

# クランク回転作業における人間の位置/力制御方策\*

辻 敏夫\*\*, 伊藤宏司\*\*\*

In the present paper, position and force control characteristics of human subjects during crank rotation tasks are experimentally analyzed in order to make clear the motor control strategy during constrained tasks. The crank rotation tasks require hand force control as well as hand position control, and include three kinds of control modes: force control mode, velocity control mode and position control mode. The experimental results showed that the human subjects could perform the tasks skillfully and adopted different control strategies for each control mode. Then, the hand force control mechanism was mathematically modelled by defining a motor impedance and virtual equilibrium points (a virtual trajectory). It was shown that the control strategies of human subjects could be explained from the points of view of the motor impedance and the virtual trajectory.

本論文では、拘束運動における人間の運動制御方策を解明するため、クランク回転作業時の人間の位置/力制御特性を実験的に解析した。このクランク回転作業は手先位置の制御だけでなく、手先力の制御も必要で、3種類の制御モード（力制御モード、速度制御モード、位置制御モード）を含んでいる。実験の結果、人間はこの作業をうまく実行することができ、また各モードごとに制御方策を切り換えていることが明らかになった。そして、手先力の制御メカニズムを運動インピーダンスと仮想平衡点（仮想軌道）を用いてモデル化することにより、各モードにおける人間の制御方策を説明できることが示される。

（キーワード：生体運動、拘束作業、回転作業、運動インピーダンス、仮想軌道、位置制御、力制御）

## 1. まえがき

日頃、何気なく行っている“コップの水を飲む”という動作も、分解すればコップの位置を判断し、その位置へ手先を動かすと同時に、コップの材質・重さによって握力を制御するというように、位置と力の微妙な制御が必要である。しかも、コップの位置までの手先の軌道やコップに加える手先力、さらにはコップの重さに応じた手首その他の関節に対するインピーダンス設定などの制御プランニングがあらかじめ行われており、刻々のフィードバック情報だけに頼って制御さ

れているわけではない。すなわち、人間の随意運動はそのほとんどが経験や訓練により獲得された熟練運動であり、上位中枢の運動内部モデルに基づいてフィードフォワード的に行われていると考えられる<sup>1)</sup>。

最近、このような随意運動の枠組みや運動内部モデルを実験的・理論的に明らかにしようとする研究が活発に行われている。たとえば、手先の軌道計画に関する Flash and Hogan<sup>2)</sup>の躍度最小モデルや、宇野ら<sup>3)</sup>のトルク変化最小モデル、腕の軌道制御に関する川人ら<sup>4)</sup>の階層的運動学習モデル、把持動作における手の形状生成に関する Iberall<sup>5)</sup>や副村ら<sup>6)</sup>の研究、pre-shapingに関する Arbib ら<sup>7)</sup>のスキーマモデルや、片山ら<sup>8)</sup>のニューラルネットモデルなどがある。これらの研究のほとんどは、随意運動のなかでも環境から力学的拘束を受けない自由運動を扱っている。

しかしながら、まわす、つまむ、にぎる、書くといった日常動作の多くは、対象物との接触を伴った拘束

\* 平成3年10月21日受付

\*\* 広島大学 工学部  
Faculty of Engineering, Hiroshima Univ.

\*\*\* 豊橋技術科学大学  
Toyohashi Univ. of Technology.

運動である。したがって、手先の運動変数（位置、速度、加速度）や形状だけでなく、外部環境との力学的相互作用を考慮した力変数（力・トルク）の制御が必要である。また、このようなマニピュレーションタスクでは、位置と力を結びつける運動インピーダンス（スティフネス・粘性・慣性）を適切に設定することが重要である。しかしながら、作業目的（タスク）や対象物に応じた手先の力・インピーダンスの設定法を一般的に記述することは容易でなく、ロボティクスの分野でも手先拘束の力学的表現<sup>8)</sup>や接触作業の幾何学的・力学的解析<sup>9)</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運動制御方策を探ることは、拘束作業の理論的解析やロボットによるマニピュレーション作業の実現を考えるうえで有用である。

以上の観点から、本稿では、位置と力の制御が要求される拘束作業において、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考察する。我々は先に、拘束作業の典型的な例である水平面内のクランク回転作業を取り上げ、回転作業中の人間の制御方策を、インピーダンス制御を用いて説明できることを示した<sup>10)</sup>。本稿ではさらに、静止しているクランクを一定の速度で回転させ、ある目標位置に位置決めするというタスクを取り上げる。このタスクは、静止しているクランクに静止摩擦力以上の力をかけて駆動するという力制御のモード、クランクの回転速度を目標速度に保つという速度制御のモード、クランクを目標位置に位置決めするという位置制御のモードを含んでおり、被験者は手先の拘束を考慮しながら、これらの制御モードを行わねばならない。

以下、本稿では、まず2章で運動インピーダンスについて説明し、3章でクランク回転実験とその結果を示す。さらに、4章では各制御モードにおける人間の制御方策を解析し、各モードがそれぞれ仮想軌道と運動インピーダンスの設定という観点から説明できることを示す。

