

# ロボットインピーダンスに対する人間の知覚能力の解析

辻 敏夫\* 島崎知之\* 金子 真\*

## Analysis of Human Perception Ability for Robot Impedance

Toshio Tsuji\*, Tomoyuki Shimazaki\* and Makoto Kaneko\*

In this paper, human perception ability for robot impedance is analyzed. First, a human-robot system is constructed using impedance control, where a subject can move the robot freely by his end-point, and two kinds of experiments are performed: single impedance perception and single impedance discrimination. Then, from the experimental results, the accuracy and the differential limen are discussed. Also, it is shown that the human perception ability decreases dramatically under some situations such as multiple impedance perception and large robot viscosity. The results of the present paper could be effective as basic data in presenting the robot impedance to human operators in the rehabilitation system and human-robot systems.

**Key Words:** Impedance, Perception, Human Movements, Training

### 1. はじめに

人間は環境に適応して生きていくために、感覚受容器が高度に発達しており、高次の知覚機能を有している。そしてこのような感覚・知覚機能により、自己および外界の情報を受容・認知し、行動の手掛かりとすることができる。したがって、感覚・知覚が十分に機能しない場合は、自己の状態および周囲の環境を正確に認知することや、環境に適応した行動をとることが困難もしくは不可能となる。このような障害を感覚・知覚障害と呼び、従来から多くの感覚・知覚訓練法が提案されてきた [1]。特に感覚、知覚能力に果たす運動の重要性は広く認められており、運動訓練を行うことにより感覚・知覚能力を回復させようという試みが一般に行われている。運動と感覚が統合して感覚運動の能力が培われることにより、知覚能力が形成されるからである [2]。

一方、我々が運動を行う場合、運動内容に応じて腕や脚の特性を巧みに調節している。このような人間の調節能力は一般に剛性、粘性、慣性といった機械インピーダンスを用いて表現することができ、人間が姿勢や筋の収縮レベルを変化させてインピーダンスを調節していることはよく知られている [3]~[6]。したがって、訓練により人間のインピーダンス調節能力を向上することができれば、スポーツやリハビリテーションに有効であると考えられる。以上の考えに基づき、辻らは人間の手先イン

ピーダンス調節能力を訓練するトレーニング法を提案した [7]。しかしながらこの方法は人間のインピーダンス調節能力のみを対象としており、上述のように運動能力と感覚、知覚能力が密接な関係にあるにもかかわらず、インピーダンスの知覚能力の訓練には触れていない。したがって、訓練者にインピーダンスを提示し、感覚受容器を通してインピーダンスの知覚訓練を行うことにより、その知覚能力を向上できれば、感覚・知覚障害に対するリハビリテーションに有効であると考えられる。しかしながら、このようなトレーニングを実現するためには、まず健常者のインピーダンス知覚特性の特徴を明らかにし、障害者への訓練指標を明確にする必要がある。

人間のインピーダンス知覚特性に関しては、最近、いくつかの報告がなされている [8]~[11]。例えば、Jones and Hunter [8] は被験者の両腕にモータを取り付けて右腕に基準となる剛性を提示し、両腕のモータの剛性が同じに感じるように左腕に取り付けたモータの剛性を被験者に調整させるという実験を行い、被験者がモータの剛性の変化を知覚できることを示した。粘性に関しても同様の実験を行っている [9]。また、Srinivasan and LaMotte [10] は指の先端を物体に押し付けたときの人間の硬さ識別能力を解析するために、深部体性感覚のみから物体の硬さを認識させる実験を行い、深部体性感覚と触覚の重要性を比較した。藤田ら [11] はつまみ動作を行ったときの硬さ知覚に対する深部体性感覚、触覚、視覚の重要性を、硬さ識別率に基づいて実験的に検証した。

しかしながら、これらの研究では前腕動作、または指動作時のインピーダンスの識別能力を解析しており、インピーダンスの値そのものの知覚能力について解析したわけではない。また

原稿受付 2001年3月16日

\*広島大学大学院工学研究科

\*Department of Artificial Complex Systems Engineering, Graduate school of Engineering, Hiroshima University

人間のロボットインピーダンスに対する弁別特性についても考察されていない．そこで本論文では，人間のインピーダンス知覚能力を向上するトレーニング法を確立するための第一歩として，ロボットインピーダンスに対する人間の知覚能力の解析を行った．本論文の結果は，感覚・知覚障害に対するリハビリテーションシステムの構築や，人間支援を目的とした人間-ロボット系 [12]~[17] において人間にロボットインピーダンスを提示する際の基礎資料として重要である．

以下，2章では本論文で行ったインピーダンス知覚実験について説明する．3章では人間のインピーダンス知覚能力とインピーダンス弁別能力の解析結果を示し，4章では実験条件により人間のインピーダンス知覚特性が大きく変化することを明らかにする．

