

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

仮想キャッチング作業における人間の作業準備インピーダンスの解析[†]

辻 敏夫*・野口裕史*・金子 真*

Analysis of Task Readiness Impedance in Human Arm Movements for Virtual Catching-a-ball Tasks[†]

Toshio TSUJI*, Yuji NOGUCHI* and Makoto KANEKO*

It is widely recognized that dynamic characteristics of human upper extremities can be modeled using the mechanical impedance. Although many studies have been reported on human impedance characteristics in static tasks maintaining an arm posture, there is no such a report for multi-joint movements during dynamic tasks including interactions between the human arm and environments.

In this paper, in order to analyze the human hand impedance in dynamic tasks, a concept of a task readiness impedance is introduced. The human arm impedance should be regulated before motion according to a task requirement for some classes of tasks. For a catching-a-ball task, for example, the hand impedance must be adjusted before the hand contacts with a ball. In this paper, the human impedance in a task readiness phase is called the task readiness impedance, and an estimation method using a virtual reality technique is proposed. Then, characteristics of the human task readiness impedance in a virtual catching-a-ball task are analyzed. Also, a virtual trajectory is roughly estimated in order to simulate human movements using the task readiness impedance.

Key Words: human movements, impedance, virtual trajectory, dynamic tasks, virtual reality

1. はじめに

人間は手先の硬さ、柔らかさを巧みに調節することでさまざまな作業をこなしている。ボールのキャッチング動作を例にとると、ボールをキャッチする際に手先を必要以上に硬くすればボールの勢いをうまく吸収できず弾いてしまい、逆に柔らかくしすぎるとボールの勢いに負けてうまくキャッチングできないだろう。人間はボールの速さ、重さ、大きさなどさまざまな作業条件に応じて巧みに手先の特性を調節してキャッチングを行なっている。このような人間の手先の運動特性は、機械インピーダンスを用いてモデル化できることが知られている。

多関節運動における人間の手先インピーダンスを計測しようという研究は今まで幾つか報告されている。たとえば Mussa-Ivaldi ら¹⁾は姿勢維持中の手先の剛性をはじめて推定した。彼らは、手先の剛性が腕の姿勢に強く依存し、また、剛性の大きさは変えることができるがその方向性は調節でき

ないことを示した。また、Dolan ら²⁾、辻ら^{3),4)}は、手先の剛性のみならず、粘性、慣性をも含めた手先インピーダンスを推定し、剛性と粘性が定性的に似た空間特性を持つことを示した。さらに、辻ら⁵⁾は、手先の粘弾性が筋の収縮レベルや作業方向、姿勢などに応じて大きく変化することを示している。一方、運動中のインピーダンスを計測した研究として Gomi and Kawato⁶⁾は、到達運動中の手先インピーダンスを測定し、運動中の手先の剛性が同一姿勢での姿勢維持中に比べて大きく変化することを示した。また推定したインピーダンス結果を用いて手先の仮想軌道⁷⁾を計算している。

このようにさまざまな研究が報告されているが、姿勢維持中のインピーダンスを計測した実験では姿勢や筋収縮の影響のみを考慮しているにすぎず、また到達運動時のインピーダンスを計測した実験も被験者は自由運動を行なっているため、環境との相互作用や作業目的、作業条件などに対する人間のインピーダンス特性の変化を解析しているわけではない。一方、Bennett ら⁸⁾は、人間の動特性を開ループ伝達関数でモデル化し、被験者に自由落下するボールをキャッチングさせることでそのゲイン特性や位相特性を解析している。また池浦ら⁹⁾は落下物の受け取り動作を実験的に調べ、手腕系の衝撃吸収特性を解析している。しかしながら、これらの研究では手先のインピーダンス特性を計測しておらず、また、作業中の人間の運動特性の変化についても触れていない。

[†] 第8回計測自動制御学会 中国支部学術講演会で一部発表 (1999・11)

* 広島大学大学院工学研究科 東広島市鏡山1-4-1

* Graduate School of Engineering, Hiroshima University, Higashi-hiroshima

(Received March 30, 2000)

(Revised May 21, 2001)

そこで本論文では環境との相互作用を含んだ動的な接触作業を取り上げ、作業中の人間の手先インピーダンスの計測を行ない、多関節運動におけるインピーダンスの解析を試みる。動的作業に対するインピーダンスを計測することができれば、作業に応じた人間のインピーダンス調節方策を解明できるだけでなく、熟練作業者の技能をモデル化しロボット制御に応用できる可能性がある。以下、2. で本論文で提案する作業準備インピーダンスの推定法について述べる。3. では動的作業例として振り子運動を行なうボールのキャッチング作業を取り上げ、4. で人間のインピーダンス調節能力の解析を行なう。