## 2. 運動インピーダンスの調節

### 2-1. 運動インピーダンス

一般に運動の制御では、運動変数（位置・速度・加速度）、力変数（力・トルク）、運動インピーダンス（スティフネス・粘性・慣性）の3種類の制御変数が考えられる。

運動インピーダンスは、以下のように運動変数  $X \in R^l$  を力変数  $F \in R^l$  に変換するパラメータである ( $l$  は

作業空間の自由度)。

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

ただし、 $dX = X^e - X$ 、 $d\dot{X} = \dot{X}^e - \dot{X}$  で、 $X^e$  は平衡点を表す。また、 $K$ 、 $B$ 、 $M$  は対応する次元をもつ行列である。運動インピーダンスを総合的に表現するために、次のような線形モデルがしばしば使われる<sup>11)</sup>。

$$F = KdX + Bd\dot{X} + M\ddot{X} \quad (1)$$

たとえばスティフネスには、次のような力学的性質がある。手先がなんらかの原因である変位を受けたとすると、手先に生じる反力は、上肢のスティフネスと変位量により決まる。いま変位量が一定であるとする、スティフネスが大きければ反力が大きく、剛い腕になる。逆にスティフネスが小さければ、反力は小さく、柔らかい腕になる。また、粘性は速度の変動に対して生じる反力を、慣性は加速度に対して生じる反力を規定する。したがって、環境に応じて適切なインピーダンスを手先に設定することにより、環境からの作用力に対する腕の望ましい運動をあらかじめ規定することが可能である。この制御法をインピーダンス制御<sup>12)</sup>とよぶ。インピーダンス制御では、(1)式の運動インピーダンス  $K$ 、 $B$ 、 $M$  と目標軌道  $X^e$ 、 $\dot{X}^e$  (実際の腕の軌道とは必ずしも一致しないことから仮想軌道ともよばれる<sup>10)</sup>) を与えて、位置と力の制御を統一的に取り扱うことが可能である。

### 2-2. 生体運動系のインピーダンス調節機構

一般に、屈筋、伸筋をとともに弛緩させれば、関節は柔らかくなり、外部から自由に動かせる（粘弾性が小さい）。逆に屈筋、伸筋を同時に収縮させて、関節を非常に剛くすることもできる（粘弾性が大きい）。このように筋には、収縮力に比例して粘弾性が大きくなるという性質がある<sup>12)</sup>。一方、屈筋、伸筋の収縮力の差が関節の駆動トルクになる。このことは、同じ駆動トルクを得ながら筋の収縮レベルを変えることで、関節まわりの粘弾性を自由に調節できることを意味する。また、伸張反射系や腱反射系に代表される脊髄レベルの反射回路のパラメータによっても、関節まわりのインピーダンスを調節することが可能である。

さらに、手先を同じ位置に保ちながら腕の姿勢を変化させると、筋のインピーダンスを一定にしたとしても、手先のインピーダンスは大きく変化する<sup>13)</sup>。このことは、冗長自由度の利用（姿勢の選択）によって手先インピーダンスを調節できることを意味している。このように手先の運動インピーダンスは、筋の粘弾性、関節まわりの反射系のパラメータ、骨格系の姿勢変化

によって調節することができる。

### 2-3. 仮想軌道仮説

Polit and Bizzi<sup>14)</sup>は、訓練したサルを使って前腕の位置決め制御を行わせ、位置決め後の腕の角度が屈筋と伸筋の弾性力のつり合う位置（平衡点）によって決まることを示唆した。さらに Bizzi ら<sup>15)</sup>は、視覚および自己受容フィードバックを完全に除去した状態でも、サルは目標点に手先を移動し、短時間維持できることを示した。そしてフィードバック機能を完全に除去したサルの腕を、manipulandum を用いて運動前に目標位置まで強制的に移動させた場合（フィードバックが存在しないため、サルは腕を動かされたことを知覚できない）、運動開始直後、腕はそのまま目標位置に向かわず、目標位置と初期位置の間地点付近まで戻った後に、再び目標位置へ向かうことが見いだされた。

これらの実験から、筋活動を支配している  $\alpha$  運動ニューロンの神経信号は、運動中の平衡点の時間軌道をコード化しているのではないかという考え方が示唆された。Hogan<sup>16)</sup>は、この平衡点の時間軌道が実際の腕の軌道とは異なることを示し、実際の腕の軌道と区別する意味で“仮想軌道”と名づけた（インピーダンス制御における目標軌道に相当する）。そして、自由運動時の腕の運動は仮想軌道の緩やかな変化と、筋の粘弾性特性から決まるインピーダンスによって制御されるという仮説を提案した。

本稿では、生体運動系に存在するインピーダンス調節機構と仮想軌道仮説の枠組みに従って、拘束動作における人間の運動制御方を解析する。

## 3. クランク回転実験

### 3-1. 実験装置の構成

クランク回転作業時の人間の制御特性を実験的に解析するためには、腕の位置・姿勢の変化、および対象物との接触力の測定が不可欠となる。そこで上肢の三次元運動が測定でき、さらに作業対象物であるクランクの動特性を調節することができる実験装置を開発した。図1に実験装置の概要を示す。

#### (1) 三次元座標値の計測

三次元座標の計測には、PSDカメラ（浜松ホトニクス製）を2台使用し、被験者に取りつけたLED（ホトモスリレーの切り替えにより肩関節、肘関節、手首関節の位置を計測）の座標値をA/D変換によりコンピュータに取り込む。

#### (2) クランクの構造

3種類の半径（5, 10, 15 cm）が設定可能なクランク装置を製作した（図2）。クランクの回転軸にはロータリエンコーダ（小野測器製：分解能6000 ppr）を取りつけ、回転角度  $\phi$  をカウンタボードを介してコンピュータに取り込む。また、クランクの動特性調節のため、電磁ブレーキ（神鋼電機製）を用いてクランクの制動力を制御可能にしている。これによりクランクの静止摩擦力、クーロン摩擦力をソフトウェアにより自由に設定することができる。さらに、クランクのハンドル（半径1.5 cm）に取りつけた歪ゲージにより、被験者の手先からハンドルに働く力（クランクの接線方向の力  $F_x$  および法線方向の力  $F_y$ ）を測定することができる。