## 2. 実験

### 2.1 実験装置

Fig. 1 (a) に実験装置の構成を示す．本装置は被験者にインピーダンス特性を提示するための 1 自由度のリニアロボット ((株) 日本トムソン，エンコーダ分解能:  $2 [\mu\text{m}]$ )，ロボットの制御を行う計算機，手先力や現在位置などの訓練情報を表示するディスプレイから構成される．また，ロボットのテーブル可動部にはハンドルと 6 軸力センサ ((株) ビー・エル・オートテック，分解能: 並進力  $x$  軸,  $y$  軸:  $5 \times 10^{-3} [\text{N}]$ ,  $z$  軸:  $15 \times 10^{-2} [\text{N}]$ , 回転力:  $3 \times 10^{-3} [\text{Nm}]$ ) を取り付け，被験者がハンドルに加えた力を測定する．ハンドルの位置はロボットに取り付けたエンコーダにより求める．さらにテーブル本体下部に取り付けた回転台でテーブルの方向を制御することができる．ここで，制御対象であるロボットはインピーダンス制御 [18] されており，その特性は，

$$R(s) = \frac{1}{M_r s^2 + B_r s + K_r} \quad (1)$$

となる．ただし， $M_r$  はロボットの慣性， $B_r$  は粘性， $K_r$  は剛性を表す．

訓練中，ディスプレイには手先力や現在位置などの訓練情報がフィードバックされ，被験者は様々な感覚受容器を通してインピーダンスを知覚することになる．この実験装置のインピーダンス制御精度を Fig. 2 に示す．(a) は剛性，(b) は粘性，(c) は慣性の結果で，いずれも縦軸は実現されたインピーダンス，横軸は目標インピーダンスである．実現されたインピーダンスは，30 秒間，被験者がロボットを駆動した際の位置，速度，加速度と力を用いて最小二乗法により推定した [16]．それぞれ 10 試行ずつ計測し平均値をプロットしている．各試行における標準偏差は最大でも 5% 以内であった．Fig. 2 より，いずれも精度よく実現できていることが分かる．

### 2.2 実験方法

実験は提示されたインピーダンスを被験者が知覚し，そのインピーダンスを口述する口頭諮問形式とした．

実験条件は，

- (1) ロボットのインピーダンス (剛性  $K_r$ , 粘性  $B_r$ , 慣性  $M_r$ ) のうちのいずれか 1 種類を変化させ，インピーダンス知覚能力を解析する，

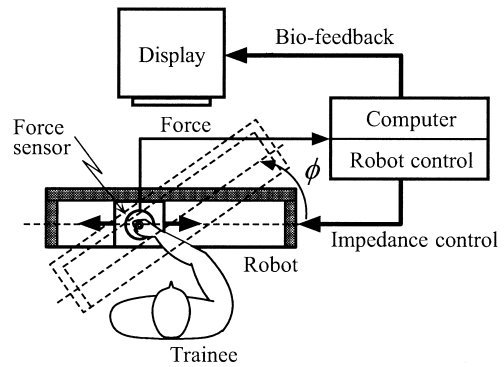


Fig. 1 Experimental apparatus

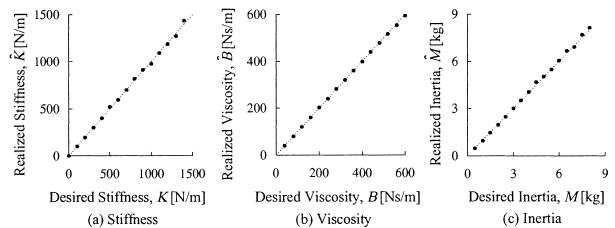


Fig. 2 Accuracy of impedance control used in the experiments. Mean values for 10 sets of the realized impedance are shown

- (2) 二つの異なるインピーダンスを順に提示し，先と後とでどちらのインピーダンスが大きいかを判断させ，インピーダンス弁別能力を解析する，
- という 2 種類とした．いずれも，剛性，粘性，慣性についてそれぞれ実験を行い，インピーダンスの提示順は一様乱数に従いランダムとした．

被験者 (22~24 歳の男子大学生 6 名) には実験前に十分な練習を行わせた．まず，ロボットの剛性  $K_r$  を 0, 100, 200, ..., 1,800 [N/m] の 19 種類，粘性  $B_r$  を 0, 50, 100, ..., 600 [Ns/m] の 13 種類，慣性  $M_r$  を 1.0, 2.0, 3.0, ..., 10 [kg] の 10 種類に変化させ，被験者に各インピーダンスの値を示しながらその感覚を覚えさせる．被験者には本実験で用いるインピーダンスの上限値が分からないよう，大きめのインピーダンスまで練習させた．この練習を 1 日約 1 時間，延べ約 1 週間にわたって行った．本実験の当日には，データ採取前に上記の練習を約 30 分間行わせた．本実験中には，提示した実際のインピーダンスの値は被験者には教えていない．各被験者はこの一連の実験を 3, 4 回経験した熟練者である．なお，練習は離散的な値で行っているため，本実験では練習で採り上げていない値も提示されることに注意されたい．

## 3. 人間のインピーダンス知覚特性

### 3.1 インピーダンス知覚能力

Fig. 3 (a) に剛性，(b) に粘性，(c) に慣性の知覚能力に関する被験者 3 名の実験結果を示す．なお残りの 3 名についてもほぼ同様の傾向を示した．このとき，被験者には自由に運動するように指示し，インピーダンスの値を知覚させた．それぞれ縦軸は

