, 位置や力などのフィードバックとフィードフォワードを併用したソフトウェア・サーボによる方法⁽²⁾⁻⁽⁴⁾や関節の剛性を変化させることによる調節方法⁽⁵⁾⁽⁶⁾などが提案されている。しかしながら, 生体に匹敵するような優れたインピーダンス調節法はまだ

実現されておらず, 理論的体系化, 設計法の確立が望まれている。

生体の運動制御系には, 筋の可変粘弾性や自己受容器の感度調節に見られるように, 筋レベルの運動インピーダンス調節機構が備わっている⁽⁷⁾。しかしながら, 生体の目的は筋レベルの運動ではなく, 作業空間に関する運動である。従って, 手先の運動インピーダンス調節は, 筋骨格系の力学構造を介して手先へ伝達される筋のインピーダンスによって行わなければならない。すなわち, 生体の手先インピーダンスの優れた操作性は, 筋レベルの運動インピーダンス調節機構だけでなく, それを効果的に手先へ伝達する筋骨格系の力学構造 (例えば, 筋や関節自由度の冗長性, 腱や関節の機構) により実現されている。

Hogan⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾は, 作業空間 (手先) における運動インピーダンスを等ポテンシャル楕円体, モビリティ楕円体を用いて解析した。そして, 二関節筋や関節自由度の冗長性およびリンクの姿勢が手先インピーダンスの調節に重要な役割を果たしていることを示した。Mussa Ivaldi ら⁽¹¹⁾は, 手先に与えられた変位とそれによって生じる手先の反力との関係, すなわち手先スティフネスの上肢姿勢による変化を実験的に求め, 解析している。

本論文では, 多関節アームの力学的解析を通じて, 対象とする作業内容に応じた手先インピーダンスを実現するのに必要な関節・筋インピーダンスを求める問題を考察する。生体の運動インピーダンス調節が筋レベルで行われるという事実は, 上位中枢において, このようなインピーダンス変換が行われていることを示唆している。そして, 筋骨格系の力学構造, 特に冗長

Impedance Transformations in Multi-Joint Arm Movements with Redundant Degrees of Freedom. By Toshio Tsuji, Member, Takashi Ikemoto, Associate, Koji Ito, Member & Mitsuo Nagamachi, Non-member (Faculty of Engineering, Hiroshima University)

辻 敏夫: 正員, 広島大学工学部第2類 (電気系)

池本貴志: 准員, 広島大学工学部第2類 (電気系)

伊藤宏司: 正員, 広島大学工学部第2類 (電気系)

長町三生: 非会員, 広島大学工学部第2類 (電気系)

関節自由度が生体のインピーダンス調節に重要な役割を果たしていることを明らかにする。本論文の結果は、生体上肢のインピーダンス調節機構の演繹的な解析であるとともに、ロボット・アームの手先インピーダンス調節法を開発する際に応用することができる。以下、第2章では、作業、関節、筋の各空間のインピーダンスの関係を導出し、第3章では、作業空間インピーダンスを関節・筋インピーダンスに変換する方式を提案する。そして、第4章では、3関節アームの平面運動の解析から、関節自由度の冗長性をうまく利用することにより関節インピーダンスの選択の幅が広がること、作業空間（手先）で設定した粘性特性を関節レベルの粘性特性に変換することにより、関節運動の安定性が維持できることを示す。

2. 運動インピーダンスの記述

いま、アームの自由度を m とし、関節変位を表すベクトルを $\theta=(\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_m)^T$ 、関節トルクまたは力を表すベクトルを $\tau=(\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_m)^T$ とする。一方、対象とする作業が l 自由度で表されるものとし、作業ベクトル空間（略して作業空間）における位置・姿勢のベクトルを $X=(X_1, X_2, \dots, X_l)^T$ 、力・モーメントのベクトルを $F=(F_1, F_2, \dots, F_l)^T$ とする（図1参照）。アームの自由度に冗長性がある場合は、 $l < m$ となる。 θ から X への変換は一般に非線形で、

$$X=r(\theta) \dots\dots\dots(1)$$

で与えられる。姿勢 θ まわりの微小変位を考えると、

$$dX=J(\theta)d\theta \dots\dots\dots(2)$$

となる。 $J(\theta)=\partial r/\partial \theta \in R^{l \times m}$ はヤコビ行列と呼ばれる（以下、 J と略記）。また F から τ への変換は、(2)式と双対の関係にあり、

$$\tau=J^T F \dots\dots\dots(3)$$

で与えられる⁽¹²⁾。このように、作業空間の運動記述と関節角度ベクトル空間（略して関節空間）の運動記述は、ヤコビ行列 $J(\theta)$ を用いて結びつけることができる。

