

クランク回転作業における上肢姿勢の運動学的解析*

辻 敏夫**, 伊藤宏司**

The musculoskeletal system of human body is kinematically redundant. The number of degrees of freedom in the system is generally larger than the one needed to carry out given tasks. The present paper discusses how the human subjects determine their arm postures utilizing kinematic redundancy during crank rotation tasks. The 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 used different criteria for each control mode to determine their arm posture. The criteria are selected according to the tasks needed to be carried out and mechanical structure of musculoskeletal systems.

人間の筋骨格系は運動学的に冗長であり、作業空間での運動を実現するのに必要な自由度に比べて、一般に多くの自由度を備えている。本論文ではクランク回転作業を取り上げ、人間がどのような評価のもとで、この冗長自由度を利用し、自らの姿勢を選択しているかについて解析する。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、被験者は各モードごとに異なる評価のもとで上肢姿勢を選択していることが明らかになった。上肢姿勢を決定するための評価は、作業空間で要求される作業内容、筋や骨格の力学的な構造に基づいて選択されている。

(キーワード: 生体運動, 姿勢, 冗長自由度, 筋骨格系, 拘束作業, 回転作業)

1. まえがき

我々は筋を収縮させることによって各関節を動かし、手先や手で持った道具を作業空間内で位置決めする。あるいは、筋力を制御することにより関節トルクを生成し、対象物に加える手先の力・モーメントを決定する。このように人間の上肢運動は、作業部位（本稿では手先）、関節、筋の3つのレベルで制御されている。一般に上位中枢での運動計画は、作業空間に関して行われていることが知られている¹⁾。したがって、作業空間で計画された運動、力を実現するためには、それらを作業空間から関節空間、筋空間²⁾での表現に順次、上位中枢で変換し、各筋への運動司令を決定することが必要となる。

一方、我々の筋骨格系は、作業空間での運動を実現

するのに必要な自由度に比べて、はるかに多くの自由度を備えており、運動学的に非常に冗長な系となっている。たとえば自動車のハンドル操作であれば、作業に必要な自由度はわずか1である。これに対して肩、肘、手首からなる骨格系の自由度は、少なくとも7であり、また各関節に付着して腕の運動に関与する筋群は、少なく見積っても腕全体で20以上ある。したがって上位中枢は、ある作業空間の運動を実現するのに関節・筋の組み合わせを選択する必要がある。このような運動機構から生まれる冗長性は、付加的な拘束条件を与えないかぎり、作業空間の運動計画に対して関節空間、筋空間の運動・力が定められないことを意味する²⁾。

最近のロボット制御の分野においても、冗長マニピュレータ、双腕アーム、多指ハンドなど、多自由度で

注 それぞれ、作業座標系、関節座標系、筋座標系が張る空間を表す。関節座標系は関節変数（関節角度、あるいは関節トルク）、筋座標系は筋変数（筋長、あるいは筋張力）を各軸とする座標系である。

* 平成3年10月21日受付

** 広島大学 工学部

Faculty of Engineering, Hiroshima Univ.

冗長なリンク機構を取り扱うことが多い。このような運動系では、運動目的、外部環境などに応じて系の自由度を適切に拘束しなければならない。ロボット制御では、この拘束条件として関節変位最小⁹⁾、特異姿勢回避⁹⁾、関節トルク総和最小⁹⁾、アクチュエータ消費エネルギー最小⁹⁾などが、これまで提案されている。生体運動系はどのような拘束条件を課して、関節・筋レベルの運動および力を決定しているのだろうか。

本稿では、外部環境（作業対象物）との接触を伴うような拘束運動を取り上げ、拘束運動時の上肢姿勢を運動学的に解析する。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、人間の手先の制御方策が運動インピーダンスと仮想軌道を用いて説明できることを示した⁷⁾。この作業は、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からなっている。本稿では、各モードにおける被験者の上肢姿勢を解析し、人間が目的とする作業に応じてどのような評価基準のもとで上肢姿勢を決定しているかを明らかにする。以下、まずクランク回転実験とその結果を示し、ついで各制御モードにおける人間の四肢姿勢を運動学的に解析する。

2. クランク回転実験

本稿で取り上げるクランク回転作業については、文献7)で詳しく説明しているのので、ここでは実験方法、実験結果について簡単に述べる。

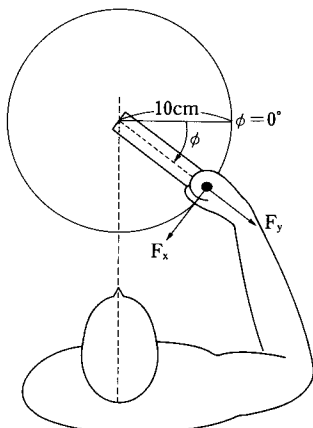


図1 クランク回転作業と座標系
Fig. 1 Crank rotation tasks and coordinate systems.