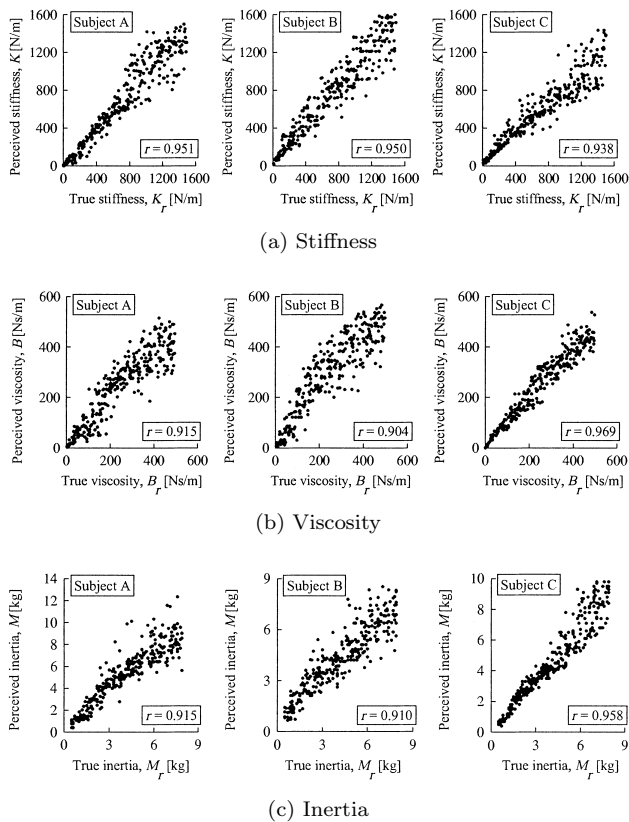


Fig. 3 Relation between true and perceived impedance

被験者が知覚したインピーダンス、横軸は提示したインピーダンスで、相関係数  $r$  とともに示す。なお提示インピーダンスの範囲は、剛性  $K_r$ : 0~1,500 [N/m], 粘性  $B_r$ : 0~500 [Ns/m], 慣性  $M_r$ : 0.5~8.0 [kg] で、提示インピーダンスの刻み幅は、剛性: 1 [N/m], 粘性: 0.1 [Ns/m], 慣性: 0.1 [kg] とした。まず、各インピーダンスの範囲を 15 区間に分け、区間ごとに 20 種類ずつ合計 300 種類のインピーダンス値を用意する。そして、一様乱数に従い各インピーダンスをランダムに提示した。また、剛性知覚実験では粘性  $B_r$  を 0 [Ns/m], 慣性  $M_r$  を 2 [kg], 粘性知覚実験では剛性  $K_r$  を 0 [N/m], 慣性  $M_r$  を 2 [kg], 慣性知覚実験では剛性  $K_r$  を 0 [N/m], 粘性  $B_r$  を 0 [Ns/m] とした。

Fig. 3 からいずれの条件、被験者も相関係数は 0.90 以上となり、被験者がかなりの精度でインピーダンスを知覚できていることが分かる。また、提示したインピーダンスが大きくなるほど、被験者が知覚したインピーダンスの値のばらつきが増している。

このときの知覚誤差を Fig. 4 に示す。Fig. 4 (a) は剛性、(b) は粘性、(c) は慣性の知覚誤差で、縦軸は提示したインピーダンスと被験者が知覚したインピーダンスの誤差の絶対値で、おのおのの範囲 (剛性: 0~300, 301~600, 601~900, 901~1,200, 1,201~1,500 [N/m], 粘性: 0~100, 100.1~200, 200.1~300, 300.1~400, 400.1~500 [Ns/m], 慣性: 0.5~2.0, 2.1~3.5, 3.6~5.0, 5.1~6.5, 6.6~8.0 [kg]) における、60 試行の平均と標準偏差をプロットしている。横軸は提示したインピーダンスである。被験者により違いが見られるが、被験者 A

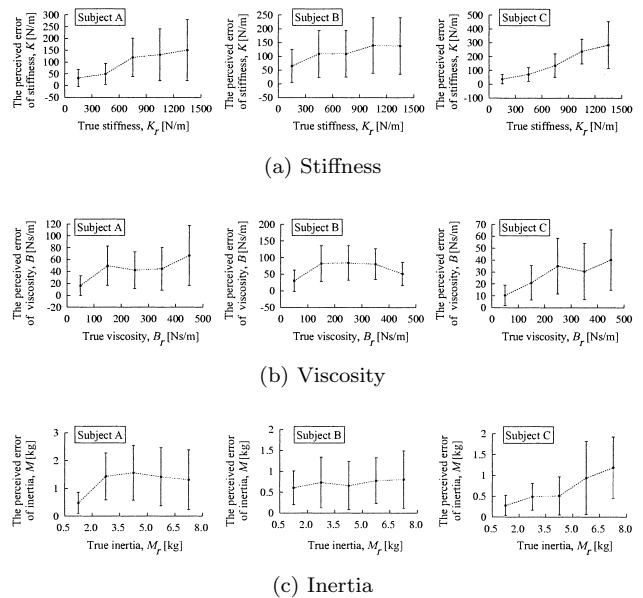


Fig. 4 Change of the error between true and perceived impedance

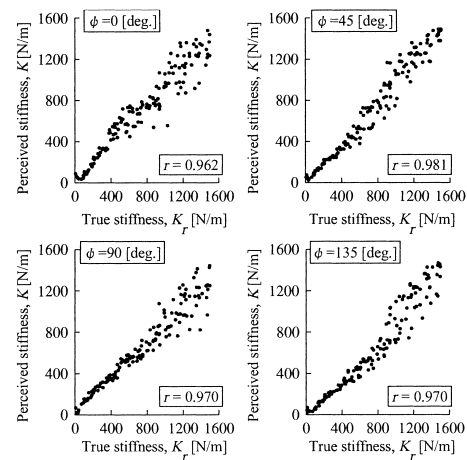


Fig. 5 Changes of the stiffness perception ability by the motion direction

の慣性、被験者 B の粘性、慣性を除いて、誤差の平均と標準偏差がほぼ増加傾向にあることが分かる。提示インピーダンスと誤差の関係については今後、より詳しく調べる必要がある。