一方、関節の運動はリンク系に付着した n 本の筋 ($2m \leq n$) によって引き起こされる。筋長を表すベクトル

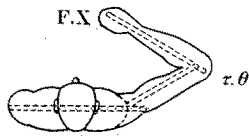


図1 上肢モデル

Fig. 1. The upper limb model.

ルを $L=(L_1, L_2, \dots, L_n)^T$ とし（伸張方向を正とする）、筋力を表すベクトルを $f=(f_1, f_2, \dots, f_n)^T$ （短縮方向の力を正とする）とすると、筋長 L はリンクの姿勢 θ によって一意に決まるから、

$$L=q(\theta) \dots\dots\dots(4)$$

となる。(2)式と同様に関節角度ベクトル θ まわりの微小変位を考えると、

$$dL=G(\theta)d\theta \dots\dots\dots(5)$$

となる。 $G(\theta)=\partial q/\partial \theta \in R^{n \times m}$ は、関節ベクトル $d\theta$ から筋長ベクトル dL への変換行列である⁽¹³⁾（以下、 G と略記）。筋力 f によって生じる関節トルク τ は、(3)式と同様に、

$$\tau=-G^T f \dots\dots\dots(6)$$

で与えられる。従って、関節空間の運動記述と筋長ベクトル空間（略して筋空間）の運動記述との間の関係は、変換行列 $G(\theta)$ により(5)、(6)式のように表すことができる。

運動インピーダンスは運動を力に変換する。

- ① スティフネス： 変位 →力
- ② 粘性： 速度 →力
- ③ 慣性： 加速度 →力

まず、スティフネスについて考えてみよう。各レベルのスティフネスを次のように定義する。

$$1) \text{ 作業空間: } F=-K_e dX \dots\dots\dots(7)$$

$$2) \text{ 関節 " : } \tau=-K_j d\theta \dots\dots\dots(8)$$

$$3) \text{ 筋 " : } f=K_m dL \dots\dots\dots(9)$$

ただし、 $dX \triangleq X-X^e$, $d\theta \triangleq \theta-\theta^e$, $dL \triangleq L-L^e$ で X^e , θ^e , L^e は平衡点を表す。 $K_e \in R^{l \times l}$, $K_j \in R^{m \times m}$, $K_m \in R^{n \times n}$ はそれぞれ、作業空間、関節空間、筋空間のスティフネス行列である。 K_m は各筋の弾性係数を要素とする行列で、筋の可変粘弾性や自己受容器の感度により調節することが可能である⁽¹⁴⁾。

K_e , K_j , K_m の関係は、(2)~(9)式を用いて

$$K_j=J^T K_e J \dots\dots\dots(10)$$

$$=G^T K_m G \dots\dots\dots(11)$$

で与えられる。作業空間でのスティフネス K_e 、筋のスティフネス K_m は、それぞれヤコビ行列 J , G を用いて関節のスティフネス K_j に変換される。従って、要求される作業空間のスティフネスを筋のスティフネスの調節で実現できるかどうかは、 J , G の特性に依存することになる。言い換えれば、リンク系の姿勢・冗長自由度、多関節筋を含む筋の冗長性や付着位置が手先のインピーダンス調節に重要な役割を果たすことになる。

一方、各レベルのコンプライアンス（スティフネス

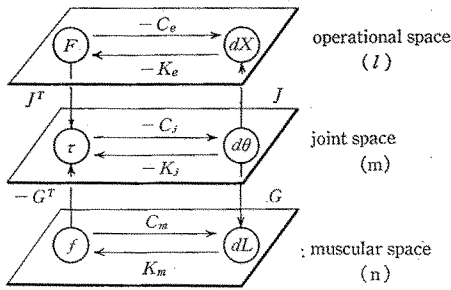


図2 筋空間、関節空間、作業空間インピーダンスの関係

Fig. 2. Impedance relationships among muscle, joint and end-point levels.