2. 作業準備インピーダンス

2.1 インピーダンス計測法

いま、人間が l 次元空間で上肢の多関節運動を行なっている場合を考える。Fig. 1に示すように人間の手先に外部から強制的な変位を加えたとき、手先動特性を作業座標系で表現したインピーダンスモデルを用いて

$$M_e \ddot{X}_e(t) + B_e \dot{X}_e(t) + K_e(X_e(t) - X_v(t)) = -F_e(t) \quad (1)$$

のように近似する^{3),4)}。ただし、 $M_e, B_e, K_e \in \mathbb{R}^{l \times l}$ はそれぞれ、手先の慣性、粘性、剛性行列で、 $X_v(t) \in \mathbb{R}^l$ は仮想軌道、 $X_e(t) \in \mathbb{R}^l$ は手先位置を表わす。また $F_e(t) \in \mathbb{R}^l$ は手先から環境に作用する力である。ここで、 $X_v(t)$ が一定の場合を考えると、この強制変位によって生じる手先位置、手先力の変化より

$$M_e d\ddot{X}(t) + B_e d\dot{X}(t) + K_e dX(t) = -dF_e(t) \quad (2)$$

を得る。ただし、 $dX(t) = X_e(t) - X_e(t_0)$ 、 $dF_e(t) = F_e(t) - F_e(t_0)$ で、 t_0 は人間の手先に外力を加えた時刻である。したがって、手先位置 $X_e(t)$ と手先力 $F_e(t)$ が計測できれば(2)式を用いて最小二乗法により手先インピーダンス M_e, B_e, K_e を推定できる^{3),4)}。

しかし、動的作業中では必ずしも $X_v(t)$ は一定とはならず、また、可観測な変数は $X_e(t), \dot{X}_e(t), \ddot{X}_e(t), F_e(t)$ だけであるため、 $K_e, B_e, M_e, X_v(t)$ を一意に決定することはできない。さらに、インピーダンスパラメータは作業中は一定ではなく、姿勢や筋収縮レベルなどにより変化する⁶⁾ため、各時刻においてインピーダンスを推定する必要がある。以上より、動的作業中の手先のインピーダンスを推定することは非常に困難であることがわかる。

一方、作業によっては、手先インピーダンスを前もって調節しなければならぬ場合が存在する。たとえばボールのキャッチング作業を考えると、ボールが接触してからインピーダンスを調節しようとしても時間的に間に合わないため、ボールの速度や特性といった情報をもとに接触前から手先のインピーダンスを調節する必要がある。このような作業の熟練者は、作業準備段階における手先のインピーダンスを経験的に最適な値に調節することにより作業をスムーズに実行していると考えられる。そこで本論文では、手先の運動が発現する

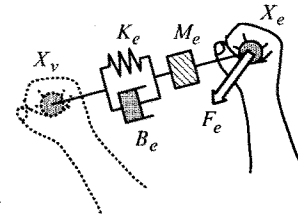


Fig. 1 Schematic description of hand impedance

直前、すなわち作業の準備段階において手先に強制的な変位を加えることを考える。作業準備段階においては $X_v(t)$ は一定であるため、(2)式を用いて M_e, B_e, K_e を推定することができる。この作業準備インピーダンスは動的作業中のインピーダンスとは異なるが、人間は作業に応じてこのインピーダンスを調節していると考えられる。したがって、作業準備インピーダンスを解析することで人間のインピーダンス学習能力や適応能力をある程度解明できる可能性がある。

2.2 仮想軌道

仮想軌道制御仮説⁷⁾では人間が作業を行なう場合、手先の運動は環境との相互作用力と仮想軌道の変化、および手先インピーダンスによって実現されると考える。したがってたとえばボールのキャッチングの際に空振りをしてしまい手先に相互作用力が加わらなかったような場合には、手先は仮想軌道を追従することになる。このとき、仮想軌道 $X_v(t)$ は(1)式より

$$X_v(t) = K_e^{-1}(F_e(t) + M_e \ddot{X}_e(t) + B_e \dot{X}_e(t)) + X_e(t) \quad (3)$$

と計算することができる。ここで M_e, B_e, K_e は運動準備インピーダンスである。手先のインピーダンスパラメータは運動中に変化すると考えられるため、(3)式で得られる仮想軌道は実際の仮想軌道とは異なり、作業開始後のインピーダンスの変化も含んだ仮想軌道となる。本論文では作業開始後の人間の運動をシミュレートするためにこの仮想軌道を用いることにする。

以上より、人間が作業を行なっている間に、強制変位印加操作と空振り操作を予測不可能な順序で意図的に発生させることができれば、作業準備インピーダンスと仮想軌道を推定することが可能となる。しかしながら、実際の作業を行なう場合にこのような強制変位操作や空振り操作を加えるのは容易ではない。そこで本論文では、バーチャルリアリティ技術を利用した仮想作業を行なうことを提案する。

