

別刷

# 計測自動制御学会 論文集

年 第 卷 第 号

---

(P. ~P. )

---

---



社団法人 計測自動制御学会

## 回転作業における生体運動系のインピーダンス調節†

伊藤 宏 司\*・辻 敏 夫\*・杉 野 実\*

### Impedance Regulation in Human Movements during a Rotation Task

Koji Ito\*, Toshio TSUJI\* and Minoru SUGINO\*

In the present paper, we discuss how the human subject controls the hand position and force depending on task objects, and what roles the arm redundancy and the muscle impedance regulation play in rotation movements.

From the measurement of the hand force and the arm posture in the execution of crank rotations, it was found that the subject made the wrist joint impedance large and generated the hand force in the direction normal as well as tangential to the crank rotation. Impedance analysis demonstrated that the high impedance of the wrist joint, realized by the simultaneous activities of flexor and extensor muscles, was able to provide for the posture of redundant arm without limiting the hand manipulatability. Then it was shown that the hand force in the outer and normal directions contributed to increase the robustness of the hand manipulation against the external disturbance.

**Key Words:** arm redundancy, impedance, hand manipulation, motor control, force control

#### 1. ま え が き

運動制御の本質は、環境との複雑な相互作用をどのように制御するかという点にある。一般に、運動の制御では、位置変数（変位、速度、加速度）、力変数（力・トルク）、運動インピーダンス（剛性、粘性、慣性）の3種類の制御変数が考えられる。特に、まわす、つまむ、握るなど作業対象に接触しながら、これを操作しようとするときには、対象物によって規定される拘束に従って、位置変数だけでなく力変数の制御

が必要であり、スムーズなマニピュレーションのためには、両者を結びつける運動インピーダンスを適切に設定することが重要な問題になる。

Mason<sup>1)</sup>らは、作業空間のハイブリッド制御を提唱し、運動学的観点から手先拘束の表現法を与えた。また、Salisbury<sup>2)</sup>は、手先と環境との相互作用を目標スティフネス（剛性）を指定することで記述し、それを実現する制御則を与えた。Hogan<sup>3)</sup>は、スティフネス制御を一般化して、位置変数と力変数の動的関係に着目したインピーダンス制御を提案した。これは環境側からみた手先のインピーダンスが所望の値になるように、ソフトウェア・サーボで制御しようとするものである。

ところで、生体の運動制御系には、筋の可変粘弾性と脊髄レベルのパラメータ調節にみられるように、運動インピーダンスの調節機構が備わっている<sup>4)</sup>。巧みな手先の操作性は、これらの調節機構とそれを効果的に手先に伝達する筋骨格系の力学構造により実現されている。Hogan<sup>5)</sup>は作業空間における運動インピーダンスをモビリティ楕円体を用いて解析し、二関節筋や骨格系の冗長性・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明らかにした。Mussa Ivaldi<sup>6)</sup>は、手先に与えた変位とそれによって生じる反力を測定し、上肢姿勢による手先スティフネスの変化を実験的に求めた。また、辻ら<sup>7),8)</sup>は、筋・関節・作業の各空間における運動インピーダンスとそれらの変換法および手先操作性との関係を解析した。以上の研究は環境からの拘束を受ける作業に対して、インピーダンス制御の一般的構成法や冗長アームと運動インピーダンスの基本的関係を理論的に解析したものである。

一方、マニピュレーションでは、作業内容、目的、対象物の特性に応じて、手先に適切な力とインピーダンスを設定することが必要である。しかし、その設定法を一般的に記述することは容易でなく、手先拘束の

† 第3回生体・生理工学シンポジウムで発表 (1988・11)

\* 広島大学工学部 東広島市西条町大字下見

\* Faculty of Engineering, Hiroshima University, Higashi-hiroshima

(Received May 18, 1989)

(Revised November 24, 1989)

表現<sup>9)</sup>や接触作業の幾何学的・力学的解析<sup>10)</sup>などの基礎的検討が行われているにすぎない。この意味で、すでに高度なマニピュレーションを実現している人間のインピーダンス設定法を探ることは、手操作の理論的解析やロボット・マニピュレータへの力制御の教示法を考察する上で有用である。しかしながら、人間の上肢動作については、手先の位置・軌道制御<sup>11),12)</sup>、書字動作<sup>13)</sup>など運動学的観点からの解析やモデリングに着目した研究が多く、拘束作業のもとでのマニピュレーション・タスクを解析した例は少ない<sup>14)</sup>。

以上の観点から、本稿では、手先インピーダンス設定法を考察する第一歩として、人間が作業対象に応じて手先の力とインピーダンスをどのように制御しているかを回転作業を取り上げて考察する。さらに、上肢の冗長性および筋・関節レベルのインピーダンス調節機能が回転作業に果たす役割について解析する。以下、第2章で運動インピーダンスの定義を与え、第3章でクランク回転作業実験とその結果を示す。第4章では回転作業と上肢の冗長性およびインピーダンス調節機能の関係を力学モデルを用いて解析し、第5章で回転作業のシミュレーションにより解析結果を確認する。