の逆で、力から変位への関係を C_e, C_j, C_m とすると、

$$C_e = K_e^{-1} \dots\dots\dots (12)$$

$$C_j = K_j^{-1} \dots\dots\dots (13)$$

$$C_m = K_m^{-1} \dots\dots\dots (14)$$

$$C_e = J C_j J^T \dots\dots\dots (15)$$

$$C_m = G C_j G^T \dots\dots\dots (16)$$

となる。これらの関係を図2に示す。

ここで各空間の次元数に注目すべきである。例えば、正則な手先目標スティフネス K_e が与えられると、 K_j は(10)式より決定することができる。しかしながら、もしアームが冗長な関節自由度を持っていると、たとえ J が行に関してフルランクだとしても、 K_j は正則とならず、関節コンプライアンス C_j を定義することができない。これは関節空間の自由度 m が作業空間自由度 l より大きいためである。次章では、この点に注目してインピーダンス変換問題を考察する。

3. 運動インピーダンス変換

作業に応じて目標手先スティフネスが与えられたとき、それを関節スティフネスに変換することを考える。ただし、対象とするアームは生体の筋骨格系で、冗長な関節自由度を持つ ($m > l$)。

いま、目標手先スティフネス K_e は正則であるとする。このとき、手先コンプライアンス C_e は、(15)式で与えられ、

$$C_e = K_e^{-1} = J C_j J^T \dots\dots\dots (17)$$

となる。従って、問題は上式を満たす行列 C_j を求めることになる。このマトリクス方程式に関して以下の性質が成り立つ。

(1) 解の存在性 『姿勢が特異点でない限り、

関節コンプライアンス C_j に関するマトリクス方程式(17)は解を持つ。』

証明) まず、(17)式が解を持つための必要十分条件は、

$$J J^+ C_e (J J^+)^T = C_e \dots\dots\dots (18)$$

が成立することであることを示す。ただし、 J^+ は J の擬似逆行列である。

いま、(17)式の解が存在すると、(18)式の左辺の C_e に(17)式を代入し、

$$J J^+ (J C_j J^T) (J J^+)^T = J C_j J^T = C_e \dots\dots (19)$$

となり、(18)式が成立することがわかる。一方、(18)式が成立すると、(17)式との比較により

$$C_j = J^+ C_e (J^T)^+ \dots\dots\dots (20)$$

がひとつの解となることがわかる。従って、(18)式は(17)式が解を持つための必要十分条件である。

姿勢が特異点でない限り、 J は行に関してフルランクとなり、擬似逆行列 J^+ は

$$J^+ = J^T (J J^T)^{-1} \dots\dots\dots (21)$$

で与えられる。従って、

$$J J^+ = J J^T (J J^T)^{-1} = I_l \dots\dots\dots (22)$$

ただし、 I_l は $l \times l$ の単位行列

となり、(18)式が成立する。以上より、マトリクス方程式(17)式は解をもつ。

(2) 一般解 『(17)式のマトリクス方程式の一般解は、

$$C_j = J^+ C_e (J^T)^+ + \{Z_1 - J^+ J Z_1 (J^+ J)^T\} \dots\dots\dots (23)$$

で与えられる。ただし、 $Z_1 \in R^{m \times m}$ は任意の行列である。』

証明) (23)式の C_j を(17)式に代入すると、

$$J C_j J^T = J J^+ C_e (J J^+)^T + J \{Z_1 - J^+ J Z_1 (J^+ J)^T\} J^T = C_e \dots\dots\dots (24)$$