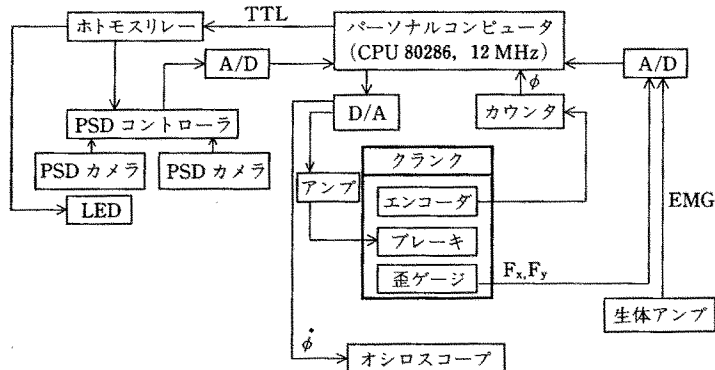


図1 実験装置の構成

Fig. 1 A block diagram of experimental arrangements.

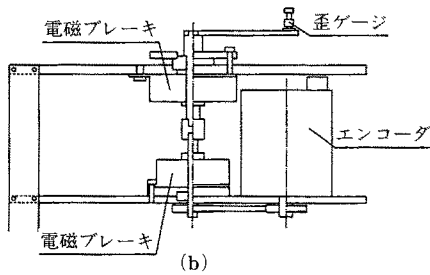
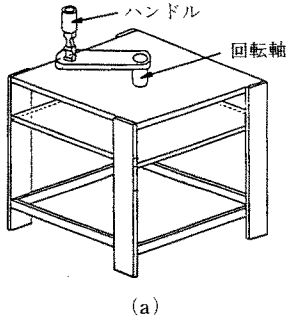


図2 実験に使用したクランク装置  
Fig. 2 Crank used in experiments.

### (3) 筋電位の測定

被験者に取りつけた表面電極から生体アンプ（日本光電製）を用いて6カ所の筋電位（肩関節の屈筋・伸筋、肘関節の屈筋・伸筋、手首関節の屈筋・伸筋、図9参照）を測定し、A/D変換によりコンピュータに取り込む。これにより作業中の被験者の筋活動を観察できる。

以上の装置により、被験者の腕の位置・姿勢の変化、手先の力、さらに筋活動状態を同時に計測することができる。なお、システム全体のサンプリング周波数は500 Hzである。

### 3-2. 実験条件

被験者はクランクの正面に座り、クランクの中心に身体を中心を合わせる。そして $\phi = 0$  (rad)の位置に静止したクランクを右腕で時計まわりに1回転半させ、 $\phi = \pi$  (rad)に位置決めする(図3)。これにより $\phi = 0 \sim \pi$  (rad)は2度通過することになり、被験者の制御方を比較することが可能となる。被験者にはオシロスコープに表示した目標回転速度 $\dot{\phi}_d$ にクランク回転速度 $\dot{\phi}$ を一致させるように指示した。クランクの半

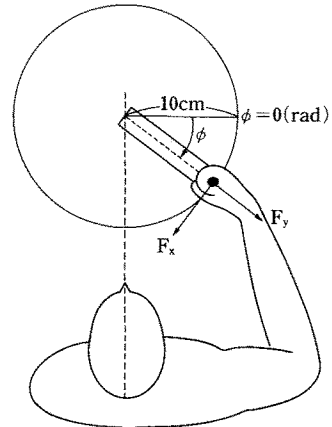


図3 クランク回転作業と座標系  
Fig. 3 Crank rotation tasks and coordinate systems.

径は、あらかじめ予備実験を行い、被験者が最も操作しやすいと申告した10 cmに設定した。目標回転速度は $0.5\pi$ ,  $\pi$ ,  $1.5\pi$  (rad/sec)の3種類、回転に関する静止摩擦力は3.0, 2.0, 1.0, 0.07 ( $\times 9.8$  N), クーロン摩擦力は1.81, 1.35, 0.82, 0.05 ( $\times 9.8$  N)で、いずれもクランクの接線方向の力に換算した値である。摩擦力の調節は電磁ブレーキへの入力電圧により行い、実験終了後、最小自乗法を用いて実効値を推定した。

ここで、被験者の熟練度を定量的に評価するため次のような自乗誤差Eを用いた。

$$E = \sum_{t=0}^T [\dot{\phi}(t) - \dot{\phi}_d(t)]^2 / \sum_{t=0}^T [\dot{\phi}_d(t)]^2$$

Tはクランク停止時刻を表す。実験開始後、自乗誤差Eが安定した後(10~20試行程度)、各条件につき10~20試行の測定を行った。なお、被験者は3名(健康な男子大学院生：右利き)である(表1)。

### 3-3. 実験結果

図4は目標回転速度 $\pi$  (rad/sec)、静止摩擦力1.0 ( $\times 9.8$  N)、クーロン摩擦力0.82 ( $\times 9.8$  N)の

表1 被験者の生体計測値

Tab. 1 Anthropometric data of subjects.