## 2. 運動インピーダンス

いま、アームの自由度を  $n$  とし、関節変位を表わすベクトルを  $\theta = (\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n)^T$ 、関節トルクまたは力を表わすベクトルを  $\tau = (\tau_1, \tau_2, \dots, \tau_n)^T$  とする。一方、作業空間が  $m$  自由度で表わされるものとし、その位置・姿勢のベクトルを  $X = (X_1, X_2, \dots, X_m)^T$ 、力・モーメントのベクトルを  $F = (F_1, F_2, \dots, F_m)^T$  とする。 $n > m$  のとき、アームの自由度が冗長になる。 $\theta$  から  $X$  への変換は一般に非線形で、

$$X = q(\theta) \tag{1}$$

で与えられる。姿勢  $\theta$  のまわりの微小変位に注目すると、

$$dX = J(\theta)d\theta \tag{2}$$

となる。 $J(\theta) = \partial q / \partial \theta \in R^{m \times n}$  はヤコビ行列と呼ばれる(以下、 $J$  と略記)。また  $F$  から  $\tau$  への変換は、

$$\tau = J^T F \tag{3}$$

で与えられる。このように、作業空間の運動記述と関節空間の運動記述は、ヤコビ行列  $J$  を用いて結びつけることができる。

運動インピーダンスは運動に関する機械インピーダンスを意味し、位置変数を力変数に変換する。

- ① スティフネス (剛性) : 変位 → 力  $F = KdX$
- ② 粘性 : 速度 → 力  $F = Bd\dot{X}$
- ③ 慣性 : 加速度 → 力  $F = Md\ddot{X}$

インピーダンス・モデルとして、以下の線形モデルがしばしば用いられる<sup>15)</sup>。

$$F = KdX + Bd\dot{X} + Md\ddot{X}$$

ただし、 $dX$  は平衡点からの偏差を表わす。

ここで、作業空間、関節空間のスティフネスを定義しておく。

$$1) \text{ 作業空間: } F = K_c dX \tag{4}$$

$$2) \text{ 関節空間: } \tau = K_j d\theta \tag{5}$$

ただし、 $dX = X^e - X$ 、 $d\theta = \theta^e - \theta$  で、 $X^e$ 、 $\theta^e$  は平衡点を表わす。 $K_c \in R^{m \times m}$ 、 $K_j \in R^{n \times n}$  はそれぞれ、作業空間、関節空間のスティフネス行列である。

## 3. クランク回転実験

### 3.1 実験条件

水平面内のクランク回転作業を取り上げる。被験者はクランクの中心に身体の中心を合せて立ち、手で握ったハンドル (半径 1.5 cm) によりクランクを回転させる。座標系は、ハンドルの位置を原点、クランク中心方向を  $y$  軸、接線方向を  $x$  軸とする動座標系  $x-y$  とクランク中心を原点とする直交座標系  $X-Y$  を用いる (Fig. 1 参照)。Fig. 2 に本実験で使用したクランクの構造を示す。クランクの回転軸に取り付けたパルス・エンコーダにより回転角  $\phi$  を、ハンドル下部の4面に取り付けられたひずみゲージにより動座標系での手先の力ベクトル  $f$  を、手首関節に取り付けたゴニオメータにより手首関節角度  $\theta_3$  を測定し、サンプリング間隔 10 ms で計算機内に取り込んだ。実験は、3種類の半径 (15 cm, 11.25 cm, 7.5 cm; 慣性モーメントはそれぞれ 0.0534 kgm<sup>2</sup>, 0.0495 kgm<sup>2</sup>, 0.0466 kgm<sup>2</sup>)、低速回転 (2~3 rad/s) と高速回転 (5~7 rad/s)、

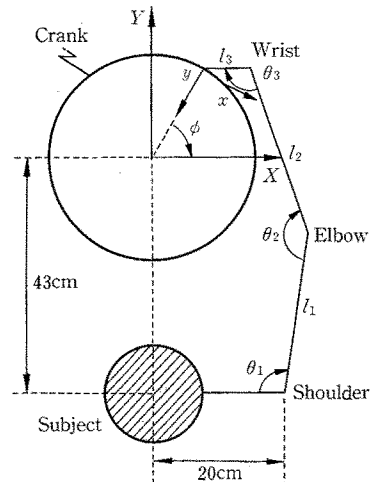


Fig. 1 Crank rotation task and coordinate systems

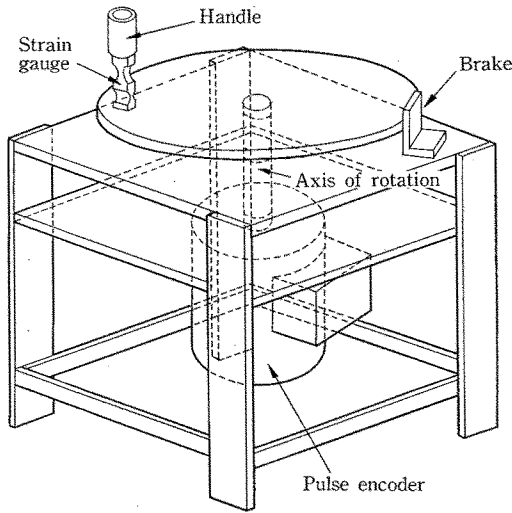


Fig. 2 Crank used in the experiment

さらに、クーロン摩擦力の大 (0.107 kg 重 m) と小 (0.049 kg 重 m) の各条件について、各 10 試行を行った。なお、被験者は 2 名である。