となるから、(23)式の C_j は(17)式の解である。また、 X を任意の解とすると、

$$Z_1 = X - J^+ C_e (J^+ J)^T \dots\dots\dots (25)$$

として、

$$X = J^+ C_e (J^T)^+ + \{Z_1 - J^+ J Z_1 (J^+ J)^T\} \dots\dots\dots (26)$$

と表すことができる。

(3) 最小ノルム解 『(17)式のマトリクス方程式の解のうち、

$$C_j^* = J^+ C_e (J^T)^+ \dots\dots\dots (27)$$

は最小ノルムを有する⁽¹⁵⁾。ここでマトリクスノルムとして、 $\|C_j\| = \{tr(C_j^T C_j)\}^{1/2}$ を用いる。』

このように、冗長な関節自由度を持つアームでは、

ある手先コンプライアンスを実現するのに関節コンプライアンスを選択することが可能である。

ところで、冗長自由度を持つアームの逆運動学解は運動インピーダンスの関係より、

$$d\theta = K_j^{-1} J^T (J K_j^{-1} J^T)^{-1} dX \quad \dots\dots\dots (28)$$

で与えられる⁽¹³⁾。これは、関節空間のポテンシャルエネルギー

$$Q(d\theta) = d\theta^T K_j d\theta \quad \dots\dots\dots (29)$$

を最小にする解と等価である。いま、(23)式の変換式に含まれる任意行列 Z_1 を用いて、関節コンプライアンス C_j を調節すると、その関節コンプライアンスに応じた逆運動学解を(28)式から求めることができる。すなわち、(23)式の C_j の任意性は、逆運動学解の不定性に対応していることがわかる。

以上の議論は、関節スティフネスと筋スティフネスの関係に着目することにより、関節空間から筋空間へのインピーダンス変換問題に拡張することができる。すなわち、(17)式の代りに(11)式、

$$K_j = G^T K_m G \quad \dots\dots\dots (30)$$

を K_m に関するマトリクス方程式として考えれば、関節スティフネスから筋スティフネスへの変換式を導出できる。

4. 冗長アームのインピーダンス変換

以上のように、目標手先スティフネスを実現しながら、さまざまな関節スティフネスを選択できることが明らかになった。ここでは、図3に示す3リンク・モデルを用いて上肢平面運動のシミュレーションを行う。なお、各パラメータは人間の上肢を参考に、表1のように設定した。

表2は目標スティフネス K_e を単位行列で与えた場合の関節コンプライアンス C_j である。CASE 1 は、(27)式の最小ノルム解で、CASE 2, 3 は、(23)式を

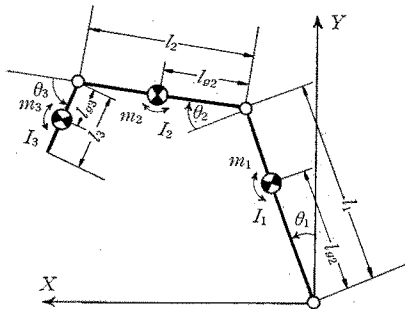


図3 平面-3リンクアーム
Fig. 3. A three-link planar arm model.

表1 モデルパラメータ
Table 1. Model parameters.

	LINK 1	LINK 2	LINK 3
length (m): l_i	0.30	0.24	0.11
mass (kg): m_i	1.59	0.90	0.54
center of mass (m): l_{gi}	0.162	0.125	0.055
moment of inertia: I_i ($\text{kg}\cdot\text{m}^2/\text{s}^2$)	1.58×10^{-3}	4.76×10^{-3}	5.87×10^{-4}

用いて変換した場合である。CASE 2 は、肩・肘に比べて手首のコンプライアンスが大きく、CASE 3 は、逆に、肩、肘のコンプライアンスが大きい。それぞれの行列 Z_1 は表中に示す。CASE 1 の C_j は正則とはならないが、CASE 2, 3 の場合はいずれも正則となり、関節スティフネス K_j を定義することができる。また、この C_j を使って、(12), (13), (15) 式から導出される

$$K_e = (J K_j^{-1} J^T)^{-1} \quad \dots\dots\dots (31)$$

の変換を行えば、単位行列に戻ることが容易に確かめられる。

図4は、この関節コンプライアンス C_j を用いて計算した逆運動学解である((28)式)。図で、点線の姿勢で静止している手先に外部から $F = -0.05$ (N) の外力を与えたとする。このとき、CASE 1 は、関節空間の微小変位 $d\theta$ のノルムを最小にするような解(擬似逆行列解)を与える。図から、CASE 2 では、擬似逆行列による解に比べて肩関節の動きが少なく、肘・手首を主に使って手先の移動を行っていることがわかる。これは、(23)式を用いた変換した肩関節のコンプライアンスが小さいためである。逆に、CASE 3 では肩関節のコンプライアンスが大きく、動かしやすいため肩関節が変化している。ただし、いずれの場合にも、外力による手先の変化は等しいことに注意すべきである。このように、要求される手先スティフネス

