

## 拘束作業における人間の制御方策と運動内部モデルに関する研究

A study on control strategy and internal motor model of human movements during constrained tasks

代表研究者 広島大学工学部助手 辻 敏夫  
Res. Assoc., Faculty of Enging., Hiroshima Univ.  
Toshio TSUJI

This paper analyzes control strategy of human movements during constrained tasks. Firstly, position and force control characteristics during crank rotation are kinematically modeled on the basis of experimental results. It is shown that the human subjects can perform the tasks skillfully and their control strategy can be explained from the points of view of motor impedance and virtual trajectory. Then, a new method for estimation of hand impedance during the constrained motion is developed. The method can estimate not only hand stiffness but also viscosity and inertia. Finally, a neural network model for hand impedance regulation is proposed. The neural network can regulate hand impedance through iterative learning and realize smooth virtual trajectory. Results of this research are also useful for development of artificial limbs such as robot manipulators and prostheses.

### 研究目的

人間の運動制御の本質は、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。特に、組立作業、ドアの開閉、道具の使用などの日常よく生じる作業のように対象物に接触しながら、これを操作しようとするときには、対象によって規定される拘束に応じて力と位置を同時に制御する必要がある。

人間は、手先の運動インピーダンス（剛性、粘性、慣性）を巧みに調節することにより、このような動的なハイブリッド制御を実現していると考えられる。すなわち、位置を制御する方向と力を制御する方向に適切なインピーダンスを設定することにより、位置と力の制御を統一的に扱うのである。人間の筋骨格系には、筋の変粘弾性や腱系による筋紡錘感度調節などの巧妙なインピーダンス調節機構が備わっており、筋レベルのインピーダンス調節が可能になっている。

一方、ロボット制御の分野においても、このインピーダンス調節の重要性は指摘されており、いくつかの手法が提案されている。しかしながら、

人間に匹敵するような優れた調節法は実現されておらず、十分な理論的体系化、制御系設計法の確立もなされていない。この主な理由は、作業内容に応じて手先にどのようなインピーダンスを設定すればよいかというインピーダンス・プランニングの問題が明らかにされていないためである。

そこで本研究では、拘束運動時の人間の手先インピーダンス設定法を実験的に解析し、そのプランニング方策を明らかにすることを試みる。そのため、①拘束運動時の人間の手先の位置・力制御特性を動作実験により明らかにし、システム・制御論の観点から人間の制御方策をモデル化する。同時に、②人間の手先インピーダンスを実験的に計測する方法を開発し、拘束作業時の人間のインピーダンス設定方策を解析する。そして、③作業に応じたインピーダンスパラメータがニューラルネットワークを用いた運動内部モデルにより、学習的に実現できることを明らかにする。

### 研究経過

本研究は、①拘束運動における人間の制御方策の力学解析、②人間の手先インピーダンス推定実

験、③ニューラルネットによる運動内部モデルの構成の3段階で実施した。以下に、研究経過について概説する。

#### ①拘束運動における人間の制御方策の力学解析

まず、拘束運動時の人間の運動モデルを解明するための手がかりとして、クランク回転作業を取り上げた。この作業は、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もので、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いる。このため、被験者は手先の拘束のもとで、これらの制御モードを適宜、切り替えながら作業を遂行せねばならない。この実験結果から、(1)人間の手先の位置・力制御特性、(2)手先インピーダンスと仮想軌道の関わり、(3)力制御時の人間の軌道計画法、(4)冗長自由度を利用した人間の腕姿勢選択基準などを解析した。

#### ②人間の手先インピーダンス推定実験

人間の手先インピーダンスを実験的に推定するためには、作業中の人間の手先に外部から強制的な変位を与え、それに対応して発生する力を測定せねばならない。そこで、本研究ではダイレクトドライブ・ロボット（平面2関節型：(株)神戸製鋼所製）を能動的な作業対象物として利用する。まず、ロボットのハンドの軌道を並列演算器（トランスピュータ：(株)神戸製鋼所製）を用いて制御し、このロボットのハンドを被験者に握らせる。そして拘束作業を被験者に行わせ、この作業中にロボットを制御して人間の手先に強制的な変位を与える。このときの被験者の筋電位、関節角度、手先力、手先運動を測定し、作業中の人間の手先インピーダンスを同定する。本研究では、このような実験装置を開発し、人間の手先インピーダンス推定法を考案するとともに、拘束作業時の人間の手先インピーダンス特性を明らかにすることを試みた。

#### ③ニューラルネットによる運動内部モデルの構成

外部環境の変化や作業目的、対象物の特性などに応じて、学習的にインピーダンスパラメータを調節可能な運動内部モデルを、誤差逆伝搬型ニューラルネットを用いて構築する。まず、インピーダンス制御系に関する理論的考察に基づき、インピーダンス制御系の位置制御器、速度制御器、力制御器に対応して、3種類のニューラルネットを用意する。そして、腕を繰り返し動作させながら、自由運動時の追値制御特性、拘束運動時の力制御特性の順にニューラルネットの学習を行う。本研究では、このような運動内部モデルを構築するため、ネットワーク構造の設計、エネルギー関数の設定、新しい学習則の開発を行うとともに、計算機シミュレーションによりその有効性を確かめた。

#### 研究成果

本研究の結果、以下に示す点が明らかになった。

##### ①拘束運動における人間の制御方策の力学解析

- ・クランク回転作業を構成する力制御、速度制御、位置制御の各モードにおける人間の制御方策を、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<sup>3)</sup>。