3. 仮想作業とインピーダンス計測

3.1 実験装置

Fig. 2に実験装置を示す。本実験では、被験者に力情報を提示するために一軸のリニアモーターテーブル((株)日本トムソン、最大駆動力:10[kgf]、エンコーダ分解能:0.5[μ m])を用いる。リニアテーブルは推力制御されており仮想的に計算したボールとラケットとの相互作用力を被験者に提示することができる。またリニアテーブルには6軸力覚センサ((株)ビー・エル・オートテック、分解能:並進力 x 軸, y 軸: 5×10^{-3}

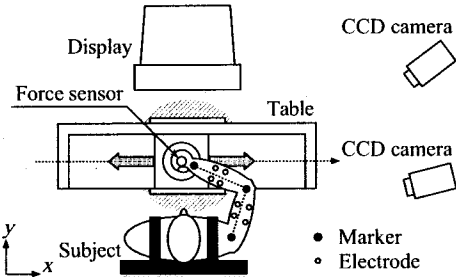


Fig. 2 Experimental apparatus

[N], z 軸: 15×10^{-2} [N], 回転力: 3×10^{-3} [Nm]) を取り付け、被験者がハンドルに加えた力を測定する。被験者の手先はグラスファイバー製のキャストを介してロボットに取り付けられたハンドルに固定され、ディスプレイに表示されるラケットやボールの位置といった視覚情報をもとにキャッチング作業を行なうよう指示される。従来研究^{1)~6)}とは異なり、被験者の手首関節を拘束していないことに注意されたい。これにより、被験者は肘の高さを調節することができる。

作業中は、手首関節の屈筋(橈側手根屈筋:FCU)・伸筋(尺側手根伸筋:ECU)、肘関節の屈筋(上腕二頭筋:BB)・伸筋(上腕三頭筋:TB)、肩関節の屈筋(大胸筋:PM, 三角筋前部:DA)・伸筋(大円筋:TM, 三角筋後部:DP)から表面電位を計測する。また、2台のCCDカメラ(Quick MAG:(株)応用計測研究所)から訓練者の体に取り付けたマーカーを検出することで姿勢を測定する。なお、インピーダンス推定精度については文献¹⁰⁾を参照されたい。

3.2 キャッチング作業

Fig. 3(a)に本実験で設定したボールのキャッチング作業の概念図を示す。ボールは天井から剛体棒で吊るされており、1自由度の振り子運動を行なう。ここで作業座標の原点は初期手先位置に設定した。図中の θ は振り子の角度、 X_f は振り子の支点、 L は振り子の支点からボールの中心までの長さである。さらにボールの特性は粘弾性モデルで近似し(Fig. 3(b))、ラケットは剛体であると仮定する。ここで、ボールとラケットの接触の際に生じる相互作用力 $F_{int}(t)$ を相対位置 $X_r(t) = X_o(t) - X_e(t)$ を用いて

$$F_{int}(t) = \begin{cases} B_b d\dot{X}_b(t) + K_b dX_b(t) & (|X_r(t)| \leq R_b) \\ 0 & (|X_r(t)| > R_b) \end{cases} \quad (4)$$

$$dX_b(t) = X_r(t) - R_b n \quad (5)$$

$$n = \begin{cases} \frac{X_r(t)}{|X_r(t)|} & (X_r(t) \neq 0) \\ 0 & (X_r(t) = 0) \end{cases} \quad (6)$$

と計算する。ここで、 B_b , K_b はそれぞれボールの粘性、剛性で、 $dX_b(t)$ は接触によるボールのめり込み量を表す。ボールは質量 M_b とし、半径は R_b とする。なお、このようなキャッチング作業を取り上げたのは、今後予定しているロボット制御実験における実現可能性を考慮したためである¹¹⁾。

一方、テーブルはインピーダンス制御¹²⁾されており、ラケットの位置 $X_e(t)$ は目標インピーダンス

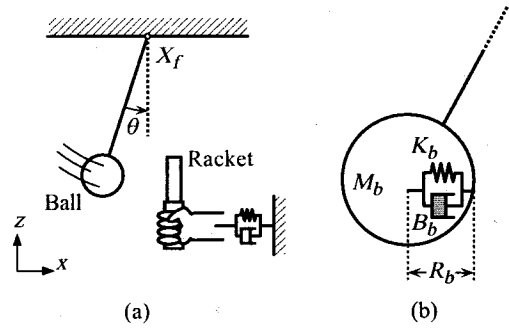


Fig. 3 An example of a catching-a-ball task

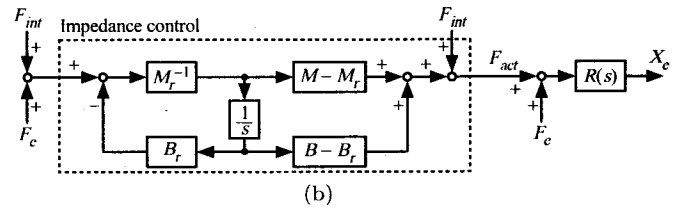
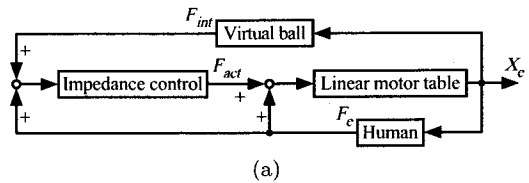