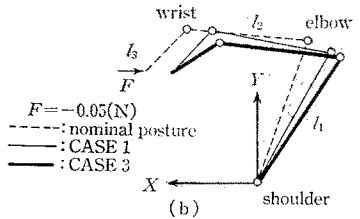
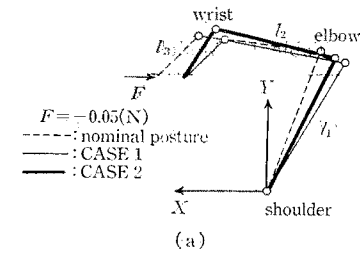
表2 関節コンプライアンス行列

Table 2. Joint compliance matrices with the same end-point compliance.

	CASE 1	CASE 2	CASE 3
transformation matrix Z_1	$\begin{bmatrix} 0. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 0. \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 10. & 0. & 0. \\ 0. & 10. & 0. \\ 0. & 0. & 100. \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 100. & 0. & 0. \\ 0. & 30. & 0. \\ 0. & 0. & 10. \end{bmatrix}$
joint compliance C_j	$\begin{bmatrix} 12.4 & -4.4 & -4.8 \\ -4.4 & 9.3 & 4.9 \\ -4.8 & 4.9 & 3.2. \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 9.3 & .69 & .45 \\ .69 & .66 & -4. \\ .45 & -4. & 98.3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 20.8 & -17. & 12.2 \\ -17. & 27.9 & -17. \\ 12.2 & -17. & 0.01 \end{bmatrix}$

nominal posture: $\theta_1 = -20^\circ$, $\theta_2 = 15^\circ$, $\theta_3 = 50^\circ$

$$J(\theta) = \begin{bmatrix} 0.225045 & -0.056863 & -0.077780 \\ -0.214266 & -0.316870 & -0.077783 \end{bmatrix}$$



	$d\theta_1$	$d\theta_2$	$d\theta_3$
CASE 1	-9.76	5.47	4.60
CASE 2	-5.80	-1.23	20.96
CASE 3	-13.46	11.72	-10.67

nominal posture: $\theta_1 = -20.0^\circ, \theta_2 = 15.0^\circ, \theta_3 = 50.0^\circ$
(c)

図 4 外力による姿勢の変化

Fig. 4. An example of the inverse instantaneous kinematics for an end-point disturbance force in a redundant upper limb model.

を一定に保ちながら作業に応じて関節コンプライアンスを調節することにより、アームの姿勢を調節できることがわかる。これは、アームの力学的特徴である関節自由度の冗長性をうまく利用していることを意味する。

以上、スティフネス、コンプライアンスについて、変換問題を考察したが、粘性の変換も同様に考えることができる。すなわち、手先の粘性行列 B_e から関節の粘性行列 B_j への変換は、(23)式と同様にして、

$$D_j = J^+ D_e (J^T)^+ + [Z_2 - J^+ J Z_2 (J^+ J)^T] \dots \dots \dots (32)$$

となる。ただし、 $D_e \triangleq B_e^{-1} \in R^{3 \times 3}$ 、 $D_j \triangleq B_j^{-1} \in R^{m \times m}$ で、 $Z_2 \in R^{m \times m}$ は任意の行列である。この粘性特性の働きを調べるため、手先に外力が加わったときのアームの過渡応答を計算機シミュレーションにより求めた。

図5は、手先に図の矢印の方向から外力 $\|F\|=5$ (N) が加わったときの手先の応答波形である。手先でのスティフネス、粘性行列は、図のように設定している。なお、アームの動力学計算にはニュートン・オ

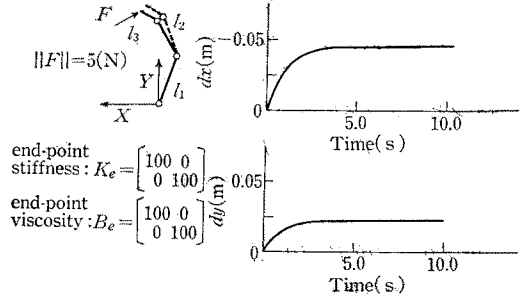


図 5 外力に対する手先変位のステップ応答

Fig. 5. The step responses of end-point displacements for an end-point disturbance force in a redundant upper limb model.