3.2 実験結果

クランクを効率よく回転させるには、クランク接線方向の剛性や粘性を大きくして位置や速度を制御し、一方、手先はクランクのハンドルに拘束されるので、法線方向には剛性を小さく設定してクランクの反力にまかせればよいと考えられる<sup>16)</sup>。本実験の場合、水平面内の運動であるので、手先の自由度は位置制御・力制御あわせて 2、関節の自由度は 3 となり関節が冗長となる。

(1) 作業空間の運動

実験結果の代表例 (回転半径 15 cm, 摩擦大) を Fig. 3 に示す。図 (a) は手先の接線方向の力 ( $f_x$ ) とクランク中心方向の力 ( $f_y$ ) の時間変化で、図 (b) はそれらのベクトル表示である。いずれも  $\phi=0^\circ$  から時計回りに低速でクランクを回転させた場合の実験結果である。図より、被験者は接線方向だけでなく、法線方向外向きにも比較的一定の力を加えていることがわかる。この傾向は他の実験条件でも同様であった。なお、回転に伴う  $f_x$  の変動はおもに設定した摩擦力の不均一によるものである。

(2) 関節空間の運動

回転半径 7.5 cm のときの上肢の姿勢変化を Fig. 4 に示す。図 (a) はスティック・ピクチャ、図 (b) の実線は関節角度の変化である。上から、肩・肘・手首関節の変化を示し、各関節とも伸展位を  $180^\circ$  にとっている。横軸はクランク回転角で、X 軸を  $0^\circ$  として、時計回りを正としている。図から、肩・肘関節はクランクの回転とともに滑らかに伸展から屈曲へと変化していることがわかる。これに対して、手首関節の角度はほとんど変化しておらず、伸展位から約  $20^\circ$  屈曲させた状態を保持している。すなわち、被験者はクランク回転中、手首関節をほとんど動かさない。この傾向は他の実験条件でも同様であった。

一方、Fig. 5 は同時に測定したクランク回転中の表面筋電図である。上から、肩関節の屈筋 (大胸筋: pectoralis major)・伸筋 (棘上筋: infraspinatus), 肘関節の屈筋 (上腕二頭筋: biceps brachii)・伸筋 (上腕三頭筋: triceps brachii), 手首関節の屈筋 (尺側手

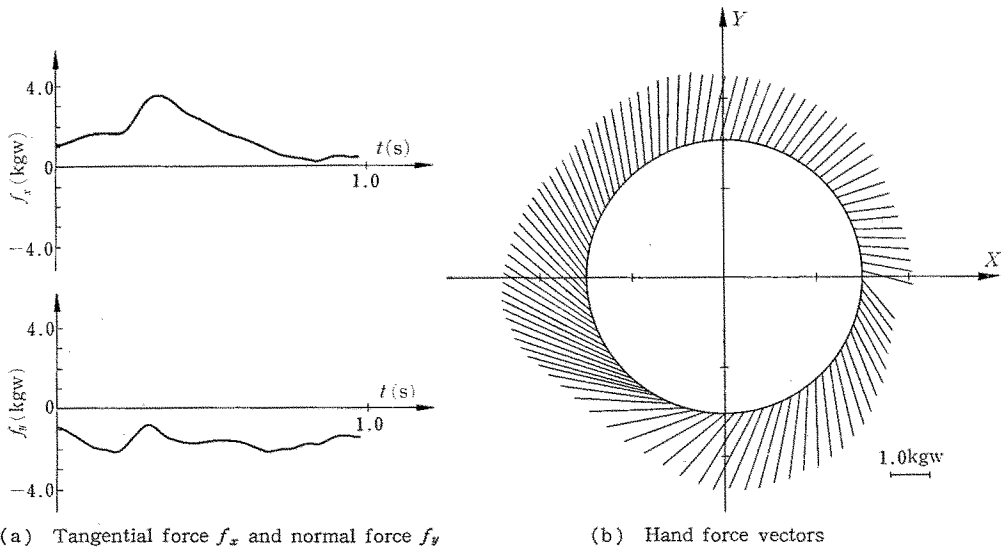
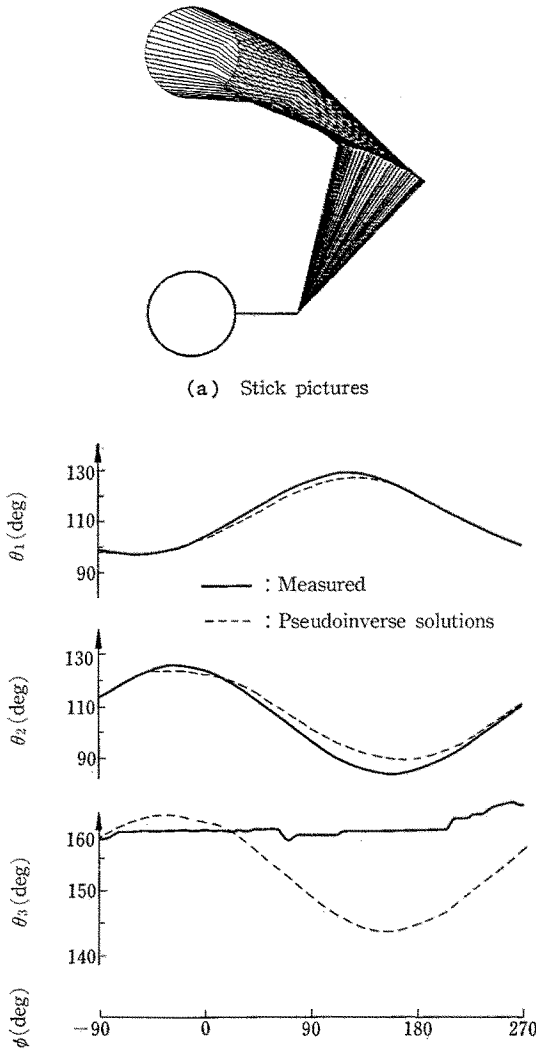


