ハンドルの回転剛性に及ぼす腕の内力効果†

黎 子 椰*・久 保 敬 司**・川 村 貞 夫***

Effect of Internal Forces of Human Hand on Rotational Stiffness of Handle

Ziye Li*, Keiji KUBO** and Sadao KAWAMURA***

This study aims at clarifying the effects of internal force between human arms and a handle on the handle's rotational stiffness. Rotational stiffness of a handle is determined by internal force stiffness and stiffness of human arms. We use the two-link model to analyze the rotational stiffness due to the internal forces, and measure the rotational stiffness as a function of the internal force. Through theoretical calculation and experimental results, it is revealed that the stiffness due to internal force is significantly large in comparison with the stiffness due to the muscle contraction of arms. Moreover, it is clarified that one can effectively increase the rotational stiffness of handle by internal force if the handle is pulled.

Key Words: internal force, stiffness of mechanism, human-arm, analysis of stiffness, handle

1. はじめに

我々の日常生活を眺めると、簡単なスイッチなどによる操作も見受けられるが、ハンドルやレバーなどの機械を人間が操作することが大切な作業も多く存在する。このような人間と機械の相互作用を有する作業にも関わらず、機械の設計については、人間の力学特性はあまり考慮されていなかった。しかしながら、今後はより快適、能率の良い作業を行うために、人間と機械系の協調作業が要求され、機械の特性だけではなく、人間の機械的な特性、人間と機械が接触する際の特性を考慮した機械設計が必要となる。

このような観点から、本研究ではハンドルを人間が操作する問題を取り扱う。特にハンドルに外乱が加わった時に平衡状態のハンドルの位置を保持するために必要な剛性問題を考える。すなわち人間とハンドルとの力学的な接触によるハンドルの回転剛性の変化に着目する。ハンドルの回転剛性は平衡状態におけるハンドルに作用した外乱トルクとそれによるハンドルの回転角度の比と定義される。ハンドルの回転剛性はハンドル自体の機械的な回転剛性と操作者の腕の剛性のみが意識されてきた。ところが、ハンドルを操作するときに、人間とハンドルは閉ループを構成している。従ってハンドルの

の回転剛性に閉ループの機構剛性が影響を与えられ、閉ループの機構剛性に関して、ロボット工学分野では、複数のロボットアームの協調動作やロボットハンドによる物体の把握などの閉じた機構の研究が進められている。花房ら¹⁾は、閉ループ機構における内力の機構剛性に及ぼす影響を解析し、ポテンシャルの内力及び非ポテンシャルの内力によって機構剛性が変化することを報告している。人間の腕もメカニカルな構造から、ハンドルに作用する内力によってハンドルの回転剛性が変化する。ただし、ハンドルと腕の間に内力を生み出すためには筋肉を収縮させなければならないので、内力を発生するために腕自体の剛性が変化すると考えられる。すなわちハンドルの回転剛性については、従来知られているハンドルの機械的な回転剛性と腕の筋肉による剛性に加えて、内力による剛性を考慮する必要がある。

一方、近年、脳の運動制御のメカニズムの解明、人間に協調するロボットの設計などの研究においては、人間の腕の剛性の計測が活発に試みられている。Mussa-Ivaldiら²⁾は、姿勢保持中の手先剛性（手先からみた腕の剛性）を初めて推定し、手先剛性が腕の姿勢に強く依存することを示した。辻ら³⁾は一定の筋収縮レベルの下での姿勢保持中の手先剛性を測定し、上肢の屈・伸筋群の同時活動が剛性楕円の面積を増加させることを報告した。五味ら⁴⁾は、運動中の腕の関節剛性は静止中リラックスした状態よりもおおむね上昇していること、運動中の関節剛性のバランス（肩、肘関節剛性の割合）は大きく変化することを報告した。これらの実験では腕の姿勢はすべて水平面と与えられ、ハンドル操作のような腕の姿勢に触れていなかったが、腕の剛性の基本的な特性及び計測方法を示した。

以上の内力剛性と腕の剛性の研究結果を考えると、我々

† 第13回ロボット学会学術講演会で発表(1995.11)

* 上越教育大学 上越市山屋敷町1

** シャープ(株) 矢板市早川町174

*** 立命館大学 草津市野路町1916

* Joetsu University of Education, Joetsu

** Sharp Co., LTD., Yaita

*** Ritsumeikan University, Kusatsu

(Received September 13, 1996)