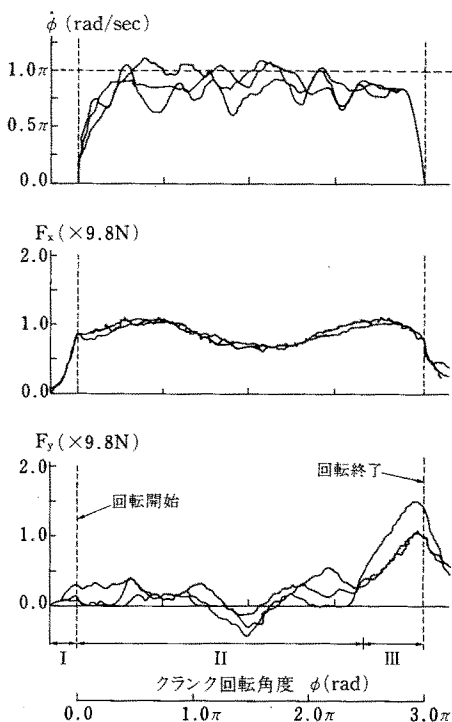
	年齢	体重 (kg)	身長 (m)	上腕長 (m)	前腕長 (m)	手長 (m)
被験者A	22	61	1.72	0.29	0.22	0.19
被験者B	23	58	1.78	0.33	0.25	0.20
被験者C	23	65	1.75	0.32	0.23	0.18

マルチン式計測法による

きの被験者Aの実験結果(回転速度 $\dot{\phi}$ 、接線方向の手先力 $F_x$ 、法線方向の手先力 $F_y$ )のうち、代表的な3試行(11~13試行目)を重ね書いたものである。図中の破線は回転開始時と回転終了時を表しており、横軸は作業時間で規格化した。

この作業は、回転が始まるまでの力制御、ほぼ等速に回転している速度制御、目標位置に停止するまでの位置制御の各モードで構成されている。本稿では、被験者がクランクに力を加えてから回転が開始するまでを力制御モード、回転開始から法線方向の手先力 $F_y$ が増加を始める $\phi=2.5\pi$ (rad)までを速度制御モード、 $\phi=2.5\pi$ (rad)からクランクが停止するまでを位置制御モードとよぶことにする。

クランク回転では、クランクの接線方向に関しては位置や速度、力の制御を行い、法線方向はハンドルの力学的拘束に従えばよいと考えられる。図4から、接



I: 力制御モード, II: 速度制御モード, III: 位置制御モード

図4 実験結果の一例(目標回転速度 $\pi$ (rad/sec), 静止摩擦係数 $1.0(\times 9.8$  N), クーロン摩擦係数 $0.82(\times 9.8$  N))

Fig. 4 An example of experimental results (desired rotation velocity  $\pi$  (rad/sec), statical friction  $1.0(\times 9.8$  N), Coulomb friction  $0.82(\times 9.8$  N)).

線方向の手先力 $F_x$ は速度制御、位置制御モード中、それぞれでほぼ一定となっているが、法線方向の手先力 $F_y$ は、速度制御モードではやや外向きの小さな値であったものが、位置制御モードでは増加している。このように同じ回転動作中でも、力、速度、位置という異なる制御量を取り扱うために、人間は制御方策をそれぞれに対応したかたちに切り換えていると考えられる。この傾向は、他の被験者についても同様に観察された。

次章では、3名の被験者に共通して観察された実験結果の特徴に基づいて、各制御モードにおける人間の制御方策を仮想軌道と運動インピーダンスの設定という観点から解析する。なお、他の被験者、熟練前の実験結果については、文献(21)を参照されたい。

## 4. 手先の位置/力制御方策

### 4-1. 力制御モード

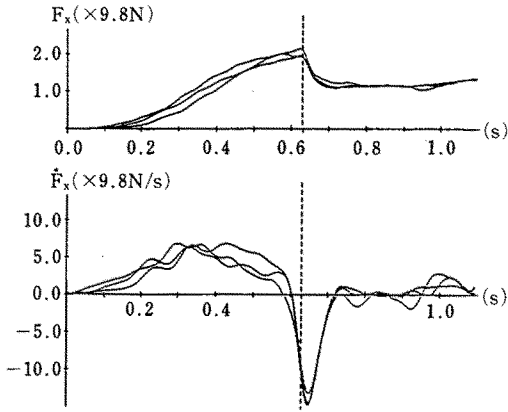
図5 aは、実験条件を目標回転速度 $\pi$ (rad/sec)、静止摩擦係数 $2.0(\times 9.8$  N)、クーロン摩擦係数 $1.35(\times 9.8$  N)と設定した場合の、力制御モード時の接線方向の手先力とその微分値を、図4と同様に3試行重ね書いたものである。被験者は静止しているクランクに徐々に力を加え、この力が静止摩擦力を超えると回転が始まる。回転開始直後はハンドルからの反力が減少するため手先力はいったん減少しているが、その後、クランクの摩擦トルクと手先力によって発生するモーメントが釣り合った状態ではほぼ一定値となり、速度制御モードへ移行していることがわかる。

一方、図6 aはクランクを $\phi=0^\circ$ の位置に完全に固定し、ハンドルに一定の力をかけるように指示した場合の接線方向の手先力とその微分値である<sup>17)</sup>。この場合、クランクは動かないので完全な拘束動作となり、被験者は速度制御への移行を考慮する必要がない。図より、微分値の形状がほぼピークを1つだけもつベル型になっていることがわかる。

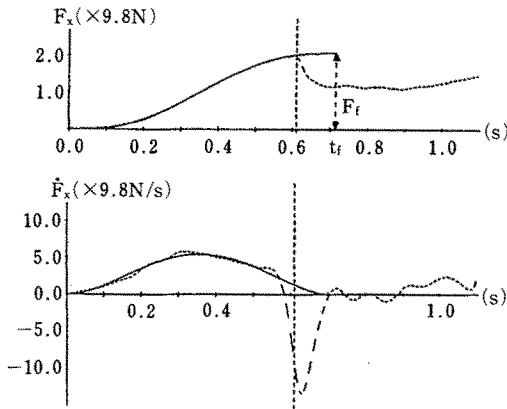
完全拘束運動時の手先力の変化は、仮想軌道の躍度最小モデルによって記述することができる<sup>18)</sup>。いま、2-3節で説明した仮想軌道仮説に従って、運動中の手先力 $F(t) \in R^2$ は、時間とともに移動する仮想的な平衡点(仮想軌道)と手先に設定されたインピーダンスによって決定されると仮定する。

$$F(t) = K_e(X_v(t) - X(t)) - B_e \dot{X}(t) \quad (2)$$

ただし、 $K_e, B_e \in R^{2 \times 2}$ はそれぞれ手先の剛性行列、粘性行列で、 $X(t) \in R^2$ は作業座標系(クランクの接線方向、法線方向を座標軸とする直交座標系、図3)で



(a) 実験結果  
(a) Measured hand force patterns.