Fig. 3 Measurement results of hand forces ( $r=15$  cm, large friction)



(b)  $\theta_1$ : shoulder joint,  $\theta_2$ : elbow joint,  $\theta_3$ : wrist joint,  $\phi$ : crank rotation angle

Fig. 4 Arm postures and joint angles

根屈筋: flexor carpi radialis)・伸筋 (長橈側手根伸筋: extensor carpi ulnaris)の活動状態である。肩関節, 肘関節では伸筋と屈筋が交互に活動している。これに対して, 手首関節では, 若干の交互活動はあるものの屈筋と伸筋の同時活動が持続されている。この同時活動は, 手首関節回りの粘弾性を大きくすることを意味している<sup>17)</sup>。すなわち, 被験者は手首関節の粘弾性を大きくすることによって, 積極的に関節をロックしているのである。クランクのような回転作業では, ヒトは上肢の冗長性を利用して肩・肘・手首の各関節を協調的に動かすのではなく, むしろ, 手首関節を固定して冗長性を解消していると考えられる。

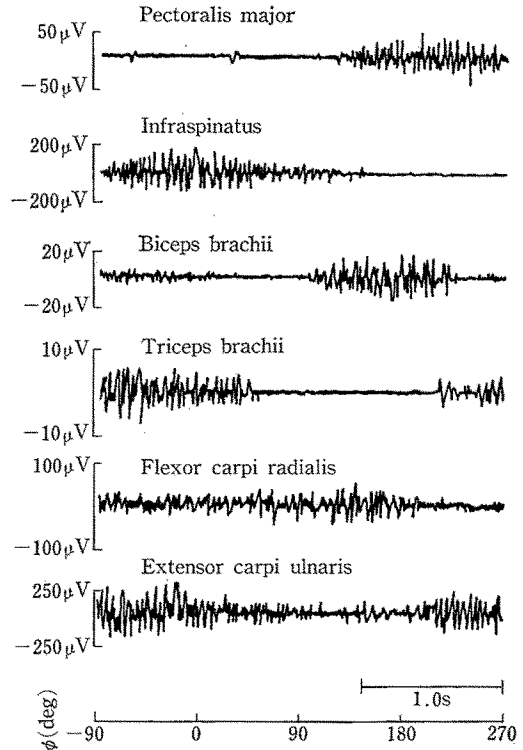


Fig. 5 Surface electromyogram (EMG) during rotation tasks

#### 4. 回転作業のモデル解析

##### 4.1 手先操作性

手首関節をロックすると, 自由に動かすことができるのは肩, 肘関節だけとなり, 手先の位置の操作性に大きな影響がでると考えられる。そこで, 関節トルクによる手先位置の操作性を関節のスティフネスに着目して調べてみよう。

関節トルク  $\tau$  と手先変位  $dX$  の関係は, (2), (5) 式より, ヤコビ行列と関節スティフネス行列  $K_j$  によって次式のように表わせる。

$$dX = JK_j^{-1}\tau \quad (6)$$

ここで, 一定の関節トルク  $\|\tau\|^2 = \tau_1^2 + \tau_2^2 + \dots + \tau_n^2 \leq 1$  を用いて実現できる手先変位  $dX$  を考える。この  $dX$  の集合は, 作業空間内の楕円体

$$dX^T [(JK_j^{-1})(JK_j^{-1})^T]^{-1} dX \leq 1 \quad (7)$$

で与えられる<sup>8)</sup>。上式は, 一定の大きさの関節トルクを用いて手先位置を変えようとする場合の手先位置の動かしやすさを, 実現しうる手先位置の変位で表現したものと考えることができる。