2-1. 実験方法

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 $\phi = 0^\circ$ の位置に静止させたクランクを、右腕で時計回りに1回転半させる(図1)。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。クランクの半径は 10 cm、目標回転速度は $0.5\pi, \pi, 1.5\pi$ (rad/sec)、回転に関する静止摩擦力(図1 F_x 方向)は 3.0, 2.0, 1.0, $0.07(\times 9.8 \text{ N})$ 、クーロン摩擦力(図1 F_x 方向)は 1.81, 1.35, 0.82, $0.05(\times 9.8 \text{ N})$ に設定し、熟練後、各条件につき 20~30 試行を行った。なお、被験者は 3 名(右利き)である。

運動の計測は、クランクのハンドルに取りつけた歪ゲージ、2台の PSD カメラ(浜松ホトニクス製)、クランク回転軸に取りつけたロータリエンコーダ(小野測器製)、生体アンプ(日本光電製)により、それぞれ被験者の手からクランクのハンドルに作用する力(図1の F_x および F_y 方向以外の力は除く。以下、手先力とよぶ)、上肢の三次元位置、クランク回転角度、表面筋電位を測定した⁷⁾。

2-2. 実験結果

図2は目標回転速度 π (rad/sec)、静止摩擦力 $1.0(\times 9.8 \text{ N})$ 、クーロン摩擦力 $0.82(\times 9.8 \text{ N})$ のときの実験結果(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)を、1名の被験者について3試行重ね書いたものである。図中の点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、速度が減少し停止するまでの位置制御の各モードで構成されている。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2から、接線方向の手先力 F_x は速度制御、位置制御中、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 は速度制御ではやや外向きの小さな値であったものが、位置制御に切り換わる頃から大きくなっている。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で切り換えていると考えられる。なお、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四肢姿勢を運動学的な観点から解析する。以下の図4~11はすべて、同一の被験者による実験結果である。

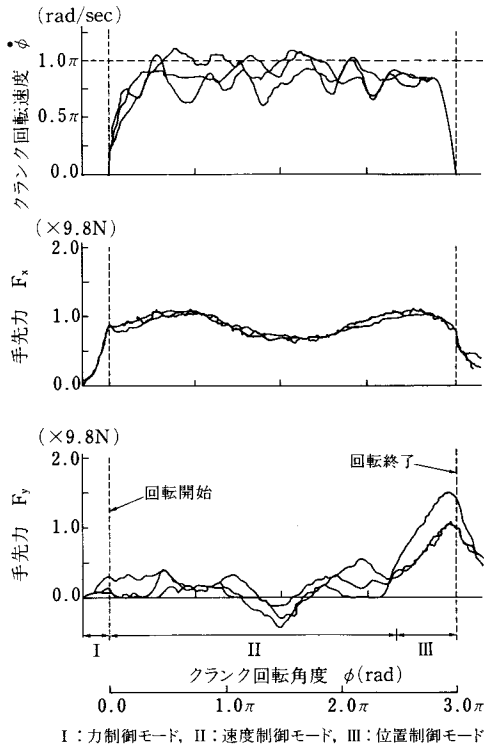


図2 実験結果の一例。目標回転速度 π (rad/sec), 静止摩擦力 $1.0(\times 9.8\text{ N})$, クーロン摩擦力 $0.82(\times 9.8\text{ N})$

Fig. 2 An example of experimental results. Desired rotation velocity π (rad/sec), Static friction $1.0(\times 9.8\text{ N})$, Coulomb friction $0.82(\times 9.8\text{ N})$.