イラー法⁽¹⁶⁾を用い、パラメータは表1の値を用いた。スティフネス、粘性行列を比較的大きな値に設定しているため、手先の運動はこのインピーダンス特性が支配的になっている。手先はほぼ一次系の応答を示し、安定に逆運動学解に収束していることがわかる。

一方、図6は関節角度の時間変化である。図(a)は、手先インピーダンスから関節インピーダンスへの変換 ((23), (32)式) を $Z_1=Z_2=I_m$ を用いて行った場合で、図(b)は、 $Z_1=I_m, Z_2=0$ とした場合である。(a)はなめらかに関節が変化しているが、(b)では過渡応答に大きな振動が見られる。ただし、いずれの場合も手先の運動は、図5のようになることに注意すべきである。すなわち、作業空間の安定性と関節空間の安定性が必ずしも一致しないことがわかる。これは、冗長な関節自由度を持つアームの大きな特徴であり、極端な場合には、手先が漸近安定であっても関節は持続振動を示すことがある⁽¹⁷⁾。

図6から、インピーダンス変換に用いる行列 Z_1, Z_2 をスティフネスと粘性の間で整合するようによれば、関節運動を安定化できることがわかる。すなわち、手先に設定したインピーダンス特性自体を関節空間に変換するのである。生体の筋骨格系における筋、関節レベルのインピーダンス調節は、主として、骨格筋の可変粘弾性と γ 系による筋紡錘の感度調節により行われる。筋紡錘は、筋長、短縮速度を検出する自己受容器であり、骨格筋の可変粘弾性と合わせて、筋骨格系のインピーダンスはスティフネスだけでなく、粘性も調節可能となっている。このことは、関節空間の安定性を保持しながら、手先インピーダンスを調節できることを意味している。

なお、本章の例題では、スティフネス行列、粘性行列として対角行列を用いた。これは、手先インピーダ

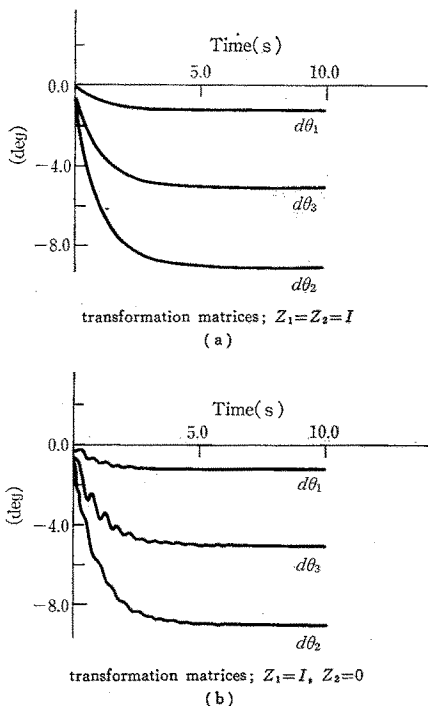


図 6 外力に対する関節角変位のステップ応答
Fig. 6. The step responses of joint angles displacements for an end-point disturbance force in a redundant upper limb model.

ンスの非干渉化を意味している。生体が日常、直面する作業では、手先インピーダンスの非干渉化が必要とされることが多い。例えば、物体表面をならう作業では物体表面に対する法線方向と接線方向の運動を非干渉化する必要がある。また、ドアの開閉やクランク回しといった作業ではドアやクランクの回転中心を原点とする極座標系に関して、回転方向と極座標の原点への方向の運動を非干渉化する必要がある。ただし、本論文で示した結果は、スティフネス行列、粘性行列が正則である限り、一般の行列に適用することが可能である。

5. まとめ

本論文では、筋骨格系のインピーダンス調節機構の解明を目的として、運動インピーダンス変換問題を考察した。そして、関節自由度の冗長性を利用することにより、手先インピーダンスを一定に保ちながら、関節インピーダンスを選択できることを示した。これは、運動や姿勢の制御における生体の柔軟性を説明する。