次に、作業方向によってインピーダンス知覚精度がどのように変化するかを解析した。まず、ベルトにより被験者の肩を椅子に固定し、上肢をほぼ水平面に保たせ、この状態でテーブル本体下部に取り付けた回転台を  $\phi = 0, \pi/4, \pi/2, 3\pi/4$  [rad] に回転させ、それぞれの作業方向に対する剛性の知覚能力を調べた。剛性の範囲を 15 区間に分け、区間ごとに 10 種類ずつ合計 150 種類の剛性をランダムに提示し、その他の実験条件は Fig. 3 と同様である。

Fig. 5 に Subject A の実験結果を示す。なお残りの被験者についてもほぼ同様の結果であった。それぞれ縦軸は被験者が知覚した剛性、横軸が提示した剛性で、相関係数  $r$ 、作業方向  $\phi$

とともに示す．Fig. 5 から拘束された姿勢でもかなりの精度でインピーダンスを知覚できることが分かる．また作業方向の変化によるインピーダンス知覚精度も大差はなく、いずれの作業方向においても、被験者の知覚精度は高かった．以上より、姿勢や作業方向によるインピーダンス知覚精度の影響は小さいことが明らかになった．これは被験者が姿勢や方向等の変化による影響を学習により補償できるためと考えられる．

以上、本論文で行った実験の範囲では、人間がかなり高いインピーダンス知覚能力を有することが明らかになった．本論文で取り上げたインピーダンス知覚は人間の特殊な能力ではなく、日常的に使用している知覚能力の一つである．もちろん、ほとんどの場合は定量的に知覚する必要はないので、被験者は練習により自分の感覚と数値の間のマッピングを形成する必要がある．このマッピングを獲得すること自体はさほど難しい作業ではなく、被験者間に大きなばらつきは生じなかった．また、同一の被験者を用いて約 10ヶ月後に追試実験を行ったが、本論文で示した結果とほぼ同様の実験結果が得られた．

### 3.2 インピーダンス弁別能力

感覚上の変化を引き起こすために必要な刺激の最小変化量である弁別閾を調べるため、すべての刺激をランダムな順で提示する恒常法 [19] を用いてインピーダンスに対する弁別閾値を測定した．測定方法は、まず予備実験を行い、標準刺激値  $S$  (剛性: 100, 200, ..., 1,000 [N/m] の 10 種類, 粘性: 20, 40, ..., 160 [Ns/m] の 8 種類, 慣性: 1, 2, ..., 8 [kg] の 8 種類) と 95% の正反応が期待されるような刺激を最大の刺激値として決定した．その後、最大刺激値からそれぞれの刻み幅の間隔 (剛性: 10 [N/m], 粘性: 1 [Ns/m], 慣性: 0.1 [kg]) で値を減少させていき、等間隔に配列された 4~7 種類の刺激からなる比較刺激系列を用意した．そして、比較刺激系列からランダムな順序で比較刺激を選択し、被験者に標準刺激と比較刺激を比べさせた．被験者には提示した刺激が一つ前に提示された刺激に比べて“大きい”, “同じ”, “小さい”のいずれかを判断させる 3 件法で答えさせた．以上の実験を順序を変えて 20 回繰り返した [20]．

以上の実験結果から、比較刺激系列の試行ごとの正解数を二項分布を用いた片側検定 [19] を行うことにより、危険率 1% で有意か否かを判断し、有意ならば弁別可能であり、有意でないならば弁別不可能と判定した．そして、比較刺激系列中で弁別可能である最小の刺激値を弁別閾値  $\Delta S$  と定義した．Fig. 6 (a) に剛性、(b) に粘性、(c) に慣性の結果を示す．なお残りの 3 名の被験者についてもほぼ同様の傾向が得られた．各グラフの縦軸はそれぞれのインピーダンスの弁別閾値、横軸は標準刺激値である．また、点線は最小二乗法で求めた回帰直線で、グラフ中の式はこの回帰直線を表す．

Fig. 6 から、インピーダンスが大きくなると弁別閾が増加することが分かる．この傾向は 2.3 節で示したインピーダンス知覚能力の結果と対応している．また、インピーダンスの標準刺激値  $S$  と弁別閾値  $\Delta S$  の間には比例関係が成立し、ウェーバーの法則 [19] をほぼ満たしていることが分かる．ロボットインピーダンスに対する人間の知覚特性がウェーバーの法則に従うことを本論文で明らかにすることができた．