3. 冗長自由度と上肢姿勢の選択

人間の上肢は、図3に示すように肩関節に3自由度、

肘関節に1自由度、手首関節に3自由度、合計7自由度(各関節角度は図3aの状態を 0° とし、矢印方向の回転を正とする)を有し、作業空間のタスクに対して冗長になっている。したがって、なんらかの拘束条件を課さないかぎり、上肢の姿勢を決定することができない。本章では、作業空間のタスクに対して、人間がどのような評価基準に基づいて上肢の冗長自由度を拘束しているかを解析する。このため①手先力の生成を要求しない単なる把持姿勢(以下、基本姿勢とよぶ)、②ハンドルを把持して前後左右に手先力を生成する場合(力制御モード)、③クラックを回転させる場合(速度制御モード、位置制御モード)について、上肢の姿勢、筋電位、手先力を測定した。

3-1. 基本姿勢

まず、力がどの方向にもかからないようにハンドルを軽く把持したときの上肢の基本姿勢を計測した。一般に、拘束運動における腕の運動方程式は

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

と記述することができる。ここで $M(\theta) \in \mathbb{R}^{7 \times 7}$ は慣性行列、 $h(\theta, \dot{\theta}) \in \mathbb{R}^7$ は遠心力・コリオリ力、 $g(\theta) \in \mathbb{R}^7$ は重力項、 $\theta \in \mathbb{R}^7$ は関節角度、 $\tau \in \mathbb{R}^7$ は関節駆動トルク、 $F \in \mathbb{R}^3$ は外力(添字 l は作業空間の自由度)、 $J(\theta) \in \mathbb{R}^{3 \times 7}$ はヤコビ行列、添字 T は転置行列を表す。基本上肢姿勢では、ハンドルからの反力は $F = 0$ であり、また上肢は静止しているので、慣性力項と遠心力・コリオリ力項も0である。したがって、基本上肢姿勢を維持するためには、重力に抗する関節トルク $g(\theta)$ のみが必要となる。

この関節トルクは上肢の姿勢角 θ の関数である。そこで、実験で計測した被験者の基本上肢姿勢をもとに、手首の位置は固定したまま、上肢の冗長性を利用して肘の位置を肩の高さから少しずつ下げ(手首関節と肩

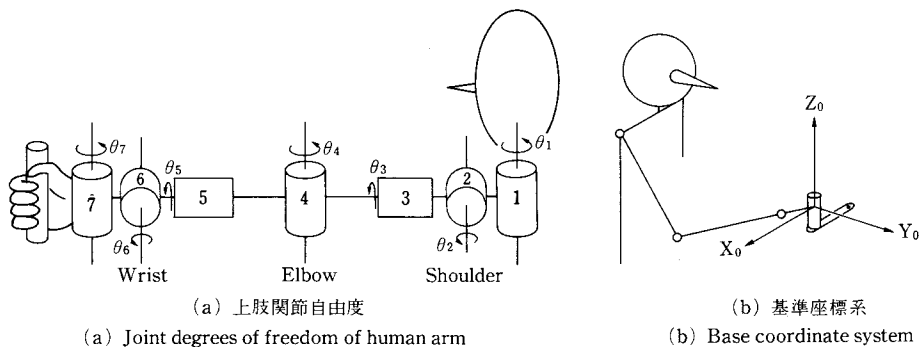


図3 上肢関節自由度と基準座標系

Fig. 3 Joint degrees of freedom of human arm and base coordinate system.

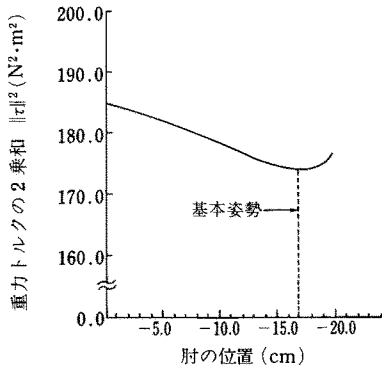


図4 肘の位置（鉛直方向）と重力トルクの関係
 Fig. 4 A relationship between vertical positions of the elbow joint and gravitational torques acting on the human arm.

関節を結ぶ直線回りに前腕と上腕を含む面を回転させた), 最も低い位置まで変化させたときの抗重力に必要な関節トルクを計算した。図4にこの重力トルクの2乗和

$$\|\tau\|^2 = \|g(\theta)\|^2 = \sum_{i=1}^7 g_i^2(\theta) \quad (2)$$

を示す。横軸は肩関節の位置を0としたときの肘の高さで、縦軸は重力トルクの2乗和である。図4から、重力トルクの2乗和は特定の肘の高さに対して最小値をとり、最も重力の影響を受けない上肢姿勢が存在す

ることがわかる。一方、図中の点線(-16.8 cm)は被験者が基本上肢姿勢で選択した肘の高さであり(図5の点線), 計算した最小トルクの上肢姿勢と一致している。すなわち、手先力を必要とせず、単に対象物に触れるだけの場合、被験者は抗重力トルク最小という拘束条件を課して上肢の姿勢を選択していると考えられる。