(Revised April 9, 1997)

がハンドルを操作している状態について次のような疑問が生じる。

(1) 内力によるハンドル剛性は、腕の筋肉によるハンドル剛性に対してどの程度の割合となるか？

(2)(1)の結果から、筋肉によって剛性を高めずに、内力によって効率的に剛性を増加させる腕の姿勢は存在するか？

本研究ではこのような疑問を明らかにするため、まず、ハンドルの操作に相当する人間の肩、肘関節をハンドルの回転平面に同一平面に配置するモデルと、肩、肘関節をハンドルの回転平面に対して垂直な平面に配置するモデルを用い、それぞれ内力による剛性の解析を試みる。これらの結果より、ハンドルの回転剛性に対して内力剛性が大きく影響することが示される。また、腕の姿勢によって内力剛性の効果が極端に変化することも確認される。次に内力剛性と腕の剛性の両方が加わった状態を実験によって計測する。測定された剛性を解析することによって、上述の2つの疑問に対する答えを明らかにする。

2. 内力によるハンドル剛性の解析

2.1 ハンドルの剛性

ハンドルの操作における人間の筋運動は複雑である。そこで、本研究では腕の内力効果を明確にするため、次のような仮定をおく。

(1) 人間の上腕と前腕のみの運動に着目する。従って、手首の自由度はないものとし、手先に発生する力は肩関節と肘関節のトルクによって生じると考える。

(2) 外乱トルクがハンドルに作用した瞬間、肩及び肘関節トルクは平衡状態のまま変化しない。

(3) 人間の左腕と右腕の幾何学的なパラメータ及び力学的な特性は同じである。

(4) 両手はハンドルを持つ把持点で滑らない。

(5) ハンドル自体の伸び、縮みは無視できるほど小さい。

ハンドル操作中におけるハンドルの回転剛性は次式のように考えられる。

$$K = K_m + K_i + K_h \quad (1)$$

ここで K はハンドルの全体の回転剛性、 K_m はハンドルの機械的な回転剛性、 K_i は内力による回転剛性、 K_h は腕の筋肉による回転剛性である。本研究の対象は内力剛性 K_i と腕の剛性 K_h であるので、以下では $K_m = 0$ とする。

以下の解析は、基本的原理は参考文献1)と同じであるが、双臂によるハンドルの回転運動に特化した形で以下に示す。また、以下の解析は3次元空間での運動としても取り扱える。ただし、内力剛性について各方向の力の役割を考える際に煩雑となる。そこで本論文では2リンクが平面内で運動する場合を想定することによって、容易に各方向の力の働きを解析する方針を立てる。

2.2 半径方向の内力によるハンドル剛性

本研究で扱うハンドルは自動車のハンドルと同じで、Fig. 1に示すようにハンドルの中心が固定されている。人間の肩関節、肘関節を2リンク機構とし、ハンドルの回転平面と同一平面に配置する。 x 軸上の点 R, L は人間の右肩、左肩に相当する。ハンドルを持つ位置、すなわちハンドルを左右対称に握り回転させない状態で x 軸から把持点までの角度を α とする。次にハンドル上の把持位を保持したままハンドルを回転させる角度を θ とする。ここで、ハンドルにかかっている力、力のモーメントがすべて釣り合っている平衡状態を考える。初期状態においてハンドル回転角度を θ とし、2リンクの関節トルク τ より発生する右アームの手先力(手先とハンドルとの内力) $\mathbf{F}_0$ がハンドルに作用しているとする。関節トルク τ と手先力 $\mathbf{F}_0$ の関係は次式で与えられる。

$$\tau = \mathbf{J}_0^T \mathbf{F}_0 \quad (1)$$

ここで、 $\tau = [\tau_1 \ \tau_2]^T$ 、 $\mathbf{F}_0 = [f_{x0} \ f_{y0}]^T$ 、 $\mathbf{J}_0^T$ は2リンク機構のヤコビ行列であり、以下で与えられるものである。

$$\mathbf{J}_0 = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q_1 - l_2 \sin(q_1 + q_2) & -l_2 \sin(q_1 + q_2) \\ l_1 \cos q_1 + l_2 \cos(q_1 + q_2) & l_2 \cos(q_1 + q_2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここに、 q_1, q_2 は各リンクの関節角度である。