Fig. 6 は被験者がクランク回転中にとった上肢姿勢をもとに(7)式より計算した手先操作性である。図

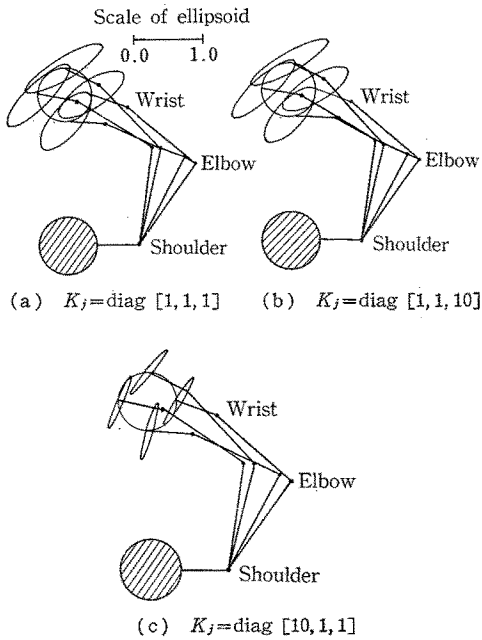


Fig. 6 Hand manipulability

(a)は肩・肘・手首関節ともやわらかくした場合、図(b)は手首関節を固く、図(c)は肩関節を固くした場合である。手首関節を固くした場合(b)は、図(a)に比べて手先操作性はほとんど変化していない。ところが、肩関節を固くした場合(c)は楕円が極端に小さくなり、方向も制限されてしまうことがわかる。手首関節をロックすることにより、手先の操作性を低下させることなく、関節トルクを効率よく手先に伝達することができるのである。生体のインピーダンス調節機構が作業に応じてうまく活用されていることがわかる。

ところで、アームに冗長関節自由度がある場合は、手先の位置から関節角度を一意に定めることができない。このため、従来から、擬似逆行列法<sup>18)</sup>、特異点低感度運動分解行列法<sup>19)</sup>、関節トルク最適化法<sup>20)</sup>など、さまざまな評価基準のもとで逆運動学解が提案されている。たとえば、擬似逆行列解は関節角度変位の2乗和を最小にする解を与える。Fig. 4の点線は実験のクランク回転作業に対する擬似逆行列による逆運動学解である。ヒトの手首関節角度(実線)がほとんど変化していないのに対して、擬似逆行列解は他の関節と同様に大きく変化している。他の評価基準による逆運動学解も、運動学的観点から冗長アームの姿勢を規定しており、手首関節の粘弾性を大きくするという制御方策とは異なるものである。

筆者らは先に手先のスティフネスそのものを関節空間に変換する手法を与えた<sup>7)</sup>。その一般解はコンプラ

イアンス(スティフネスの逆で、力から変位への関係)行列の形で次式のように与えられる。

$$C_j = J^+ C_e (J^T)^+ + [Z_1 - J^+ J Z_1 (J^+ J)^T] \quad (8)$$

ここで、

$C_e$ : 作業空間コンプライアンス行列

$C_j$ : 関節空間コンプライアンス行列

$J^+ = J^T (J J^T)^{-1}$ : 擬似逆行列

であり、 $Z_1 \in R^{n \times n}$  は任意の行列である。同じ  $C_e$  を実現しながら、 $Z_1$  を設定することで  $C_j$  を調節することができる。すなわち、冗長アームでは、ある作業(手先)空間コンプライアンス(またはスティフネス)を実現するのに、関節コンプライアンスの配分を選択することができる。その配分が冗長アーム(上肢)の姿勢を規定することになる。このように回転作業では、ヒトは冗長アームの特徴を巧みに利用して関節インピーダンスをあらかじめ設定し、それによって上肢の姿勢を規定していると考えられる。

#### 4.2 回転作業のロバスト性

ところで、実験では、手先の力ベクトルが必ずしもクランク接線方向を向かず、むしろ常に力ベクトルがなっていた。つぎにこの理由を考えてみる。

Fig. 7のように、時計方向にクランクを定常回転させている状態を考える。ヒトがPの位置で法線方向の力  $F_r$  と接線方向の力  $F_t$  を設定していたとしよう。このとき、回転成分については

$$M_c \ddot{\phi} + B_c \dot{\phi} + B_c \text{sgn}(\dot{\phi}) = r F_t \quad (9)$$

が成り立っている。ただし、 $M_c$ 、 $B_c$ 、 $B_c$  はクランクの慣性、粘性、クーロン摩擦、 $r$  はクランクの半径である。

ところが、外乱により、実際のクランクの位置が  $\Delta\phi$  だけずれて、 $P'$  の位置になったとする。このとき、 $F_r$  が法線方向外向きに設定されていれば、その接線方向成分はP方向を向く。逆に、法線方向内向き