3-2. 力制御モードにおける上肢姿勢の変化

クランクの回転が始まるまでの力制御モードにおいては、被験者は固定されたクランクのハンドルに静止摩擦力に達するまで力を加えることになる。そこで、手先力の方向や大きさによる力制御モード時の上肢姿勢の変化を調べるため、 $\phi = 0^\circ$ の位置に固定したクランクのハンドルに力を加える実験を行った。

手先力は前後左右の方向(基準座標系の Y_0 , $-Y_0$, $-X_0$, X_0 方向, 図3 b)に、4.0, 8.0, 12.0($\times 9.8$ N)の各3種類, 計12種類とした。また、被験者には目標手先力と実際の手先力をオシロスコープを用いて表示し、両者を一致させるように指示した。力制御モードでは、ハンドルは動かないので、作業空間6自由度のうち、位置3自由度と姿勢2自由度(基準座標系の Z_0 軸回りの自由度を除く2自由度)が拘束される。したがって被験者は、残り2自由度、すなわち Z_0 軸回りの手首の回転と肘の位置を、関節の可動範囲内で任意に選択することができる。

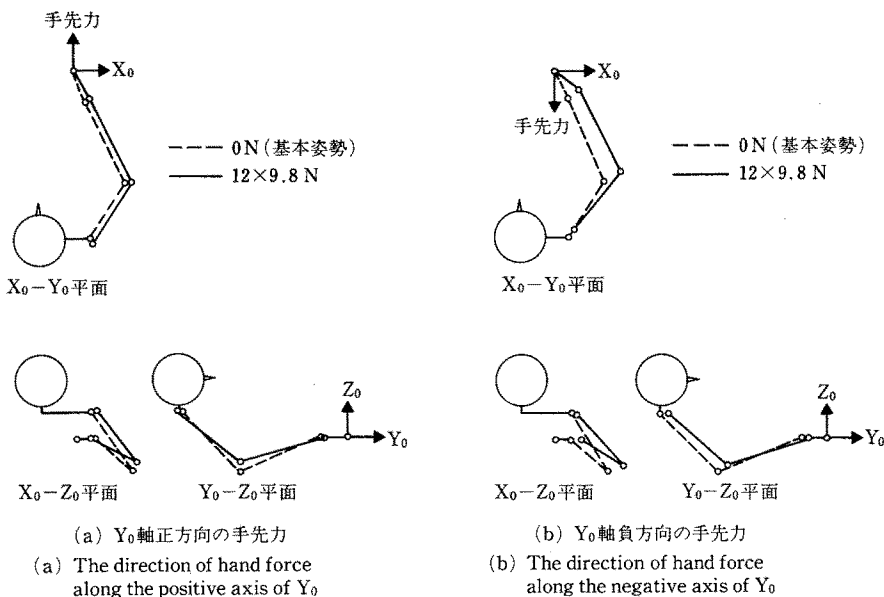


図5 力制御モードにおける上肢姿勢
 Fig. 5 Arm postures during force control mode.

図5に測定した被験者の上肢姿勢を、 X_0-Y_0 (水平面)、 X_0-Z_0 (背面)、 Y_0-Z_0 (側面)に投影した結果を示す。図5 aは Y_0 方向、図5 bは $-Y_0$ 方向に手先力を加えた場合である。力を加える方向や大きさにより姿勢が変化していることがわかる。特に、手先力が大きくなると肘の位置が高くなり、力の方向により手首関節や肘の高さが異なっている。

(1) 手先力の大きさの影響

3-1節の基本姿勢で述べたように、肘の位置が高くなると大きな重力トルクが作用する。にもかかわらず大きな手先力を必要とする場合には、被験者は高い肘の位置を選択している(図5)。このことは、被験者が抗重力の評価基準だけでなく、力の加えやすさなど別の評価基準も加味して姿勢を選択していることを示唆している。

ここで、手先でハンドルを把持したとき、肘の高さにより手首の尺屈角度 θ_6 (図3 a)が変化することに注目する。図6は、手先力を横軸にとり、手首の尺屈角度 θ_6 をプロットしたものである。図中の○印は Y_0 方向、×印は $-Y_0$ 方向、△印は X_0 方向、□印は $-X_0$ 方向を、●印は基本姿勢を示す。力を加える方向にかかわらず、手先力の増加に伴って尺屈角 θ_6 、すなわち手首と前腕のなす角度が小さくなることがわかる。なお、同様の現象が手の把持動作に関して指摘されている⁹⁾。