- ・人間はあらかじめ運動のプランニングを立ててこの作業を行っており、それはインピーダンスパラメータの形で計画されることが明らかになった<sup>1),3)</sup>。

- ・人間は屈筋・伸筋の同時活動というインピーダンス調節機構をうまく利用して、運動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<sup>1),3)</sup>。

- ・物体に力を加える場合、手先力のパターンは滑らかに変化し、その微分値の形状はほぼベル型を示すことが明らかになった<sup>1)</sup>。

- ・拘束運動時の人間の手先力パターンは、手先剛性を一定に保ち、仮想軌道を躍度最小評価により計画することで説明できた<sup>1)</sup>。

- ・人間は対象とする作業の目的に応じて、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<sup>2)</sup>。

・人間が拘束運動時に用いる姿勢選択のための評価基準は、筋骨格系の力学構造、要求される作業内容によって決定されることを示した<sup>2)</sup>。

### ②人間の手先インピーダンス推定実験

・ダイレクトドライブ・ロボットを用いて、人間の手先インピーダンスを推定する方法を開発し、手先動特性を十分把握できることを確認した<sup>5), 8)</sup>。

・位置制御中の被験者の手先剛性と手先粘性は、ほぼ比例関係にあることが明らかになった<sup>8)</sup>。

・力制御中の被験者の手先剛性、手先粘性、および手先の仮想平衡点は、いずれも手先力の増加に伴って増加することを示した<sup>5)</sup>。

### ③ニューラルネットによる運動内部モデルの構成

・誤差逆伝搬型ニューラルネットを利用したインピーダンス制御系の構成法を提案し、繰り返し制御を利用した新しい学習法を導出した<sup>4), 6), 7)</sup>。

・慣性、粘性、剛性、および仮想軌道のすべてのインピーダンスパラメータを学習的に調節できることを示した<sup>4), 7)</sup>。

・誤差関数の定義に窓関数を導入することにより、未来の誤差を考慮した形で学習則を導出できることを示した<sup>4)</sup>。

・学習により、自由運動から拘束運動への滑らかな移行を実現できることを示した<sup>4)</sup>。

### 今後の課題と発展

本研究では、①拘束運動における人間の制御方策の力学解析、②人間の手先インピーダンス推定実験、③ニューラルネットによる運動内部モデルの構成という三つの研究課題を通じて、拘束作業における人間の制御方策を明らかにすることを試みた。本研究により得られた結果は、単に人間の運動メカニズムの解明だけでなく、人工肢（ロボット、義手、義足、装具など）を開発する際の重要な基礎資料となり得ると考えている。

しかしながら本研究にはいくつかの研究課題が残されている。まず、①に関しては、対象とする作業を拡張する必要がある。クランク回転作業は、ドアの開閉やハンドル操作といった日常よく

見られる回転作業の一つではあるが、人間の運動の特徴をすべて含んでいるわけではない。今後、他の作業を取り上げ、運動モデルをより一般化する必要がある。②に関しては、より幅広い条件下での手先インピーダンスを測定する必要がある。本研究では、インピーダンス推定法の確立、実験装置の開発に研究期間のほとんどを費やざるを得なかったため、今後、実験を継続し、人間のインピーダンス設定法のモデルをより明確にする必要がある。③に関しては、ある程度、一般的なニューラルネットモデルを構築することができ、ロボット制御に有効であることを示した。ただし、本研究の結果は数理的な学習則の開発などに主眼が置かれていたため、①、②で得た実験結果を十分に反映しているとは必ずしも言い難い。今後、人間の運動制御の特徴をニューラルネットモデルに構造的に取り込む必要があると考えている。

人間の運動制御能力は、その適応性、柔軟性、学習能力など、現在の人工肢制御技術ではまだ実現できないような優れた特徴を備えている。今後、本研究の継続を通じて人間の運動制御の本質を少しでも明らかにすることができればと考えている。

### 発表論文リスト

#### [学術雑誌論文]

- 1) 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(3), pp. 366-373 (1992).
- 2) 辻 敏夫, 伊藤宏司: クランク回転作業における上肢姿勢の運動学的解析, 人間工学, 28(3), pp. 149-157 (1992).
- 3) 辻 敏夫, 伊藤宏司: クランク回転作業における人間の位置/力制御方策, 人間工学, 28(4), 1992 (掲載予定).
- 4) 辻 敏夫, 西田正孝, 伊藤宏司: ニューラルネットによるインピーダンスパラメータの繰り返し学習, 計測自動制御学会論文集, 28(12), 1992 (掲載予定).

#### [口頭発表]

- 5) 辻 敏夫, 三木義民, 伊藤宏司: 拘束運動における人間の制御方策-力制御時の人間の手先動特性の推定, 第6回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp. 333-336 (1991).
- 6) 西田正孝, 辻 敏夫, 伊藤宏司: ニューラルネッ

トによるマニピュレータの手先インピーダンス調節, 第1回インテリジェントシステムシンポジウム, pp. 113-118 (1991).

- 7) 西田正孝, 辻 敏夫, 伊藤宏司: 学習によるマニピュレータのインピーダンス調節, 計測自動制御

学会中国支部シンポジウム・学術講演会予稿集, pp. 122-123 (1991).

- 8) 三木義民, 辻 敏夫, 伊藤宏司: 拘束作業における人間の手先動特性, 電子情報通信学会技術報告, NC91-144, pp. 91-98 (1992).