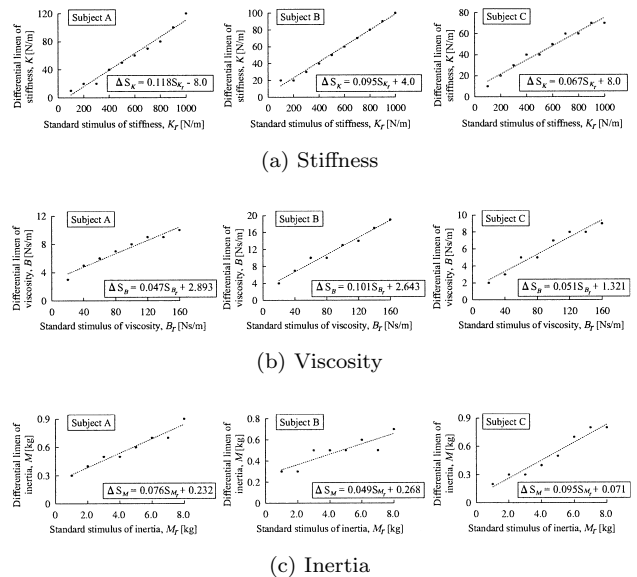


Fig. 6 Change of the differential limen of impedance

以上より、限られた条件下であるが、人間のインピーダンス弁別特性を解析した．本論文の結果は、人間に異なるインピーダンスを提示するような場合に、どの程度インピーダンスの値を変化させればよいかという基礎資料として有効である．

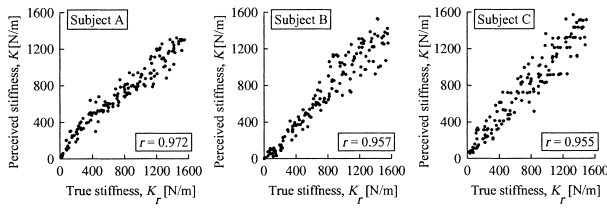
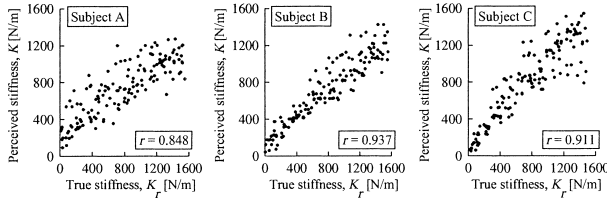
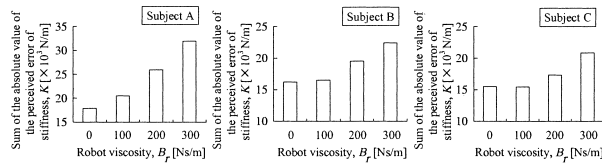
## 4. インピーダンス知覚能力の変化

前章で示した実験結果から、人間がかなり優れたインピーダンス知覚能力を有することが明らかになった．一般に、知覚とは「感覚器官を通じて環境の性質などを把握する作用」[1]である．したがって与えられた対象物のインピーダンス特性を知覚するためには、被験者は自分自身の感覚受容器を用いてロボットに加えた力とそれによって生じる運動 (位置, 速度, 加速度) を計測する必要がある．

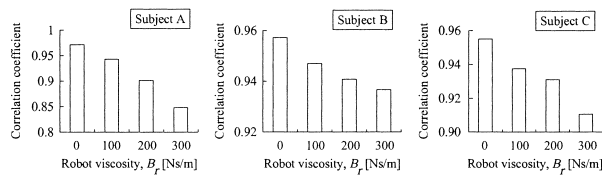
ところが、感覚受容器は人間の体内に存在するため、ロボットの運動特性に関する情報を計測するためには、自分自身の身体を運動させる必要がある．本論文で構成した実験装置では、人間はロボットに取り付けたハンドルを把持しているため、人間とロボットが一体となって運動する人間-ロボット系を構成する．したがって、ロボットのインピーダンス特性が変化したとき、人間の手先が発生する力と運動がどのような影響を受けるかという点が、人間のインピーダンス知覚特性に大きな影響を与えられられる．人間の手先が発生する力に依存して、対象物であるロボットの運動が変化し、人間が計測できる情報量が変化するためである．そこで、本章では、どのような場合に人間のインピーダンス知覚能力が変化するかを実験的に明らかにする．

### 4.1 ロボット粘性による知覚精度の変化

前章の実験では、剛性と慣性の知覚特性を計測する際に、ロボットの粘性は 0 [Ns/m] と設定した．このロボット粘性を増加させると人間の手先は動きにくくなり、インピーダンス知覚に必要な運動を実現することが困難となる．そこで  $B_r$  を変化させたとき、人間のインピーダンス知覚精度がどのように変化する

(a) Robot viscosity  $B_r = 0$  [Ns/m](b) Robot viscosity  $B_r = 300$  [Ns/m]**Fig. 7** Comparison of the stiffness perception ability under the different values of robot viscosity

(a) The sum of the absolute value of the perceived error of stiffness



(b) The correlation coefficients

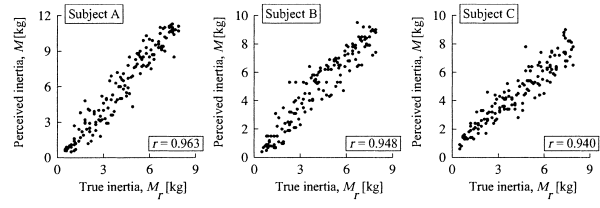
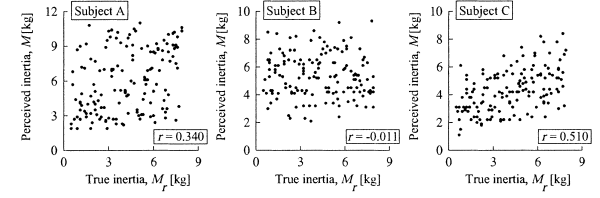
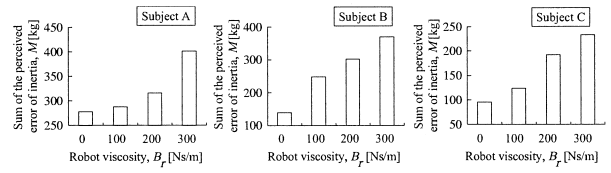
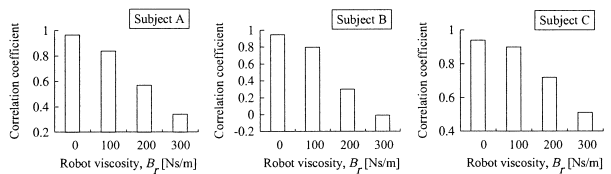
**Fig. 8** Changes of the stiffness perception ability by robot viscosity  $B_r$ 