Fig. 4 Impedance control system for a catching-a-ball task

$$M_r \ddot{X}_e(t) + B_r \dot{X}_e(t) = F_{int}(t) + F_e(t) \quad (7)$$

を満足している。ただし、 M_r , B_r はそれぞれテーブルの目標慣性および目標粘性である。Fig. 4(a)にインピーダンス制御のブロック線図を示す。 F_{act} はテーブルへの制御入力である。ここでテーブルの実際のダイナミクス $R(s)$ を

$$R(s) = \frac{1}{Ms^2 + Bs} \quad (8)$$

でモデル化したとき、Fig. 4(a)のインピーダンス制御部をFig. 4(b)のように設計することでテーブルの位置 $X_e(t)$ は(7)式を満たす。ここで M , B はそれぞれテーブルの慣性および粘性摩擦で、本装置では $M = 4.7$ [kg], $B = 47$ [Ns/m]であった。

4. 仮想キャッチング作業時の人間の手先インピーダンス特性

4.1 実験方法と結果

キャッチング実験では振り子の支点 $X_f = [0.3, 2.1]$ [m], 振り子の長さ $L = 2.1$ [m], 初期角度 $\theta_0 = -25$ [deg.]と設定した。また、ボールは質量 $M_b = 0.5$ [kg]とし、粘弾性特性((4)式)は $B_b = 20$ [Ns/m], $K_b = 2000$ [N/m]とした。ボールの半径に相当する(4)式の R_b は $R_b = 0.03$ [m]である。またテーブルは慣性 $M_r = 1$ [kg], 粘性摩擦 $B_r = 20$ [Ns/m]となるようにインピーダンス制御している。さらに、ディスプレイには作業開始を示す信号を表示し、信号点灯後1 [s]後にボールがリリースされるように設定した。

ここで、作業の熟練度を評価するため、ラケットと

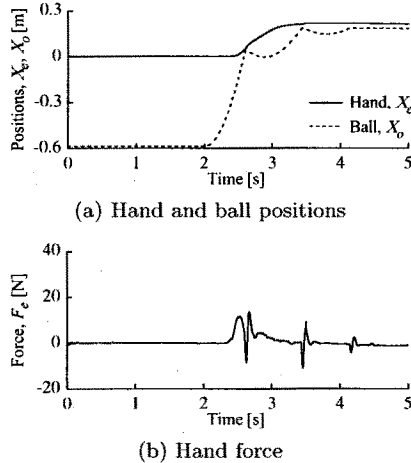


Fig. 5 An example of experimental results of the unskilled subject A ($F_{int}^{max} = 38.09$ [N], $t_{int} = 0.69$ [s])

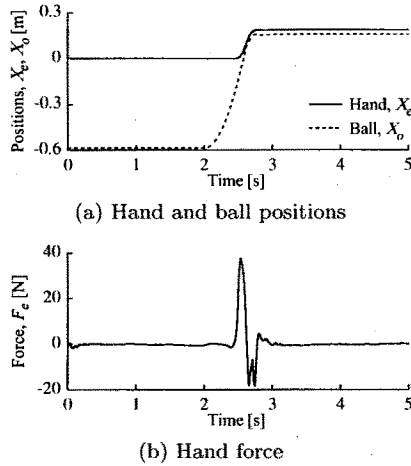


Fig. 6 An example of experimental results of the skilled subject C ($F_{int}^{max} = 19.25$ [N], $t_{int} = 2.20$ [s])

ボールの接触の際に生じる相互作用力の最大値 $F_{int}^{max} = \max_{0 \leq t \leq t_c} F_{int}(t)$, およびラケットとボールとの接触時間 t_{int} (計測時間 t_e のうち, $F_{int}(t) \neq 0$ となった時間の総和) を計算し, 被験者には F_{int}^{max} を小さくし, t_{int} を大きくするように指示した. ここで計測時間は $t_e = 5$ [s] とした.

まず, キャッチング作業に十分熟練した被験者 (Subject C, D) とそうでない被験者 (Subject A, B) を用いて実験を行った. 実験では, 被験者にはキャッチング作業を連続して 120 回繰り返すように指示した. ただし, キャッチング作業時の手先インピーダンスを推定するため, (I) 通常のキャッチング作業, (II) 作業前インピーダンスの計測, (III) 作業準備インピーダンスの計測, (IV) 作業後インピーダンスの計測, (V) 仮想軌道計測 (空振り操作) の 5 種類の操作を一様乱数を用いてランダムな順序で実行した.