この現象は、手首に作用する筋と関節運動との関係から説明することができる。手首の構造上、掌屈(図3 a、 θ_6 軸正回転)と尺屈(図3 a、 θ_6 軸正回転)は主に尺側手根屈筋、背屈(図3 a、 θ_6 軸負回転)と橈屈(図

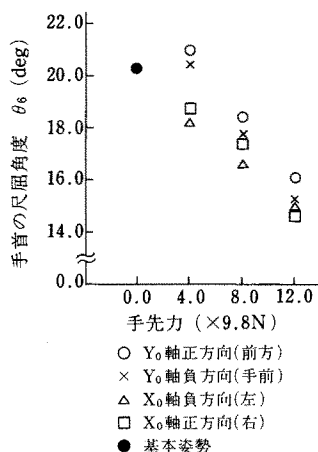


図6 力制御モードにおける手首の尺屈角度

Fig. 6 Ulnar deviation angles of the wrist joint during force control mode.

3 a、 θ_6 軸負回転)は主に橈側手根伸筋の作用が、機能上重要であることが知られている⁹⁾。しかし、尺屈角度が大きくなると尺側手根屈筋が縮み、橈側手根伸筋が伸びてしまうため、筋の働きが制約されることになる¹⁰⁾。このため、被験者は肘を上げて手首の尺屈角度を小さくすることにより、手首の筋の働きを強め、効果的に手先に力を伝達しているのである。

(2) 力の方向の影響

次に、力の方向による上肢姿勢の変化を調べてみよう。作業空間の手先力 $F \in R^5$ と関節トルク $\tau \in R^7$ との間には、

$$\tau = J(\theta)^T F \quad (3)$$

のような関係がある。ここで、 $J \in R^{5 \times 7}$ はヤコビ行列である。同様に対応する手先変位 $dX \in R^5$ と関節角変位 $d\theta \in R^7$ の間には

$$dX = J(\theta) d\theta \quad (4)$$

が成り立つ³⁾。

まず、 12.0×9.8 Nの手先力を発生するのに必要な関節トルク τ を、図5の各姿勢について(3)式より求め、その2乗和

$$\|\tau\|^2 = \sum_{i=1}^7 \tau_i^2 \quad (5)$$

を計算した。また、手先位置を5 cmだけ手先力の方向に動かすために必要な関節変位 $d\theta$ を、擬似逆行列 $J^*(\theta)$ を用いて

$$d\theta = J^*(\theta) dX \quad (6)$$

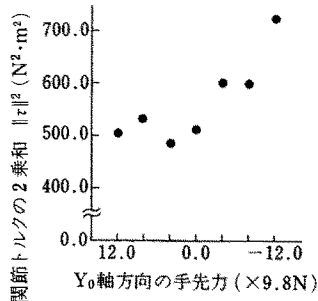
より求め³⁾、その2乗和

$$\|d\theta\|^2 = \sum_{i=1}^7 d\theta_i^2 \quad (7)$$

を計算した。図7に結果の一例を示す。横軸は各実験条件に対応した被験者の Y_0 軸方向の手先力を表す。

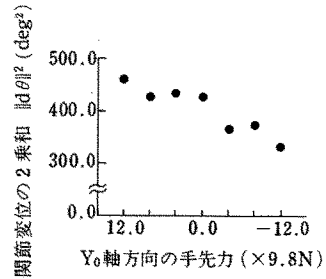
図7より、 Y_0 軸正方向(前方)に力を加えるときの、上肢姿勢では、関節トルクの2乗和は小さくてすむが、関節変位の2乗和が大きくなる傾向がみられる。一方、 Y_0 軸負方向(手前)のときの上肢姿勢では、逆に関節トルクの2乗和が大きくなり、関節変位の2乗和は小さくなる。つまり被験者は、同じ Y_0 軸方向に力を加える作業でも、正方向は関節トルクが小さくなる上肢姿勢、負方向は関節変位が小さくなる上肢姿勢を選択していることになる。

この理由を調べるため、力制御中の被験者の筋電位を測定した。図8は、 12.0×9.8 Nの手先力を Y_0 軸正方向(図8 a)、 Y_0 軸負方向(図8 b)に加えたときの整流平滑筋電位である。ただし、最大随意収縮時の値を100%として規格化している。図8 bでは主に手首の屈筋が活動しているが、図8 aでは手首に加えて、肘の伸筋の働きが活発である。身体から離れる方向に