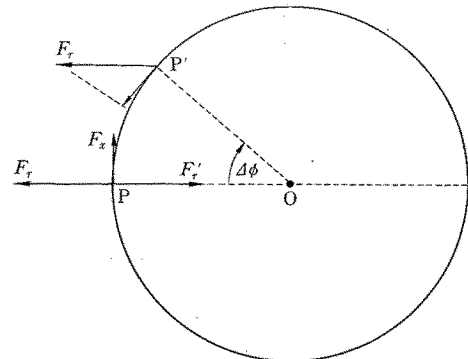


Fig. 7 Robustness of crank rotation

の力が設定されていたとすると、接線方向の成分は  $P$  から遠ざかる方向を向く。

変動後の回転成分の運動方程式は

$$M_d(\ddot{\phi} + \Delta\ddot{\phi}) + B_c(\dot{\phi} + \Delta\dot{\phi}) + B_c \operatorname{sgn}(\dot{\phi} + \Delta\dot{\phi}) = r(F_x \cos \Delta\phi - F_r \sin \Delta\phi) \quad (10)$$

となる。 $\dot{\phi}$  と  $\dot{\phi} + \Delta\dot{\phi}$  は同符号で、かつ、変動後も(9)式が成り立っているとすれば、(10)式は  $\Delta\phi$  が微小であるので、

$$M_d \Delta\ddot{\phi} + B_c \Delta\dot{\phi} + r F_c \Delta\phi = 0 \quad (11)$$

と書ける。上式は

$F_r > 0$  のとき、構造的に安定

$F_r < 0$  のとき、構造的に不安定

である。結局、法線方向の力ベクトルの向きにより、平衡点まわりのクランクの動特性が構造的に変化する。クランクの回転角度が設定位置よりずれた場合でも、構造的に安定になるように、すなわち、平衡点にもどる方向に力がかかるようにするために、ヒトは法線方向の力を外向きにかけていると考えられる。

### 5. インピーダンス制御シミュレーション

つぎに、このようなヒトの回転作業を手先作業座標にインピーダンス制御系を構成して考察してみよう<sup>2)</sup>(Fig. 8 参照)。

外力に対する望ましい手先のインピーダンスをクランクの回転中心を原点とする極座標系を用いてつぎのように表現する。

$$M_d \ddot{\Phi} + B_d(\dot{\Phi} - \dot{\Phi}_d) + K_d(\Phi - \Phi_d) = -F_{int} \quad (12)$$

ただし、 $\Phi$  はクランクの回転角  $\phi$  と回転中心から手先までの距離  $r$  を用いて  $\Phi = [\phi, r]^T$  と定義する。また、 $M_d$ 、 $B_d$ 、 $K_d$  は極座標で表わした手先の望ましい慣性、粘性、ステイフネス、 $F_{int}$  はクランクから手先にかかる力で、 $\Phi_d = [\phi_d, r_d]^T$  は手先の平衡点である。一方、極座標系で表現した上肢の運動方程式は次式で与えられる。

$$M(\phi)\ddot{\phi} + h(\phi, \dot{\phi}) = F - F_{int} \quad (13)$$

ただし、 $M(\phi)$  は慣性行列、 $h(\phi, \dot{\phi})$  は遠心力・コ

リオリ力、 $F$  は手先の駆動トルクである。なお、回転作業が水平面内の運動なので、重力項は省いている。

いま、非線形補償

$$F_c = h(\phi, \dot{\phi}) + F_e \quad (14)$$

により、上肢の遠心力・コリオリ力が補償され、かつ、 $M_d = M(\phi)$ 、すなわち望ましい慣性特性が上肢の慣性そのものであるとする。このとき、フィードバック則

$$F_c = B_d(\dot{\phi}_d - \dot{\phi}) + K_d(\phi_d - \phi) \quad (15)$$

を施すことにより、Fig. 8 の破線内を(12)式の望ましいインピーダンスに一致させることができる。

(15)式を接線方向( $\phi$ )と法線方向( $r$ )に書き下すと

$$F_c = \begin{bmatrix} b_x & 0 \\ 0 & b_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\phi}_d - \dot{\phi} \\ \dot{r}_d - \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k_x & 0 \\ 0 & k_y \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \phi_d - \phi \\ r_d - r \end{bmatrix} \quad (16)$$

となる。ただし、手先のインピーダンスは両方向で相互干渉がないとして対角行列とした。

まず、半径 15 cm のクランクを用いて手先の接線方向に大きなステイフネスを設定し、法線方向は 0 とした場合の結果を Fig. 9 に示す。なお、上肢およびクランクの動力学計算にはアッペル法を用い、手先の拘束を考慮した閉リンク構造としてシミュレーションを行った<sup>2)</sup>。

設定したインピーダンスは  $k_x = 100$ 、 $k_y = b_x = b_y = 0$  で、平衡点を  $\phi_d = \phi + 0.02$  (rad)、 $r_d = r$  として運動指令値を与えた。また、上肢の初期姿勢には実験時の測定データを用いた ( $\theta_1(0) = 2.39$  rad,  $\theta_2(0) = 1.69$  rad,  $\theta_3(0) = 2.64$  rad)。図(a)は手先の接線方向と法線方向の力の時間変化を表わし、図(b)は上肢の姿勢変化と手先の力ベクトルを表わしている。図より、力ベクトルはほぼ接線方向に設定されていることがわかる。なお、 $t = 1.4$  s 付近の変動は手首が伸びきった特異点状態にあるためである。また、手首関節が腕の冗長性のため不自然な姿勢になっているが、これはここで採用した制御方式が作業空間の手先の位置フィードバックのみで、関節の目標角度を何ら与えていないためである。もちろん、先に述べた逆運動学解および可動域を考慮した関節レベルの制御系を構成すればこの点は解消される。