Fig. 5, 6 に実験結果の一例を示す. Fig. 5, 6 はそれぞれ未熟練者と熟練者の結果の一例であり, (a) の実線は被験者の手先, 点線はボールの位置の時間変化で, (b) は手先力の時間変化を示す. 図から熟練者は手先の速度をボールの速度にうまく合わせることで滑らかなキャッチングを実現してい

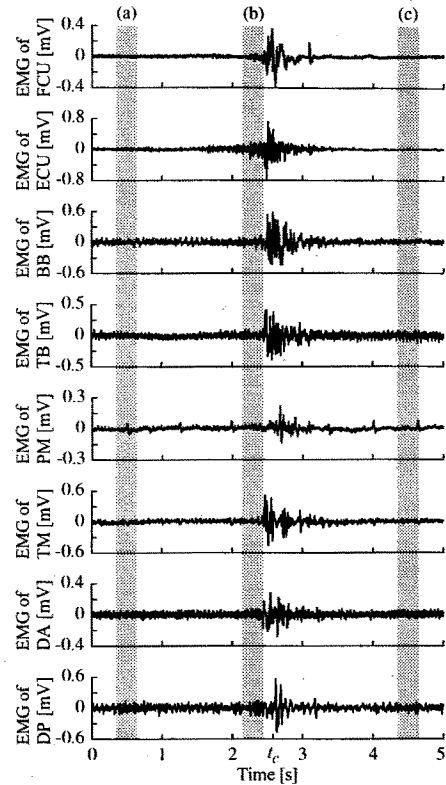


Fig. 7 An example of the measured EMG signals (Subject C)

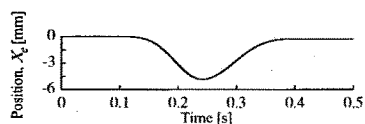
るが, 未熟練者はボールを大きく弾いていることがわかる. また, 未熟練者の手先力が熟練者よりかなり小さいことがわかる.

この実験における F_{int}^{max} , t_{int} を Table 1 に示す. 各パラメータの値は 120 回のキャッチング作業で得られた値の平均値と標準偏差である. Subject A, B と比較して Subject C, D の相互作用力 F_{int}^{max} の値は小さく, また接触時間 t_{int} も長いことから Subject C, D が Subject A, B に対してより良いキャッチングを実現していることがわかる.

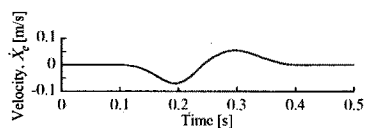
ここで, Fig. 7 に熟練者の筋電位の時間変化の一例を示す. 計測時間は作業開始を示すシグナルが点灯する 1 [s] 前から 5 [s] 間とした. この試行では, ボールとラケットが接触した時刻 t_c は $t_c = 2.6$ [s] であった. 被験者が接触前から各筋を収縮させており, キャッチング作業に対する作業準備を行なっていることがわかる. また, およそ 2.5 [s] から筋活動が活発になっている. そこで作業前のインピーダンスを計測するために手先に強制変位を加える時刻を $t_0 = 0.35$ [s], 作業準備インピーダンスを計測するために手先に強制変位を加える時刻を $t_0 = 2.15$ [s] (接触の約 0.45 [s] 前), 作業後のインピーダンスを計測するために手先に強制変位を加える時刻を $t_0 = 4.35$ [s] とし, 強制変位印加後, 0.3 秒間のデータ (サンプリング間隔 0.001 [s]) を用いて, 最小自乗法により手先インピーダンスを推定した. インピーダンス計測に使用した区間はそれぞれ Fig. 7 中の (a), (b), (c) に対応する.

Table 1 The maximum value of interaction force and contacting time of the subjects

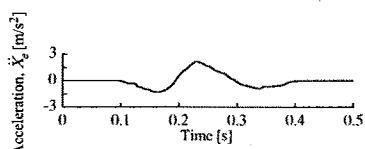
		F_{int}^{max} [N]	t_{int} [s]
Subjects	A	32.91±3.15	1.16±0.45
	B	32.39±3.89	1.75±0.24
	C	25.15±6.83	1.70±0.29
	D	25.22±3.83	1.73±0.30



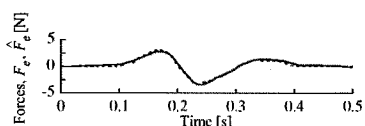
(a) Hand position



(b) Hand velocity



(c) Hand acceleration



(d) Measured and estimated hand force

Fig. 8 An example of measured signals for task readiness impedance measurement (Subject C)

4.2 手先インピーダンス特性

次に、作業準備インピーダンス計測時の実験結果の一例を Fig. 8 に示す。(a), (b), (c) はそれぞれ計測した手先の位置 $X_e(t)$ 、速度 $\dot{X}_e(t)$ 、加速度 $\ddot{X}_e(t)$ を示している。また、(d) の実線は手先力、点線は $X_e(t)$ 、 $\dot{X}_e(t)$ 、 $\ddot{X}_e(t)$ および計測した手先インピーダンス K_e 、 B_e 、 M_e を用いて (2) 式から計算した手先力である。実線と点線はほぼ一致しており、手先インピーダンスが精度良く推定されていることがわかる。