(a) 関節トルクの2乗和

(a) Squared sums of joint torques

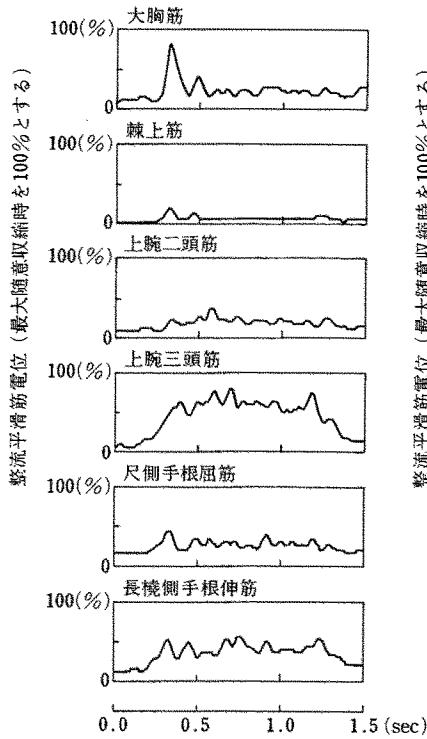


(b) 関節変位の2乗和

(b) Squared sums of joint displacements

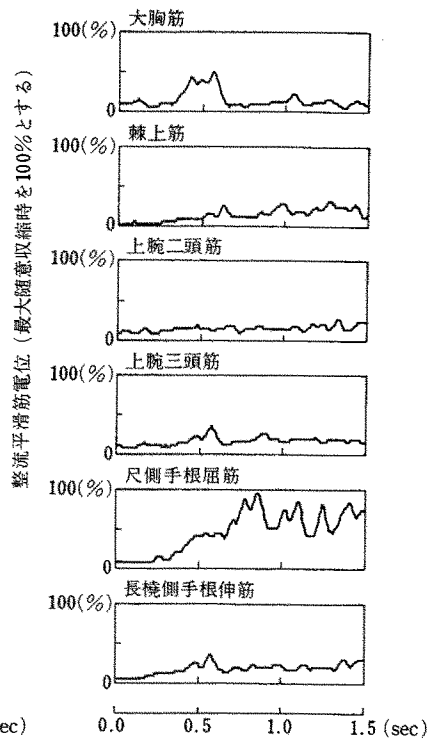
図7 関節トルクと関節変位の2乗和 (Y₀軸方向の手先力)

Fig. 7 Squared sums of joint torques and displacements. The direction of hand force is along the Y₀ axis.



(a) Y₀軸正方向の手先力

(a) The direction of hand force along the positive axis of Y₀



(b) Y₀軸負方向の手先力

(b) The direction of hand force along the negative axis of Y₀

図8 力制御中に測定した筋電位

Fig. 8 Measured EMG signals during force control.

手先力を加える場合 (図8 b) には、各関節の伸筋を使うことになるが、伸筋は屈筋と比べて発生できる筋力が小さいため、大きな力を加えるには不都合である。したがって、このような場合には関節トルクを効率よ

く手先に伝達する必要がある。一方、Y₀軸負方向 (図8 a) では、手首の屈筋を使うことが可能であるため、クランクの回転に備えて手先位置の操作に有利な上肢姿勢を選択している。なお、以上の傾向はX₀軸方向に

についても同様に観察された。

3-3. 速度制御モードにおける上肢姿勢の変化

図9はクランク回転中(回転角 $\phi = 0 \sim 3\pi$ (rad))の上肢の各関節角度を示したもので、破線は静止摩擦力を 3.0×9.8 N (クーロン摩擦力 1.81×9.8 N)、実線は 1.0×9.8 N (クーロン摩擦力 0.82×9.8 N)、点線は 0.07×9.8 N (クーロン摩擦力 0.05×9.8 N) に設定した場合の実験結果である。速度制御モード ($\phi = 0 \sim 2.5\pi$ (rad)) においては、肩・肘関節は回転と