るかを調べた。

Fig. 7 は、ロボットの粘性が (a)  $B_r = 0$  [Ns/m] のときと (b)  $B_r = 300$  [Ns/m] のときの剛性知覚精度実験を 150 回行ったときの結果である。縦軸は被験者が知覚した剛性、横軸は提示剛性で、図からロボットの粘性  $B_r$  が大きくなると知覚精度にばらつきが生じることが分かる。

Fig. 8 はロボットの粘性  $B_r$  を 0, 100, 200, 300 [Ns/m] と変化させたときの剛性知覚精度である。Fig. 8 (a) の縦軸は、剛性知覚実験を 150 回行ったときの提示剛性と知覚剛性の誤差の絶対値の総和で、横軸は剛性知覚実験を行ったときのロボットの粘性  $B_r$  の値である。Fig. 8 (b) はこのときの提示剛性と知覚剛性の相関係数を表す。図よりロボットの粘性が小さいほど誤差の絶対値が少なくなり、相関が良くなっている。

一方、Fig. 9, 10 は、慣性知覚精度実験の結果である。図からロボットの粘性  $B_r$  が大きくなると知覚精度に大きなばらつきが生じ、慣性を知覚することがほとんど不可能になっている。

(a) Robot viscosity  $B_r = 0$  [Ns/m](b) Robot viscosity  $B_r = 300$  [Ns/m]**Fig. 9** Comparison of the inertia perception ability under the different values of robot viscosity(a) The sum of the perceived error of inertia,  $M$  [kg]

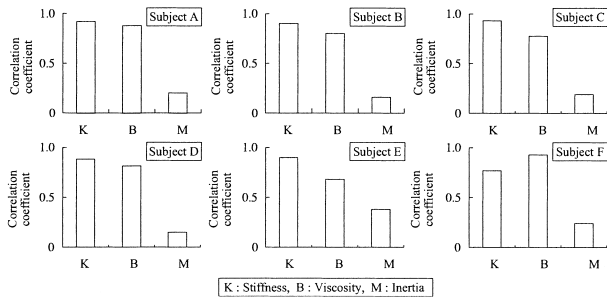
(b) The correlation coefficients

**Fig. 10** Changes of the inertia perception ability by robot viscosity  $B_r$ 

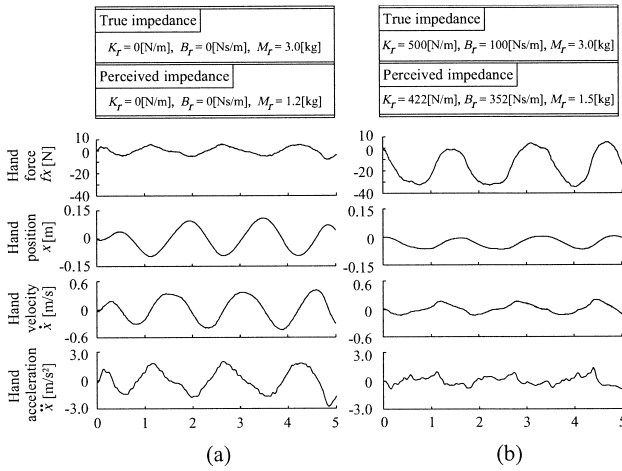
これは、ロボット粘性が増加したため、手先速度を急激に変化させることが困難となり、力と加速度の関係である慣性を知覚するために必要な情報を得ることができなくなったためである。人間の運動がインピーダンス知覚情報に大きな影響を与えることが分かる。

#### 4.2 複数インピーダンス知覚精度の同時知覚

3章の実験では1種類のインピーダンスのみを変更し、被験者に知覚させていた。そこでここでは、剛性、粘性、慣性の3種類すべてのインピーダンスを同時に変化させたときの人間の知覚能力について解析した。提示インピーダンスは、剛性は 0 [N/m], 250 [N/m], 500 [N/m] の3種類、粘性は 0 [Ns/m], 50 [Ns/m], 100 [Ns/m] の3種類、慣性は 0.5 [kg], 1.5 [kg], 3.0 [kg] の3種類を用意し、それぞれのインピーダンスのすべての組み合わせ ( $3 \times 3 \times 3 = 27$  試行) を提示し、被験者に3種類のすべてのインピーダンス値を同時に口述させた。また、試行ごとにインピーダンスの組み合わせはランダムに提示した。なお、被験者は提示インピーダンスの種類や値については知らされてい



**Fig. 11** The correlation coefficients between true and perceived impedance computed from the experimental results where all of impedance parameters  $K_r$ ,  $B_r$ ,  $M_r$  were perceived by the subjects simultaneously