Fig. 1に示したように初期状態から外乱トルク Q より、ハンドルに強制変位 $\Delta\theta$ が印加され、アームの関節角 q_1, q_2 は q'_1, q'_2 となる。仮定(2)を述べたように関節トルク τ は平衡状態のまま変化しないので、手先力は $\mathbf{F}_0$ から $\mathbf{F}$ へと変化する。このとき $\mathbf{F}$ は関節トルク τ から求められる。

$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} f_x \\ f_y \end{bmatrix} = [\mathbf{J}^T]^{-1} \tau \quad (3)$$

ここで、 $\mathbf{J}^T$ は強制変位印加後のヤコビ行列である。

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} -l_1 \sin q'_1 - l_2 \sin(q'_1 + q'_2) & -l_2 \sin(q'_1 + q'_2) \\ l_1 \cos q'_1 + l_2 \cos(q'_1 + q'_2) & l_2 \cos(q'_1 + q'_2) \end{bmatrix} \quad (4)$$

さらに手先力 f_x, f_y をハンドルの法線方向の力 f_r と接線方

Fig. 1 Two-link model for analysis of stiffness due to radial internal forces

向の力 f_θ で表すと次式となる.

$$\begin{bmatrix} f_\theta \\ f_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_y \cos(\theta + \Delta\theta) - f_x \sin(\theta + \Delta\theta) \\ f_x \cos(\theta + \Delta\theta) + f_y \sin(\theta + \Delta\theta) \end{bmatrix} \quad (5)$$

外力トルク Q と釣り合うのは内力の成分 f_θ によるトルクである.

$$Q = r f_\theta \quad (6)$$

ここで r はハンドルの半径である. 従って, 内力によるハンドルの剛性 K_i は次式から求められる.

$$K_i = \frac{dQ}{d\theta} = r \frac{df_\theta}{d\theta} \quad (7)$$

ただし, 左, 右アームの手先力が同時にハンドルに作用する場合, 左アームの内力剛性は同様に求められ, ハンドルの剛性 K_i は両者の和となる.

2.3 垂直方向の内力によるハンドル剛性

Fig. 2(a) に示すように座標系 $o-xyz$ を設定する. ハンドルの回転平面に対して垂直方向の内力 F_0 がハンドルに作用している. ここでハンドルは y 軸を中心軸として回転するものとし, z 軸上に人間の右肩, 左肩に相当する点 R, L をハンドル半径と同じ距離に配置する. 手先位置はそれぞれ R, L 点を通り, $z-x$ 平面に垂直な直線と, ハンドルとの交点となる. 外乱トルクがハンドルに加わったとき, 手先位置の z 方向の変位は x 方向の変位に比べて十分小さいとすると, 右アーム, 左アームはそれぞれ R, L を原点とする $y-x$ 平面内でのみ動くとしてもよい. 右アームについて, 強制変位により手先力が F_0 から F に変化するとすると, 強制変位後の手先力 F の x 方向成分 f_x はハンドルの接線方向成分となり, f_x によるトルクは外乱トルク Q と釣り合う. 2.2 節で述べたように f_x は式 (3) より求められる. 従って内力によるハンドルの剛性 K_i は次式から求められる.

$$K_i = r \frac{df_x}{d\theta} \quad (8)$$

左アームについても同様であり, 両者の和が全体の剛性となる.

3. 内力による剛性の数値計算

3.1 半径方向の内力による剛性

初期状態の手先力を Fig. 1 に示した半径方向内力とし, Table 1 に示す被験者 A のパラメータを用いて, 式 (7) により数値計算した結果を Fig. 3 に示す. ただし, ハンドルの半径を 0.17m, 左, 右アームの手先力を同じとした. Fig. 3(a) に示すように内力による剛性 K_i は内力の大きさと線形な関係になり, 引っ張りの内力 (正) をかけると, 剛性 K_i は正になり, 内力が大きくなるほど, 剛性は高くなる. 逆に, 押し付けの内力 (負) をかけると剛性 K_i が負になる. すなわちハンドルが不安定になる. 全体として, 内力によって閉ループの機構的な特性であるハンドルの回転剛性が変化すること