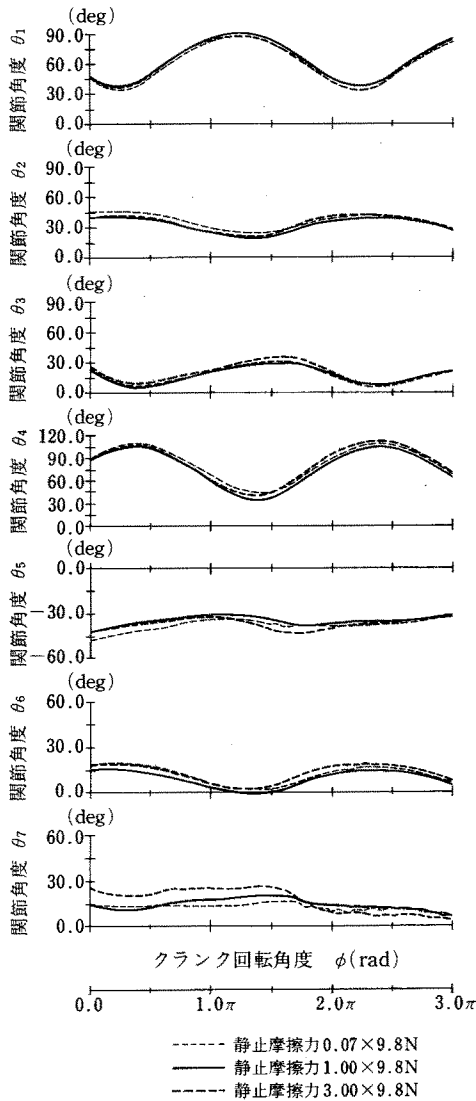


図9 クランク回転中の上肢姿勢
Fig. 9 Arm postures during crank rotation tasks.

もに伸展から屈曲へと滑らかに変化しており、摩擦力による違いも小さい。これに対して手首関節の掌背屈角度に相当する θ_7 は、回転中ほとんど変化せず、被験者が手首関節回りの粘弾性を大きくして、関節をロックしていることがわかる¹⁴⁾。また、摩擦力が大きくなるにつれて屈曲の度合が増加する傾向がみられる。

そこで、速度制御モードにおける上肢の姿勢選択の方策を探るため、手首の屈曲角度 (θ_7) を固定し、そのほかの関節角度を(6)式の擬似逆行列を用いて求めた。図10に結果の一例を示す。図中の実線は静止摩擦力

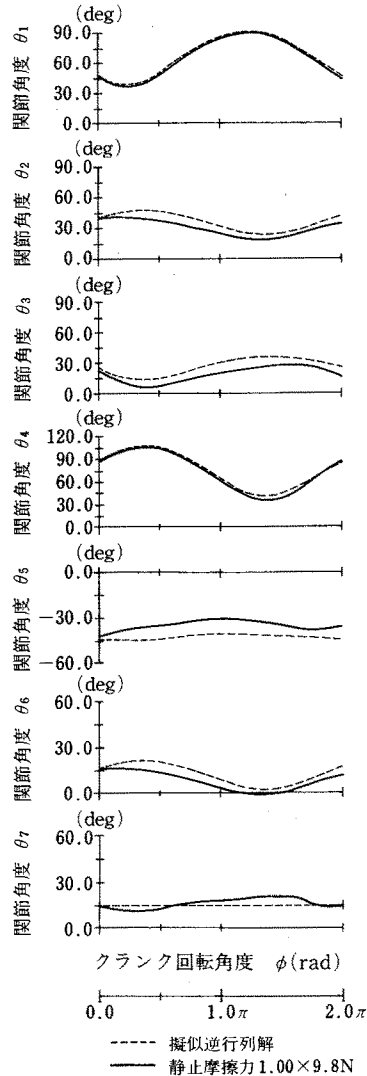


図10 擬似逆行列を用いて計算した上肢姿勢
Fig. 10 Arm postures computed by using pseudo inverse matrices.

1.0×9.8 Nにおける関節角度、点線は擬似逆行列を用いて求めた関節角度を表す。肩・肘関節についてはほぼ一致していることがわかる。擬似逆行列で求めた関節角度(図9点線)は、手首の屈曲角度は維持しながら、それ以外の関節の動きをできるだけ小さくする解を意味している。つまり、速度制御モードにおいては、手首関節の屈曲自由度を拘束したうえで、それ以外の関節速度の2乗和ができるだけ小さくなるような上肢姿勢を被験者が選択していることがわかる。より厳密には、動力学的な干渉など他の要因が姿勢に与える影響も考慮する必要があるが、定性的には上述のような運動学的な解析で十分であろう。

3-4. 位置制御モードにおける上肢姿勢の変化

次に、クランクの回転を停止し、目標位置にハンドルを位置決めするという位置制御モード(クランク回転角 $\phi=2.5\sim 3\pi$)について調べてみよう。図9から、位置制御モードでは前半の速度制御モードに比べて、手首の屈曲角度(θ_7)が小さくなっていることがわかる。この作業ではクランクを1回転半させているので、位置制御モードと同じ箇所を、前半の速度制御モードでも通過している。そこで、クランク回転角 $\phi=0.75\sim 1.0\pi$ (rad)のときの上肢姿勢を、位置制御モードと速度制御モードで比較してみた。