実験結果から求めた作業中のインピーダンスパラメータを Table 2 に示す。(a), (b), (c) はそれぞれ姿勢維持中、作業前、作業準備の手先インピーダンスである。作業前、作業準備の手先インピーダンスの値は (II), (III) の強制変位操作 (4.1 節参照) で推定した手先インピーダンスの平均値と標準偏差であり、姿勢維持中のインピーダンスは被験者に作業準備中と同じ姿勢をとらせた状態で計測した。各パラメータの値は推定した手先インピーダンスの平均値と標準偏差で、(2) 式を用いて最小二乗法を適用した際の相関係数 ρ とともに示している。また、(a) の姿勢維持中のインピーダンスパラメータを基準に、(b), (c) の推定値を検定した (片側検定)。ここで、危険率 5, 3, 1% で有意差ありと判定されたパラメータ

Table 2 Measured human hand impedance during a catching-a-ball task

(a) During maintenance of the stable posture

		K_e [N/m]	B_e [Ns/m]	M_e [kg]	ρ
Subjects	A	61±36	21.8±0.5	1.12±0.10	0.95±0.01
	B	44±23	12.4±1.7	0.94±0.06	0.92±0.01
	C	65±33	25.4±2.5	1.74±0.10	0.96±0.01
	D	98±45	22.7±3.5	1.64±0.11	0.93±0.02

(b) Before motion

		K_e [N/m]	B_e [Ns/m]	M_e [kg]	ρ
Subjects	A	73±43	25.2±2.3***	1.18±0.09	0.97±0.01
	B	83±41**	18.0±1.3***	0.96±0.15	0.96±0.01
	C	84±41	29.0±4.4*	1.74±0.12	0.96±0.01
	D	190±99**	24.0±3.2	1.72±0.20	0.96±0.01

(c) Task readiness

		K_e [N/m]	B_e [Ns/m]	M_e [kg]	ρ
Subjects	A	61±30	24.3±3.1**	1.25±0.14*	0.98±0.01
	B	75±38	16.9±1.6***	0.91±0.12**	0.96±0.01
	C	228±89***	30.1±4.1*	1.86±0.19**	0.98±0.01
	D	187±118	23.5±2.7	1.83±0.25	0.96±0.01

*...5% **...3% ***...1%

にはそれぞれ*, **, ***印を表中に示す。

まず、各被験者ともに姿勢維持中と作業前で剛性が大きく異なっていることがわかる。これは被験者が作業前にインピーダンスを調節していることを意味している。Subject C を除いて作業前と作業準備インピーダンスとの間に大きな違いが見られないのは、人間は作業の直前からではなく、かなり前からインピーダンスを調節しているためである。Fig. 7 から被験者が時刻 0 [s] から筋を収縮させていることがわかる。ただし、Subject C は ECU の筋活動レベルが約 1.5 [s] から変化しており、その結果、作業前に比べ作業準備の剛性が大きくなったと考えられる。被験者の手先インピーダンスは、筋活動レベルだけでなく、姿勢変化にも大きく影響される。本論文の実験条件では、従来研究^{1)~6)}とは異なり肘の高さを変えるとといった 3 次元的な姿勢変化を許している。したがって、試行間における被験者の姿勢変化の影響を受けて、手先インピーダンスが大きく変化する場合がある。たとえば、手先の粘弾性が低くなる方向に姿勢が変化した場合を考えると、筋活動レベルが上昇しても、結果として粘弾性とも値が減少したり、あるいは剛性は増加しても粘性はもとの値まで到達しないという場合が起こり得る。したがって、本論文での実験条件下では、水平面内に上肢を拘束した条件で行なっている従来研究とは少し異なった傾向を示す場合がある。この点については今後、さらに詳しく検討する必要がある。