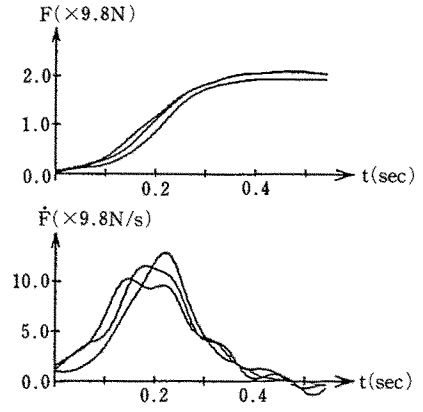


(b) 実験結果(破線)と予測値(実線)  
(b) Measured (dashed lines) and predicted (solid lines) hand force patterns.

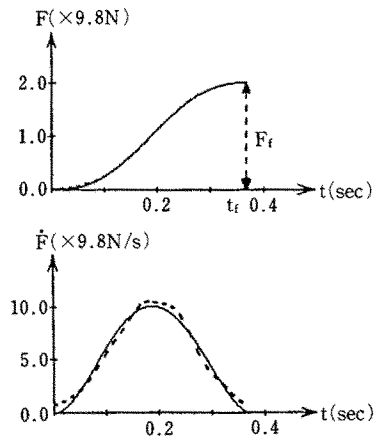
図5 力制御モードにおける接線方向の手先力とその微分値(目標回転速度  $\pi$  (rad/sec), 静止摩擦力  $2.0 (\times 9.8 \text{ N})$ , クーロン摩擦力  $1.35 (\times 9.8 \text{ N})$ )

Fig. 5 Tangential hand forces and its differential values during force control mode of crank rotation tasks (desired rotation velocity  $\pi$  (rad/sec), static friction  $2.0 (\times 9.8 \text{ N})$ , Coulomb friction  $1.35 (\times 9.8 \text{ N})$ ).

表現した手先位置,  $X_v(t) \in R^4$  は仮想軌道を表す. ここで, 手先の剛性行列  $K_e$  は動作中, 変化しないと仮定すると, 手先が拘束されて動かない状態では,  $X(t) = \dot{X}(t) = 0$  とおけるので, 手先力  $F(t)$  の変化は仮想軌道  $X_v(t)$  だけから決定されることになる.



(a) 実験結果  
(a) Measured hand force patterns.



(b) 実験結果(破線)と予測値(実線)  
(b) Measured (dashed lines) and predicted (solid lines) hand force patterns.

図6 クランク固定時の接線方向の手先力とその微分値

Fig. 6 Tangential hand forces and its differential values in which the crank is fixed.

この仮想軌道  $X_v(t)$  が次式の躍度最小という評価のもとに計画されると考える.

$$C = \frac{1}{2} \int_0^t \left( \frac{d^3 X_v(t)}{dt^3} \right)^T \left( \frac{d^3 X_v(t)}{dt^3} \right) dt \quad (3)$$

ここで, 境界条件を

$$X_v(0) = 0, \quad X_v(t_f) = X_f$$

$$\dot{X}_v(0) = \dot{X}_v(t_f) = 0$$

$$\ddot{X}_v(0) = \ddot{X}_v(t_f) = 0$$

とし, 変分法により求めた最適解を(2)式に代入すると,

表2 実験結果から推定したパラメータ

Tab.2 Estimated parameters using experimental results.

	Fig. 5b	Fig. 6b	Fig. 7a	Fig. 7b
目標手先力 $F_f(\times 9.8\text{N})$	2.287	2.029	1.555	1.242
動作終了時刻 $t_f(\text{sec})$	0.772	0.377	0.516	0.543
回転開始時刻 $t_r(\text{sec})$	0.611	—	0.320	0.410
$t_f - t_r(\text{sec})$	0.161	—	0.196	0.133

手先力  $F(t)$  は

$$F(t) = K_e X_v(t) \quad (4)$$

$$= \frac{6F_f}{t_f^5} t^5 - \frac{15F_f}{t_f^4} t^4 + \frac{10F_f}{t_f^3} t^3$$

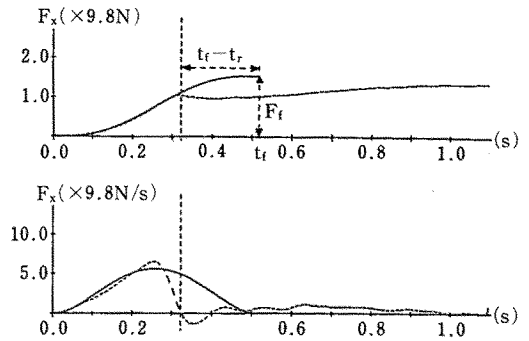
となる<sup>18)</sup>。ここで、 $F_f \triangleq K_e X_v(t_r)$  は目標手先力、 $t_f$  は動作終了時刻を表す。(4)式は人間が  $F_f, t_f$  をあらかじめ設定することにより、手先力の時間変化を計画していることを示している。