本論文の結果は、マニピュレータのインピーダンス制御に応用することが可能である。一般に、インピーダンス制御を確立するには、次の諸点を明らかにする必要がある。

- (1) 対象物インピーダンスの同定：手先の作業では、環境との相互干渉をまず第一に考えなければならない。従って、対象物がどのような特性（形状、重量、かたさなど）を持つかを同定しておく必要がある。
- (2) 最適手先インピーダンスの設定：対象物インピーダンスに応じて、手先のインピーダンスを決定する。これは、作業内容に依存する部分が多い。
- (3) 手先から関節へのインピーダンス変換：目標インピーダンスを調節インピーダンスで実現するための変換である。アームの力学構造に大きく影響される。
- (4) 関節インピーダンスの実現：フィードバック機構や関節の剛性を直接変化させることにより関節インピーダンスを実現する。
- (5) 制御系全体の構成：設定したインピーダンスを効果的に利用するための制御方式を明らかにする必要がある。

本論文で示したインピーダンス変換法は(3)の問題に対する解を与える。ただし、運動インピーダンス変換(23)、(32)式に含まれる任意行列 Z の設計法を、今後、検討する必要があると考えている。なお、本研究の一部は文部省科学研究費(62460142, 62750390)の研究助成によるものである。ここに改めて謝意を表します。

(昭和 62 年 12 月 28 日受付)

文 献

- (1) M. T. Mason: "Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators", *IEEE Trans.* Vol. SMC-11, 418 (1981)
- (2) 平本・杉本・荒井・坂上: 「多自由度ロボットの仮想コンプライアンス制御」, 計測自動制御学会論文集, 22, 3, 343 (1986)
- (3) 末広・高瀬: 「直接計算方式による作業座標サーボに基づくマニピュレーションシステム」, 日本ロボット学会誌, 3, 2, 11 (1984)
- (4) J. K. Salisbury: "Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates", *the 19th IEEE Conf. Decision and Control*, 95 (1980)
- (5) 金子・谷江・横井・宮高: 「3自由度マニピュレータのダイレクトコンプライアンス制御(第一報)」, 第25回 SICE 手稿集, 245 (1986)
- (6) 横井・金子・宮高・大野・谷江: 「3自由度マニピュレータのダイレクトコンプライアンス制御(第二報)」, 第4回日本ロボット学会講演会, 447 (1986)

-
- (7) 伊藤宏司:「筋運動制御機構」, 計測と制御, 25-2, 131 (1986)
- (8) N. Hogan: "Mechanical Impedance Control in Assistive Devices and Manipulators", in [Robot Motion: Planning and Control], Eds. by M. Brady et al., MIT Press, Cambridge, 361 (1983)
- (9) N. Hogan: "The Mechanics of Multi-Joint Posture and Movement Control", *Biol. Cybern.* 52, 315 (1985)
- (10) N. Hogan: "Impedance Control; An Approach to Manipulation; Part. I, II, III", Trans. the ASME. J. of Dynamic System, *Measurement and Control*, 107, 1 (1985)
- (11) F. A. Mussa Ivaldi, E. Bizzi and N. Hogan: "Neural, Mechanical, and Geometric Factors Subservicing Arm Posture in Humans", *J. Neuroscience*, 5, 2737 (1985)
- (12) H. Asada and J.J.E. Slotine: "Robot Analysis and Control", John Wiley & Sons, 66 (1986)
- (13) 辻・伊藤(宏)・長町・池本:「筋運動制御系のインピーダンス調節機構と手先操作性」, 計測自動制御学会論文集, 24, 4, 385 (1988)
- (14) 伊藤・辻:「筋骨格系の双線形特性と義肢制御への応用」, 電気学会論文誌, C-105-10, 201 (1985)
- (15) 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 (1978)
- (16) 伊藤・南崎・伊藤:「計算機による多リンク機構動的解析システム」, バイオメカニズム, 5, 231 (1980)
- (17) O. Khatib: "A Unified Approach for Motion and Force Control of Robot Manipulators: The Operational Space Formulation", *IEEE J. of Robotics and Automation*, 3, 1, 43 (1987)
-