また、作業後の手先インピーダンスは、被験者ごとにより異なった傾向を示し、安定した結果が得られなかった。この原因はボールを受けとめた後、どうすべきかという点を

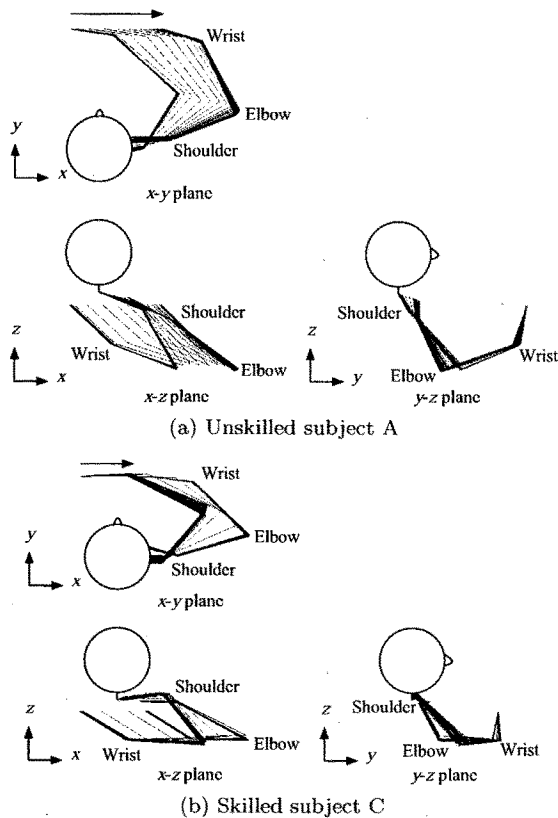


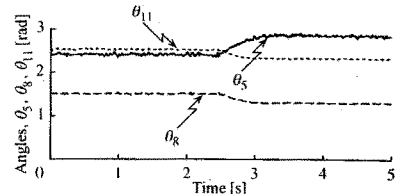
Fig. 9 An example of measured arm postures during a catching-a-ball task

被験者に指示していなかったため、力を緩めたり、元の位置に戻したりといったさまざまな反応が生じてしまったためである。

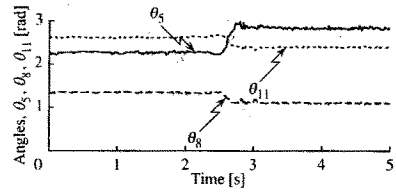
ここで、作業準備インピーダンスに着目すると、Table 2(c)より、未熟練者と比べて熟練者の作業準備インピーダンスが各値とも大きいことがわかる。そこで、Fig. 9, 10に CCDカメラを用いて計測した被験者の姿勢および関節角度の時間変化の一例を示す。Fig. 10の実線は肩関節の水平屈曲伸展角度 θ_5 、破線は肘関節角度 θ_8 、点線は手首関節角度 θ_{11} をそれぞれ示している。図より未熟練者に比べて熟練者はキャッチング作業時に肘を高く上げていることがわかる。さらに熟練者は肘関節の角度を小さく保っており、未熟練者に比べて腕全体を用いてキャッチングを行なっていることがわかる。これは手先の慣性を大きくして、ボールが衝突した際に発生する加速度を抑えるためであると考えられる。一方、Table 3に示す作業準備時の減衰係数と固有角周波数を比較すると、熟練者は減衰係数が低下しているだけでなく固有角周波数も未熟練者より大きくなっている。つまり、熟練者は手先の等価慣性を増加させるとともに仮想軌道に対する手先の速応性を高めるように粘性と剛性を調節しているのである。

4.3 キャッチング作業の再現

最後に、推定した作業準備インピーダンスと2.2で定義した仮想軌道を用いて、コンピュータシミュレーションを行なった。手先の動特性は(1)式を満たしているものとし、イ



(a) Unskilled subject A



(b) Skilled subject C

Fig. 10 An example of measured joint angles during a catching-a-ball task

Table 3 Damping coefficients and natural frequencies of the subjects

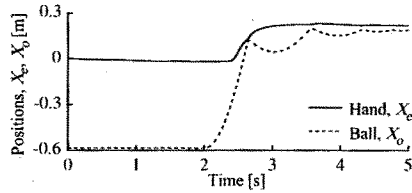
		ζ	ω_n [rad/s]
Subjects	A	1.54 ± 0.46	6.81 ± 1.45
	B	1.15 ± 0.49	8.97 ± 2.11
	C	0.73 ± 0.21	9.57 ± 1.77
	D	0.75 ± 0.31	9.64 ± 2.69

ンピーダンスパラメータおよび仮想軌道に実験で計測した結果を用いることでキャッチング作業の再現を試みた。なお、2.2でも述べたように、実際の手先インピーダンスは動作中変化していると考えられる。本節の目的は、本論文で提案した作業準備インピーダンスと空振り操作時の仮想軌道を用いて人間の運動をどの程度、再現できるかという点を明らかにすることである。

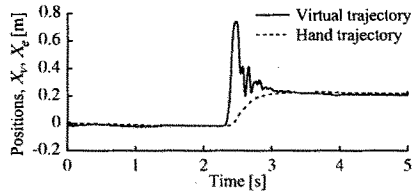
Fig. 11, 12はそれぞれ Subject A, Subject Cの値を用いた結果で、Fig. 5, 6の実験結果に対応する。図(a)中の実線は手先位置、点線はボールの位置である。また、図(b)は実験から求めた手先軌道と(3)式から推定した仮想軌道である。Fig. 12(a)ではボールの勢いをうまく吸収し、滑らかに釣り合い状態に移行しているが、Fig. 11(a)はボールを弾いてしまっている。もちろん、仮想軌道計測時やボールがラケットに衝突した際のフィードバック情報の影響については、今後、詳しく検討する必要があるが、第一次近似の意味では本論文で求めた作業準備インピーダンスと仮想軌道が人間の作業の特徴を十分反映していることがわかる。くせ、こつといった人間の作業の特徴を本手法によりモデル化できる可能性があり、人間の技能のモデル化、そのロボットによる実現に有効な手段を与えると考えられる。