図6bは、図6aから最小自乗法を用いて推定した  $F_f, t_f$  を(4)式にあてはめた結果で、実線がモデルから予測した手先力変化、破線が実験結果を表している。手先力、微分値ともによく一致している。

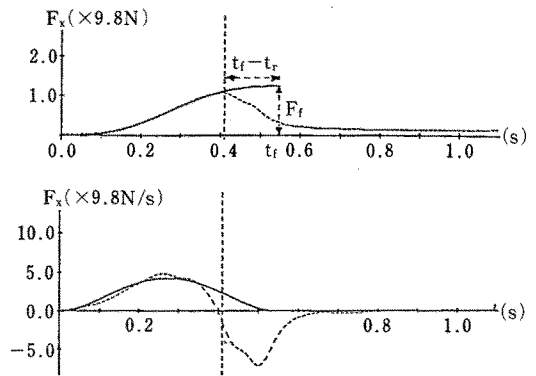
一方、図5bは、図5aの力制御モードでの手先力を回転開始までのデータを使って(4)式にあてはめた結果である。クランクが回転する場合においても実験結果とモデルがよく一致している。なお、回転開始直後の手先力の減少は、回転開始に伴ってクランクの動特性が変化し、クランクからの反力が減少するためである。ここでクランクを固定した場合(図6b)と比較すると、同じ力制御であるにもかかわらず、推定した動作終了時刻  $t_f$  が約2倍になっていることがわかる(表2)。後に続く作業内容(速度制御)が、手先の力制御に大きな影響を与えていることがわかる。

そこで、クランク回転後の摩擦力の变化により、力制御における手先力の制御策がどのように変化するかを調べた。図7の実験結果は静止摩擦係数  $1.0(\times 9.8\text{N})$  で、図7aはクーロン摩擦係数  $0.82(\times 9.8\text{N})$ 、図7bは回転開始後のクーロン摩擦係数を  $0.05(\times 9.8\text{N})$  と設定し、ハンドルが急激に軽くなる場合である。図7の実験結果に仮想軌道の躍度最小モデル((4)式)をあてはめて推定したパラメータを表2に示す。

回転開始後ハンドルが急激に軽くなる場合(図7b)は、過大な手先力を加えるとクランクの回転速度が大きくなりすぎ、速度制御ができなくなる。回転開始時に速度制御に滑らかに移行するためには、手先力の変化(微分値)を0に近づけた状態で、静止摩擦係数を超



(a) クーロン摩擦係数  $0.82(\times 9.8\text{N})$   
(a) Coulomb friction  $0.82(\times 9.8\text{N})$



(b) クーロン摩擦係数  $0.05(\times 9.8\text{N})$   
(b) Coulomb friction  $0.05(\times 9.8\text{N})$

図7 クーロン摩擦の变化が手先力に与える影響  
(目標回転速度  $\pi$  (rad/sec), 静止摩擦係数  $1.0(\times 9.8\text{N})$ )

Fig.7 Effects on hand force patterns by changes of Coulomb friction (desired rotation velocity  $\pi$  (rad/sec), static friction  $1.0(\times 9.8\text{N})$ ).

える手先力を発生せねばならない。図7a, bを比較すると、bではaに比べて目標手先力  $F_f$  が小さくなり、動作終了時刻  $t_f$  も実際の回転開始時刻  $t_r$  に近くなっていることがわかる(表2)。このように、被験者は後に続く速度制御への切り換えを考慮しながら、力制御モードの手先力を計画していると考えられる。今後、より詳細な実験を行い、人間の目標手先力  $F_f$ 、動作終了時刻  $t_f$  の設定法を明らかにする必要がある。

ところで、本稿の手先力生成モデルでは、手先の剛性はクランクのハンドルに力を加えている間、一定であると仮定している。しかしながら手先力の発生は、仮想軌道だけでなく手先剛性を変化させることによっても制御できる((2)式)<sup>22)</sup>。本稿では、関節まわりの粘

弾性は比較的緩やかな自由運動中ほぼ一定に保たれるという報告<sup>23,24)</sup>と、自由運動と拘束運動を統一的に扱うという観点から、仮想軌道に基づいて人間の手先力パターンモデル化を行った。力制御時に被験者が、手先の剛性が一定になるように調節しているかどうかは、今後、詳しく解析する必要がある。

#### 4-2. 速度制御モード

クラックを回転させるには、手先のインピーダンスを接線方向には“剛く”設定して位置や速度の制御を行い、法線方向には“柔らかく”設定してクラックからの拘束に従えばよいと考えられる<sup>10)</sup>。そこで(1)式の線形モデルに従い、外力(手先が対象物や環境から受ける力)に対する望ましい手先インピーダンスを、クラックの回転中心を原点とする極座標系を用いて次のように表現する。

$$M_e \ddot{\Phi} + B_e (\dot{\Phi} - \dot{\Phi}_d) + K_e (\Phi - \Phi_d) = -F \quad (5)$$

ここで、 $K_e, B_e, M_e \in \mathbb{R}^{2 \times 2}$ は極座標で表現した手先のステイフネス行列、粘性行列、慣性行列(上肢の慣性を極座標系で表現した等価慣性)、 $\Phi = [\phi, r]^T$ はクラックの回転角 $\phi$ とクラック法線方向の手先位置 $r$ を要素とするベクトルで、 $\Phi_d, \dot{\Phi}_d$ は仮想軌道を表す。また、 $F \in \mathbb{R}^2$ は手先力を表す。