しかし、ここでは、ヒトの場合と同様に手首関節に大きなインピーダンスを設定することを考える。このことを模擬するため、(16)式のインピーダンス制御に加えて、手首関節に高ゲインの局所フィードバック

$$\tau_{wrist} = K_{wrist}(\theta_3(0) - \theta_3(t)) - B_{wrist}\dot{\theta}_3(t) \quad (17)$$

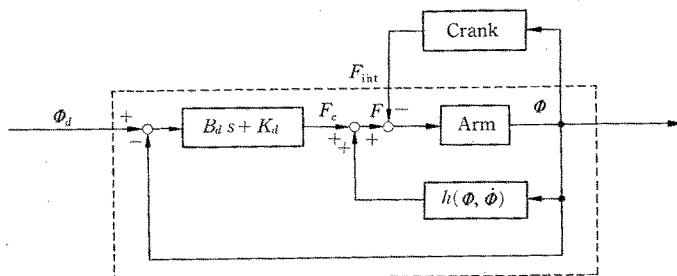
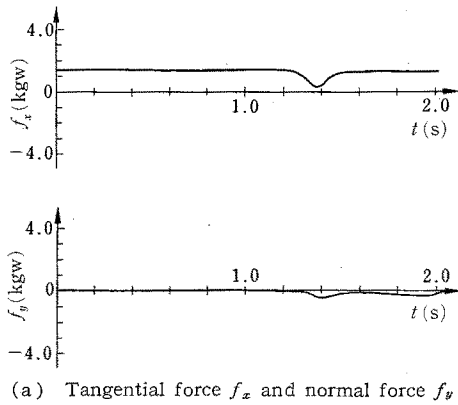
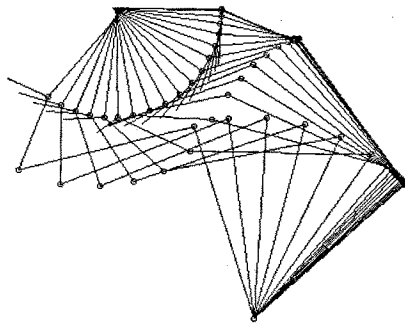


Fig. 8 Block diagram of impedance control system



(a) Tangential force  $f_x$  and normal force  $f_y$



(b) Stick pictures

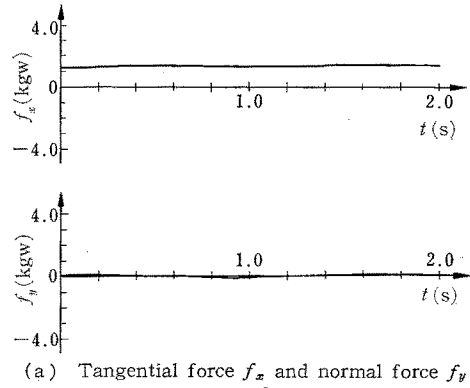
Fig. 9 Simulation I: stiffness control in hand coordinates

を与えた。その結果を Fig. 10 に示す。冗長性がなくなるため、初期姿勢が適切に選ばれていれば、自然な上肢姿勢で制御が可能である。

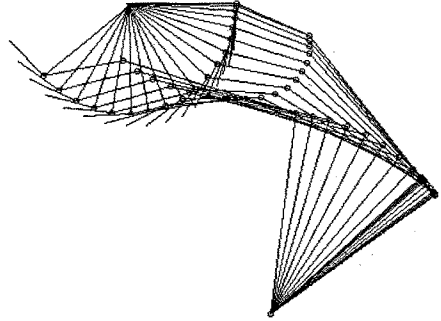
このシミュレーション例では法線方向のスティフネスを 0 に設定しているため、相互干渉による若干の影響を除けば、力ベクトルは接線方向を向いている。ヒトと同じように外向きの力ベクトルを得るには、(16)式の作業座標のインピーダンス制御で、法線方向に適切なインピーダンスを与え、同時に平衡点  $r_d$  を実際のクランクの半径  $r$  より大きく設定すればよい。その結果を Fig. 11 に示す。なお、平衡点を実際の半径より小さく設定すると、力ベクトルは内向きになる。このように、設定するインピーダンスと仮想目標回転半径の大小により、力ベクトルの方向が決まる。

### 6. あとがき

本稿では、作業対象に応じた手先インピーダンスの設定法を検討するための手がかりとして、クランク回転作業におけるヒトの手先力を解析した。そして、ヒトは作業対象の特性に応じて手先の力・インピーダンスを巧みに調節していること、屈筋・伸筋の同時活動