5. まとめ

本論文では動的な接触作業に対する人間の手先インピーダンス特性を解析するため、作業準備インピーダンスを計測し、このインピーダンスを用いて手先の仮想軌道を計算するという方法を提案した。そして、ボールのキャッチング作業を取

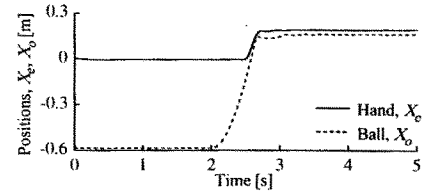


(a) Simulated hand and ball positions

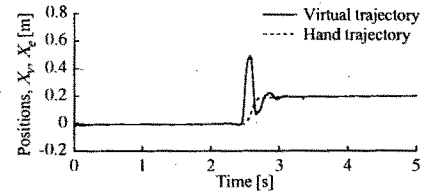


(b) Simulated hand trajectory and estimated virtual trajectory

Fig. 11 Simulation results of Subject A



(a) Simulated hand and ball positions



(b) Simulated hand trajectory and estimated virtual trajectory

Fig. 12 Simulation results of Subject C

り上げ、人間が作業に応じてどのように手先の作業準備インピーダンスと仮想軌道を変化させているかを解析した。その結果、(1) 人間の作業の特徴をインピーダンスモデルにより表現できること、(2) 人間の手先インピーダンスは作業の熟練度により異なること、(3) 人間が手先インピーダンスを作業中変化させていること、などの点を明らかにすることができた。

今後は、対象物やテーブルのインピーダンス特性、視覚や触覚といった被験者に提示する情報の有無によって作業準備インピーダンスがどのように変化するかを明らかにするとともに、未熟練者から熟練者までの習熟の過程を調べることによって人間の作業準備インピーダンス調節能力をより明らかにできるのではないかと考えている。

参考文献

- 1) F. A. Mussa-Ivaldi, N. Hogan and E. Bizzi : Neural, mechanical and geometric factors subserving arm in humans, *Journal of Neuroscience*, 5-10, 2732/2743 (1985)
- 2) J. M. Dolan, M. B. Friedman and M. L. Nagarka : Dynamics and loaded impedance components in the maintenance of human arm posture, *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics*, 23- 3, 698/709 (1993)
- 3) 辻, 後藤, 伊藤, 長町: 姿勢維持中の人間の手先インピーダンスの推定, 計測自動制御学会論文集, 30- 3, 319/328 (1994)
- 4) T. Tsuji, P. G. Morasso, K. Goto and K. Ito : Human hand impedance characteristics during maintained posture, *Biological Cybernetics*, 72, 457/485 (1995)
- 5) 辻, 森谷, 金子, 伊藤: 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, 32-2, 271/280 (1996)
- 6) H. Gomi and M. Kawato : Human arm stiffness and equilibrium-point trajectory during multi-joint movement, *Biological Cybernetics*, 76, 163/171 (1997)
- 7) N. Hogan : The Mechanics of Multi-Joint Posture and Movement Control, *Biological Cybernetics*, 52, 315/331 (1985)
- 8) D. J. Bennett, M. Gorassini and A. Prochazka : Catching a ball: contributions of intrinsic muscle stiffness, reflexes, and higher order responses, *CAN. J. PHYSIOL. PHAR. MACOL*, 72, 525/534 (1994)
- 9) 池浦, 藤井, 猪岡: 手腕系の衝撃吸収特性,

日本機械学会論文集 (C 編), 60-580, 117/123 (1994)

- 10) 辻, 神字, 加藤, 金子, 川村: 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か?, 計測自動制御学会論文集, 35-10, 1300/1306 (1999)
- 11) 野口, 辻, 原田, 金子: ニューラルネットによる非接触型インピーダンス制御のパラメータ学習, *日本ロボット学会誌*, 18-4, 561/568 (2000)
- 12) N. Hogan : Impedance Control: An Approach to Manipulation, Parts I, II, III, *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control*, 107-1, 1/24, (1985)

[著者紹介]

辻 敏夫 (正会員)



1985年、広島大学大学院工学研究科博士前期修了。同年同大学工学部助手。94年同大学助教授。92年ジェノバ大学(イタリア)客員研究員。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。電気学会、日本ロボット学会、IEEE等の会員(工学博士)。

野口 裕史



2000年広島大学大学院工学研究科博士課程前期卒業。同年(株)ソニーに入社。在学中は主に人間とロボットのインピーダンス制御に関する研究に従事。

金子 真 (正会員)



1981年、東京大学大学院工学系研究科博士課程修了。同年通産省工業技術院機械技術研究所入所。90年九州工業大学情報工学部機械システム工学科助教授。93年広島大学工学部第二類(電気系)教授。ロボティクスやセンサの研究に従事(工学博士)。