(5)式の手先力 $F$ を回転の接線方向成分 $F_x$ と法線方向成分 $F_y$ に書き下すと

$$M_x \ddot{\phi} + B_x (\dot{\phi} - \dot{\phi}_d) + K_x (\phi - \phi_d) = -r_0 F_x \quad (6)$$

$$M_y \ddot{r} + B_y (\dot{r} - \dot{r}_d) + K_y (r - r_d) = -F_y \quad (7)$$

となる。ここで、 $r_0$ はクラックの半径、 $\phi_d, r_d$ は極座標における手先の仮想軌道である。

速度制御モードでは、指定された目標回転速度 $\dot{\phi}_d$ に実際の回転速度 $\dot{\phi}$ をあわせなければならない。したがって、等速回転時には、回転方向に関しては $\ddot{\phi} = 0$ 、 $\dot{\phi}_d = \dot{\phi}$ が成り立っている。また、手先はクラックに拘束されているので、半径方向に関しては $r = r_0$ 、 $\dot{r} = \dot{r}_d = 0$ である。結局、速度制御モードにおける手先力は

$$K_x (\phi - \phi_d) = -r_0 F_x \quad (8)$$

$$K_y (r_0 - r_d) = -F_y \quad (9)$$

によって決定されることになる。ここで、手先のステイフネス $K_x, K_y$ は4-1節と同様に回転中変化しないと仮定すると、手先力の大きさ・方向は仮想軌道 $\phi_d, r_d$ により決定される。図2の実験結果では接線方向の手先力はほぼ一定で、法線方向はやや外向きの手先力が発生しているが、これは次式のように仮想軌道を設定することにより説明できる。

$$\phi_d = \phi + \alpha \quad (\alpha > 0) \quad (10)$$

$$r_d = r_0 + \beta \quad (\beta > 0) \quad (11)$$

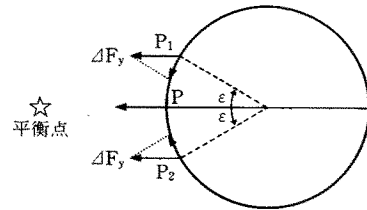


図8 位置制御モードにおける法線方向の手先力の役割

Fig. 8 Role of normal hand forces during position control mode of crank rotation tasks.

つまり、人間はクラックのやや外側に仮想軌道を設定してクラックを回転させていると考えられる。

#### 4-3. 位置制御モード

図4の実験結果にみられるように、このモードでは被験者が法線方向の手先力を増加させていた。そこで、この増加した手先力の働きを考える。

図8のように、被験者が目標位置 $P$ で法線方向に $\Delta F_y$ ほど手先力を増加させたとする。このとき回転成分に関しては運動方程式

$$m \ddot{\phi} + b \dot{\phi} + b_c \operatorname{sgn}(\dot{\phi}) = 0 \quad (12)$$

が成り立っている。ここで、 $m, b, b_c$ はそれぞれクラックの慣性、粘性摩擦、クーロン摩擦を表す。

また、 $\operatorname{sgn}(\alpha)$ は

$$\operatorname{sgn}(\alpha) = \begin{cases} +1 & (\alpha > 0) \\ 0 & (\alpha = 0) \\ -1 & (\alpha < 0) \end{cases}$$

と定める。この状態でクラックの回転角が $\epsilon$ だけずれ、 $P_1$ の位置になったとする。このとき $\Delta F_y$ がクラック外向きに設定されていれば、その接線方向成分は $P$ を向くが、内向きに設定されていると $P$ から遠ざかる方向を向く。このときの運動方程式は

$$m(\ddot{\phi} + \ddot{\epsilon}) + b(\dot{\phi} + \dot{\epsilon}) + b_c \operatorname{sgn}(\dot{\phi} + \dot{\epsilon}) = T \quad (13)$$

$$T = -r \Delta F_y \sin \epsilon \quad (14)$$

となる。ただし、 $T$ はクラックに作用する駆動トルクである。

ここで、法線方向の手先力増加がもたらすステイフネスの変化を求めると

$$\Delta K_x = -\frac{\partial T}{\partial \epsilon} = r \Delta F_y \cos \epsilon \quad (15)$$

となる。 $\Delta K_x$ は、クラックが目標位置 $P$ に近づいたり、 $\Delta F_y$ が大きくなると増加する。つまり、法線方向の手先力を増加させることによって、回転成分のステイフネス $K_x$ を大きくすることができるのである。もちろ



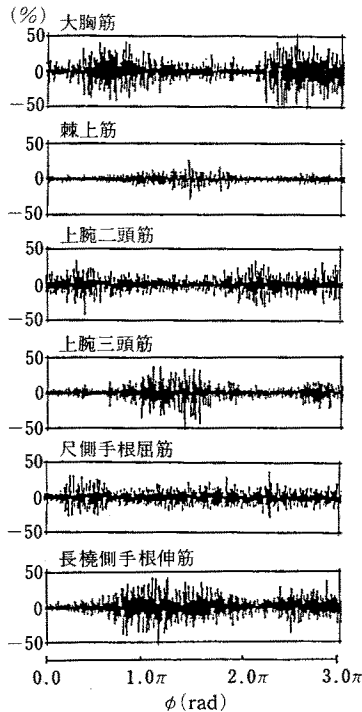


図9 クランク回転作業中に測定した筋電位波形

Fig. 9 Measured EMG signals during crank rotation tasks.