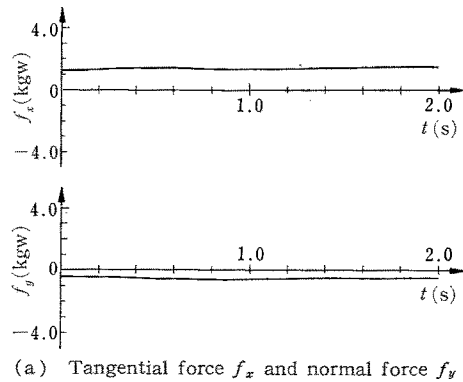


(a) Tangential force  $f_x$  and normal force  $f_y$

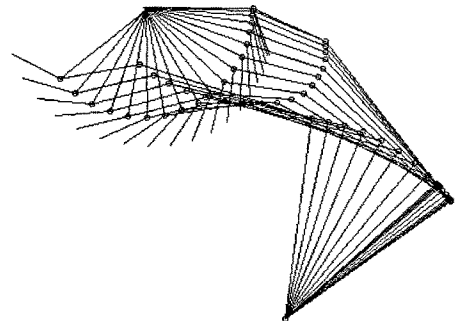


(b) Stick pictures

Fig. 10 Simulation II: with stiff wrist joint [ $K_{wrist}=10, B_{wrist}=0.1$ ]



(a) Tangential force  $f_x$  and normal force  $f_y$



(b) Stick pictures

Fig. 11 Simulation III: generation of force vectors in the direction normal to the crank rotation [ $K_y=50, r_d=r+0.1$ ]



というインピーダンス調節機構をうまく用いることにより、関節まわりのインピーダンスを作業に応じて設定していることを示した。それは手先の操作性を維持しながら冗長な上肢の姿勢を規定し、同時に外乱に対してロバスタな特性を与えるものであった。この結果はドアの開閉など他の回転作業にも適用できると考えられる。

今後は、冗長アームにおける各関節への最適な運動インピーダンス配分について考察するとともに、対象物と作業目的に応じたインピーダンス設定法をより一般的に検討することが必要であると考えている。なお、本研究の一部は文部省科学研究費(62460142, 63750415)の研究助成によるもので、ここに改めて謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) M. T. Mason: Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators, IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, **SMC-11-6**, 418/432 (1981)
- 2) J. K. Salisbury: Active Stiffness Control of a Manipulator in Cartesian Coordinates, Proc. of IEEE Conf. on Decision and Control, 95/100 (1980)
- 3) N. Hogan: Impedance Control; An Approach to Manipulation; Part I, II, III, Trans. the ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, **107-1**, 1/22 (1985)
- 4) 伊藤宏司: 筋運動制御機構, 計測と制御, **25-2**, 131/135 (1986)
- 5) N. Hogan: The Mechanics of Multi-Joint Posture and Movement Control, Biological Cybern., **52**, 315/331 (1985)
- 6) F. A. Mussa Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi: Neural, Mechanical, and Geometric Factors Subserving Arm Posture in Humans, J. Neuro Science, **5**, 2737/2743 (1985)
- 7) 辻, ほか: 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, 電気学会論文集C, **108-7**, 471/477 (1988)
- 8) 辻, ほか: 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**, 385/392 (1988)
- 9) 吉川恒夫: ロボットアームの位置と力の動的ハイブリッド制御—手先拘束の記述と関節駆動力の算出, 日本ロボット学会誌, **3-6**, 531/537 (1985)
- 10) 末広, 高瀬: 接触運動の表現と制御および組立作業への応用, 日本ロボット学会誌, **6-6**, 499/506 (1988)
- 11) W. Abend, E. Bizzi, and P. Morasso: Human Arm Trajectory Formation, Brain, **105**, 331/348 (1982)
- 12) 宇野洋二: 運動軌道の生成と学習システム, コンピュータコントロール, **24**, 29/37 (1988)
- 13) 田口, 藤井: 書字運動制御における脳の機能表現, 電子通信学会論文集, **J70-D-3**, 640/649 (1986)
- 14) 浅田, 浅利: 熟練作業者の動作計測による工具支持インピーダンスの同定とロボットの作業教示, 計測自動制御学会論文集, **24-12**, 1292/1298 (1988)
- 15) H. Kazerooni, T. B. Sheridan, et al.: Robust Compliant Motion for Manipulators, Part I and II, IEEE J. Robotics and Automation, **RA-2**, 83/105 (1986)
- 16) 横井, 金子, 宮島, 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2報クランク回転作業への応用, 第4回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 447/448 (1986)
- 17) 伊藤, 辻: 筋骨格系の双線形特性と義肢制御への応用, 電気学会論文集C, **105-10**, 201/208 (1985)
- 18) D. E. Whitney: Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses, IEEE Trans. Man-Machine Systems, **MMS-10-2**, 47/53 (1969)
- 19) Y. Nakamura and H. Hanafusa: Inverse Kinematic Solutions with Singularity Robustness for Robot Manipulator Control, Trans. the ASME, J. of Dynamic Systems, Measurement and Control, **108**, 163/171 (1986)
- 20) J. M. Hollerbach: Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization, IEEE J. Automation and Robotics, **RA-3**, 308/316 (1987)
- 21) 横山, 伊藤, 辻: 身体運動解析システムによる拘束動作の解析, 電子情報通信学会技術報告, **MBE 89-45**, 29/36 (1989)