図11は、3-2節と同様に、各姿勢を関節トルクと関節角変位の2乗和(5),(7)式で評価した結果である。ただし、手先力は 3.0×9.8 N、手先変位は5.0 cmで、方向は実験で得られた手先力の方向を用いた。図11から、位置制御モードでは、同じ手先力を生成する場合でも関節トルクが少なくすむ姿勢を選択している。これは2-2節で述べたように、位置制御モードでは法線方向の手先力を増加させる制御方策をとっている

ためである。一方、速度制御モードでは、逆に関節角変位(角速度に対応する)の2乗和が少なくすむような姿勢を選択している。このように被験者は、作業空間(手先)で要求される作業に応じて、自らの上肢姿勢を選択していることがわかる。

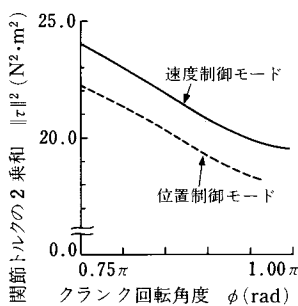
4. まとめ

人間の筋骨格系は、作業空間での運動を実現するのに必要な自由度に比べて、はるかに多くの冗長自由度を備えている。本稿では、外部環境(作業対象物)との接触を伴うような拘束運動の一例としてクランク回転作業を取り上げ、人間がどのような評価のもとで、この冗長自由度を利用し、自らの姿勢を決定しているかについて実験的に解析した。

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、人間が各モードごとに異なる評価のもとで上肢姿勢を選択していることを明らかにした。上肢姿勢を決定するための評価は、要求される作業内容、筋や骨格の力学的な構造を考慮することで、うまく説明することができる。本稿で得られた結果は、単に人間の運動メカニズムの解明だけでなく、冗長な運動機構を有するロボット制御問題に対しても有用な基礎資料となりうる。

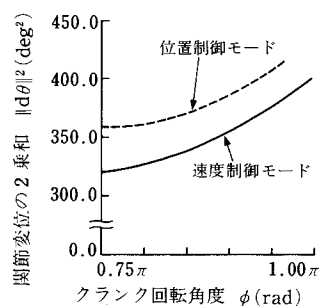
今後は、作業空間、関節空間における制御方策と筋空間の制御方策(筋への運動指令の生成法)との関わりを解析する必要があると考えている。

最後に、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)および財団法人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。



(a) 関節トルクの2乗和

(a) Squared sums of joint torques



(b) 関節変位の2乗和

(b) Squared sums of joint displacements

図11 位置・速度制御モードにおける関節トルクと関節変位の2乗和

Fig. 11 Squared sums of joint torques and displacements during position and velocity control modes.

参考文献

- 1) 田中啓治：視覚と運動の脳内過程，伊藤正男，佐伯 胖編：認識し行動する脳，112～149，東京大学出版会，1988.
- 2) 川人光男：学習制御の不良設定性と神経回路モデル，第32回自動制御連合講演会前刷，1～4，1989.
- 3) D. E. Whitney：Resolved Motion Rate Control of Manipulators and Human Prostheses, IEEE Trans. Man-Machine Systems, MMS-10 (2), 47～53, 1969.
- 4) 吉川恒夫：ロボットアームの制御方式，計測と制御，25(1)，37～44，1986.
- 5) J. M. Hollerbach and K. C. Suh：Redundancy Resolution of Manipulators through Torque Optimization, IEEE J. of Robotics and Automation, RA-3(4)，308～314，1984.
- 6) M. Vukobratovic and M. Kircanski：A Dynamic Approach to Normal Trajectory Synthesis for Redundant Manipulators, IEEE Trans. Systems, Man and Cybernetics, SMC-14 (4), 580～586, 1984.
- 7) 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研究報告，MBE 90-44，31～38，1990.
- 8) Kunji Asano：Human Arm Kinematics, H. Miura and S. Arimoto (ed.), Robotics Research, 5, 285～288, MIT Press, Cambridge, 1990.
- 9) 中村隆一，斉藤 宏：基礎運動学，医歯薬出版，1979.
- 10) E. R. Tichauer：The Biomechanical Basis of Ergonomics—Anatomy Applied to the Design of Work Situations, A Willey Interscience Publication, 1978.
- 11) 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(4)，443～450，1990.