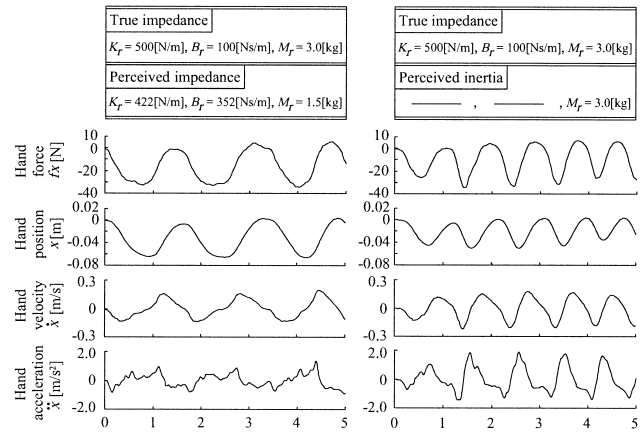


**Fig. 12** Comparison of subject's motion between  $K_r=0$  [N/m],  $B_r=0$  [Ns/m],  $M_r=3.0$  [kg] and  $K_r=500$  [N/m],  $B_r=100$  [Ns/m],  $M_r=3.0$  [kg] during perception of multiple impedance (Subject=A)

ない。

被験者 6 名の実験結果を Fig. 11 に示す．各グラフの縦軸は、提示インピーダンスと知覚インピーダンスの間の相関係数であり、横軸は剛性、粘性、慣性である．Fig. 11 から、3 種類すべてのインピーダンスを知覚する場合、1 種類のときに比べ知覚精度が大幅に低下していることが分かる．また各被験者とも剛性は比較的高い知覚精度を保っているが、粘性と慣性については大きく知覚精度が低下することが明らかになった．特に慣性については著しく低下した．以上の結果から、複数のインピーダンスの知覚は単一のインピーダンス知覚よりかなり難しいことが明らかになった．

Fig. 12 は複数インピーダンス知覚実験中の Subject A の運動を計測した結果の一例である．Fig. 12 (a) が剛性  $K_r = 0$  [N/m]、粘性  $B_r = 0$  [Ns/m]、慣性  $M_r = 3.0$  [kg] のとき、Fig. 12 (b) が剛性  $K_r = 500$  [N/m]、粘性  $B_r = 100$  [Ns/m]、慣性  $M_r = 3.0$  [kg] の場合の結果で、上から力、位置、速度、加速度の時間変化である．提示したインピーダンスと被験者が知覚したインピーダンスは図中に示す．Fig. 12 (a), (b) を比較すると、(b) の方がロボットの粘弾性が大きいいため、運動の際に大



(a) Simultaneous perception of stiffness, viscosity and inertia

(b) Perception of inertia

**Fig. 13** Comparison of subject's motion between perception of multiple impedance (stiffness, viscosity, inertia) and single impedance (inertia) ( $K_r=500$  [N/m],  $B_r=100$  [N/m],  $M_r=3.0$  [kg], Subject=B)

きな力が必要であることが分かる．しかし、剛性が大きいために (a) に比べると、位置、速度、加速度とも小さくなっている．インピーダンス知覚に必要な情報を得るための運動が実現できていないのである．

最後に上述の複数インピーダンス知覚実験と同様の実験条件で、被験者にはロボットの慣性の値のみを口述させるという比較実験を行った．Fig. 13 に Subject B のインピーダンス知覚中の運動波形を示す．それぞれ (a) が複数インピーダンス知覚時、(b) が慣性のみを口述するときの運動波形で、提示したインピーダンスと被験者が知覚したインピーダンスは図中に示す．

Fig. 13 より、Subject B は運動の周期を短くすることで慣性を知覚しようとしている．慣性のみを答える実験の方が、慣性の知覚精度は向上しており、実験条件に応じて被験者が自らの運動を調節していることが分かる．被験者の手先の運動特性とインピーダンス知覚能力との関係については、今後さらに検討する必要があると考えている．

## 5. 結 論

本論文では人間のインピーダンス知覚能力を、特に知覚精度、弁別閾値に注目して実験的に解析した．その結果 (1) 提示インピーダンスが小さいときは弁別閾値が小さく、知覚精度もかなり高いこと (2) 提示インピーダンスを大きくすると、弁別閾値は比例的に増加し、知覚精度にばらつきが生じること (3) 人間のインピーダンス知覚特性はほぼウェーバーの法則に従うことなどが明らかになった．

次に、ロボットのインピーダンスパラメータに依存して、人間の知覚特性がどのように変化するかを解析した．その結果 (1) ロボットの粘性が大きいほどインピーダンス知覚精度が低下すること (2) 複数のインピーダンスを知覚するのは単一のインピーダンスより難しく、特に粘性、慣性の知覚精度が低下すること (3) ロボットのインピーダンスが大きいときは、インピー

ダンス知覚に必要な力や運動を十分に実現することができないため、特に慣性の知覚精度が低下すること(4)手先の運動を調節することで、ある程度、慣性の知覚精度が向上することなどが明らかになった。