ん、法線方向内向きの力（クランクの回転中心方向への力）は負のスティフネスを発生させることになる。このような内力を利用したスティフネス制御法は、最近、ロボットマニピュレータのコンプライアンス制御を対象として提案されており<sup>19)</sup>、人間の制御方略をロボット制御と共通する観点で説明できることは興味深い。

さらに、位置制御モード ( $\phi = 2.5 \sim 3.0 \pi$  (rad)) の表面筋電位をみると、ほとんどすべての筋で同時活動が増加していることがわかる(図9)。このことは、手先のインピーダンス（粘弾性）が大きくなることを意味し、手先の動特性が制動のきいた系に切り換わっていることを示唆する<sup>20)</sup>。すなわち、人間は自らの腕を制動のきいた系に切り換えることによって、目標点まわりのクランク-腕の動特性を構造的に安定化しているのである。

## 5. まとめ

本稿では、拘束作業における人間の運動モデルを解明するための手がかりとして、クランク回転作業にお

ける人間の位置/力制御方略を実験的に解析した。まず、クランク回転作業を力制御モード、速度制御モード、位置制御モードに分割し、人間の制御方略を各モードごとにモデル化することを試みた。そして、各モードがそれぞれ仮想軌道と運動インピーダンスの設定という観点から説明できることを示した。拘束運動時には、運動変数だけでなく力変数の制御も必要になる。この両者を結びつける運動インピーダンスが、拘束作業遂行時に重要な役割を果たしていると考えられる。

今後は、力制御モード、速度制御モードの解析で採用した手先剛性一定の仮説を実験的に検証するとともに、手先レベルでの制御方略と関節（姿勢、冗長自由度）、筋レベル（粘弾特性）における制御方略との関連を解析し、拘束作業における運動制御方略をさらに明確にしていきたいと考えている。

おわりに、本実験に積極的に取り組んでくれた本学大学院生 横山尚之君（現 NTT データ通信(株)）に感謝いたします。また、本研究の一部は文部省科学研究費（03452188）および(財)日産科学振興財団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) 伊藤宏司, 伊藤正美: 生体とロボットにおける運動制御, 計測自動制御学会, 1991.
- 2) Flash, T. and Hogan, N.: The Coordination of Arm Movements: An Experimentally Confirmed Mathematical Model, *J. Neurosci.*, 5, 1688~1703, 1985.
- 3) Uno, Y., Kawato, M. and Suzuki, R.: Foundation and Control of Optimal Trajectory in Human Multi Joint Arm Movement—Minimum Torque Change Model, *Biol. Cybern.*, 61, 89~101, 1989.
- 4) Kawato, M., Fukuhara, K. and Suzuki, R.: A Hierarchical Neural Network Model for Control and Learning of Voluntary Movement, *Biol. Cybern.*, 57, 169~185, 1987.
- 5) Iberall, T.: A Neural Network for Planning Hand Shapes in Human Prehension, *Proceedings of Automation and Control Conference*, 2288~2293, 1988.
- 6) 副村直博, 宇野洋二, 鈴木良次, 川人光男: 対象物の形状認知と把握するための手の形の決定, 第5回生体・生理工学シンポジウム論文集, 1A 2-3, 37~40, 1990.
- 7) 片山正純, 川人光男: 視覚, 体性感覚と運動司令を統合する神経回路モデル, 日本ロボット学会

- 誌, 8, 757~764, 1990.
- 8) 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, 531~537, 1985.
  - 9) 末広尚士, 高瀬国克: 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, 499~506, 1988.
  - 10) 伊藤宏司, 辻 敏夫, 杉野 実: 回転作業における生体運動系のインピーダンス調節, 計測自動制御学会論文集, 26, 443~450, 1990.
  - 11) Hogan, N.: Impedance Control: An Approach to Manipulation, Part I, II, III, ASME J. Dynamic Syst., Meas., Cont., 107, 1~24, 1985.
  - 12) Dowben, R. M.: Contractility: Medical Physiology, Mountcastle, V. B. and Mosby, C. V. ed., 93, 1980.
  - 13) Hogan, N.: The Mechanics of Multi-joint Posture and Movement Control, Biol. Cybern., 53, 1~17, 1985.
  - 14) Polit, A. and Bizzi, E.: Characteristics of the Motor Programs Underlying Arm Movements in Monkeys, J. Neurophysiol., 204, 443~460, 1979.
  - 15) Bizzi, E., Accornero, N., Chapple, W. and Hogan, N.: Posture Control and Trajectory Formation during Arm Movement, J. of Neurosci., 4, 2738~2744, 1984.
  - 16) Hogan, N.: An Organizing Principle for a Class of Voluntary Movements, J. Neurosci., 4, 2745~2754, 1984.
  - 17) 辻 敏夫, 横山尚之, 三木義民, 伊藤宏司: 回転作業における人間の運動制御方策, 第5回生体・生理工学シンポジウム論文集, 41~44, 1990.
  - 18) 辻 敏夫, 三木義民, 伊藤宏司: 拘束動作における人間の手先力パターンと仮想軌道仮説, 計測自動制御学会論文集, 28, 366~373, 1992.
  - 19) Adli, M. A., Nagai, K., Miyata, K. and Hanafusa, H.: Study on Internal Forces and Their Use in Compliance Control of Parallel Manipulators, Proc. of 29th SICE Annual Conference, 853~856, 1990.
  - 20) 伊藤宏司, 辻 敏夫: 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, 9~16, 1985.
  - 21) 三木義民, 辻 敏夫, 伊藤宏司: クランク回転作業における生体運動系の力制御特性, 電子情報通信学会技術報告, MBE 90-44, 31~38, 1990.
  - 22) M. Katayama and M. Kawato: Learning Trajectory and Force Control of an Artificial Muscle Arm, 電子情報通信学会技術報告, NC 90-105, 219~224, 1991.
  - 23) T. Flash: The Control of Hand Equilibrium Trajectories in Multi-Joint Arm Movements, Biol. Cybern., 57, 257~274, 1987.
  - 24) C. G. Atkeson and E. Saund: Estimation of Equilibrium Position, Stiffness and Viscosity during Single Joint Arm Movement, Neurosci., 10, 335(Abst.), 1984.