ロボットインピーダンスを知覚するためには(1)運動を通じて十分な情報を得ること(2)情報を解釈し理解することの2点が必要となる。本論文では、単一インピーダンスに対して十分な情報が得られれば、被験者が高いインピーダンス知覚能力を有することを明らかにした。ただし、ロボット粘性を増加させたときのように、インピーダンスパラメータによっては、十分な情報を得るための運動が困難になる場合があった。一方、複数インピーダンスに対しては、実験結果から運動が大きく影響していることを指摘したものの、知覚能力の低下がどちらの原因に起因しているのかを明確にすることはできなかった。今後は、複数インピーダンス知覚時の慣性知覚精度の低下の原因をより詳細に検討するとともに、上肢姿勢や筋収縮とインピーダンス知覚特性との関係をさらに詳しく考察する必要がある。また障害者の知覚特性を計測し健常者との差異を明確とするとともに、感覚・知覚障害に対する効果的なリハビリテーションシステムを構築できればと考えている。

### 参考文献

- [1] 大山正, 今井省吾, 和氣典二: 新編感覚・知覚心理学ハンドブック. 誠信書房, 1994.
- [2] N.C. Kephart: The slow learner in the classroom. Charles E. Merrill Publishing Co., 1960.
- [3] T. Tsuji, P.G. Morasso, K. Goto and K. Ito: "Human hand impedance characteristics during maintained posture," *Biological Cybernetics*, vol.72, pp.457-485, 1995.
- [4] 辻敏夫, 森谷正三, 金子真, 伊藤宏司: "等尺性筋収縮における人間の手先インピーダンスの解析", 計測自動制御学会論文集, vol.32, no.2, pp.271-280, 1996.
- [5] 五味裕章, 川人光男: "水平面における多関節運動中の人腕機械インピーダンスの計測", 計測自動制御学会論文集, vol.32, no.3, pp.369-378, 1996.
- [6] P.L. Weiss, I.W. Hunter and R.E. Kearney: "Human ankle joint stiffness over the full range of muscle activation levels," *J. Biomechanics*, vol.21, pp.539-544, 1988.
- [7] 辻敏夫, 神字芳彦, 加藤荘志, 金子真, 川村貞夫: インピーダンス・トレーニング: 人間は手先インピーダンスを訓練により調節できるのか?, 計測自動制御学会論文集, vol.35, no.10, pp.1300-1306, 1999.
- [8] L.A. Jones and I.W. Hunter: "A perceptual analysis of stiffness," *Experimental Brain Research*, vol.79, no.1, pp.150-156, 1990.
- [9] L.A. Jones and I.W. Hunter: "A perceptual analysis of viscosity," *Experimental Brain Research*, vol.94, no.2, pp.343-351, 1993.
- [10] M.A. Srinivasan and R.H. LaMotte: "Tactile discrimination of softness," *J. Neurophysiology*, vol.73, no.1, pp.88-101, 1995.
- [11] 藤田欣也, 佐々木博, 小山康弘: "人間の硬さ知覚機構と仮想硬さ提示に関する実験的検討", 第20回バイオメカニクス学術講演会 CDROM, 450-455, 1999.
- [12] H. Kazerooni: "Human-Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*, vol.20, no.2, pp.450-463, 1990.
- [13] O.M. Al-Jarrah and Y.F. Zheng: "Arm-manipulator coordination for load sharing using Reflexive Motion Control," *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp.2326-2331, 1997.
- [14] K. Kosuge, Y. Fujisawa and T. Fukuda: "Control of Robot Directly Maneuvered by Operator," *Proc. 1993 IEEE/RJS Int. Conf. Intelligent Robots and Systems*, pp.49-54, 1993.
- [15] R. Ikeura and H. Inooka: "Manual Control Approach to the Teaching of a Robot Task," *IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics*, vol.24, no.9, pp.1339-1346, 1994.
- [16] 辻敏夫, 加藤荘志, 金子真: "人間-ロボット系の追従制御特性", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.2, pp.285-291, 2000.
- [17] 辻敏夫, 川口義信, 金子真: "ニューラルネットを利用した人間-ロボット系の適応型訓練法", 日本ロボット学会誌, vol.18, no.5, pp.683-689, 2000.
- [18] N. Hogan: Impedance Control: "An approach to Manipulation, Parts I, II, III," *ASME J. Dynamic Systems, Measurement, and Control*, vol.107, no.1, pp.1-24, 1985.
- [19] 日科技連官能検査委員会: 新版官能検査ハンドブック. 日科技連出版社, 1973.
- [20] 塩見邦雄, 金光義弘, 足立明久: 心理検査・測定ハンドブック. ナカニシヤ出版, 1982.



辻 敏夫 (Toshio Tsuji)

1959年12月25日生。1985年広島大学大学院工学研究科博士課程前期修了。同年同大学工学部助手、1994年同助教授、現在に至る。工学博士。人間とロボットの運動制御、ニューラルネット、マン・マシンシステムなどの研究に従事。IEEE、計測自動制御学会、日本機械学会、電気学会、電子情報通信学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)

学会などの会員。

(日本ロボット学会正会員)



島崎知之 (Tomoyuki Shimazaki)

1975年11月30日生。2001年広島大学大学院工学研究科情報工学専攻博士課程前期修了。同年(株)日本電気に入社。在学中は人間のインピーダンス知覚能力の研究に従事。



金子 真 (Makoto Kaneko)

1954年1月18日生。1981年3月東京大学工学系研究科博士課程卒業。工学博士。同年4月通産省工業技術院機械技術研究所入所。1990年4月、九州工業大学情報工学部助教授。1993年10月広島大学教授、現在に至る。ロボットハンド、力覚センサ、触覚ベースタクトアクティブセンシングなどの研究に興味を持つ。IEEE、計測自動制御学会、日本機械学会などの会員。(日本ロボット学会正会員)

員。

(日本ロボット学会正会員)