Fig. 2 Two-link model for analysis of stiffness due to axial internal forces

を示している. また, ハンドルを持つ位置 α と剛性の関係を Fig. 3(b) に示す. ハンドルを持つ位置 α を変えると剛性は変化し, $\alpha \leq 0$ の場合により高い剛性が得られた. 被験者 A の場合, ハンドル回転角度 θ を 0 とすると, 内力による剛性が最大になるハンドルを持つ位置 α はほぼ -23° になった. 従って, 外乱トルクに対して, ハンドル剛性を高めるためにはハンドルを持つ位置を -23° にし引っ張り動作を行えばよいことが分かる. ただし, この角度 α は腕の姿勢によって変化するので, 胴体とハンドルの相対的位置関係によって変わる. 次に半径方向内力 $F_0=10\text{N}$ の時のハンドル回転角度 θ と剛性の関係を Fig. 3(c) に示す. この図からハンドルの剛性はハンドルを持つ位置 α 及びハンドル回転角度 θ に強く依存することが分かった.

3.2 垂直方向の内力によるハンドル剛性

一方, 初期状態の手先力を Fig. 2 に示した垂直方向内力とし, 式 (8) を用いた数値計算の結果を Fig. 4 に示す. ただし, 左, 右アームの手先力を同じとした. 半径方向内力をかけた場合と同様に, 引っ張りの内力は剛性 K_i を増加させ, 押し付けの内力は剛性 K_i を低下させることを示している. これは, Fig. 2 から分かるように, 引っ張りの内力をかける時, 強制変位後の分力 f_x によるトルクは外乱トルク Q と釣り合うようになり, 押し付けの内力をかける時, f_x によるトルクは Q を増加させるようになるためである.

Table 1 Paramrtres of the two-link model

	SubjectA	SubjectB	SubjectC
l_1 [m]	0.28	0.25	0.32
l_2 [m]	0.32	0.29	0.34
h [m]	0.30	0.33	0.40
h_l [m]	0.45	0.44	0.45
x_0 [m]	0.20	0.17	0.21

Fig. 3 Numerical analysis on the stiffness due to internal forces

Fig. 4 Numerical analysis on the stiffness due to axial internal forces

4. ハンドル回転剛性計測実験

3章において、内力剛性の数値計算を示した。ここでは人間のハンドル操作時における回転剛性を計測し、3章の結果と比較する。

4.1 実験装置

Fig. 5 に示すように DD モータ（横河プレジジョン製 DR5030B00）にシャフトを介してハンドルを取り付けた。シャフトに取り付けたトルク変換器（昭和測器製 TCF-5K）よりモータの駆動トルクを検出する。ハンドルには 6 軸力センサ（BL オートテック製 FT センサ 30/300）を 2 個取り付け、被験者の手先力を測定する。また、ハンドルの回転角度を DD モータに内蔵したエンコーダより検出する。ハンドルの回転剛性を測定する時、外乱トルクをハンドルに加えばよい。しかしながら、外乱トルクを直接に被験者に与えること

Fig. 5 Signal flow chart of the experimental system

は危険であるので、被験者の安全のため、ハンドルに加えるトルクは次のフィードバック制御を用いて与えた。

$$\tau_e = K_e(\theta_d - \Delta\theta) - B_e(\dot{\Delta\theta}) \quad (9)$$

ここで τ_e は DD モータの駆動トルク、 K_e 、 B_e はそれぞれ位置と速度フィードバックゲイン、 $\Delta\theta$ はハンドルの強制変位、 θ_d は強制変位の目標値である。従って、DD モータよりステップ状の強制変位をハンドルに与える。ただし、目標強制変位は剛性計測のための釣り合い位置より大きく、剛性計測には影響しない値とする。また、2.1 節で述べた仮定 (2) を成立するため、この強制変位をできるだけ小さい振幅でかつ短い時間の間に安定できるように設定する必要がある。そこで本実験では $K_e=150\text{Nm/rad}$ 、 $B_e=5\text{NmS/rad}$ 、 $\theta_d=5^\circ$ とした。制御系全体のサンプリング周期は 0.23ms である。

4.2 実験方法

本実験ではできる限り 2.1 節で述べた仮定が成り立つように実験条件を設定した。

(1) 半径方向の内力の場合 Fig. 6(a) に示すようにハンドルの回転平面を水平面に配置する。被験者は肩、肘関節の以外の関節が動かないようにベルトで椅子に固定され、肩をハンドルの回転平面と同じ高さにする。また、ハンドルを持つ位置を $\alpha=0$ 、両腕の目標内力を同じとする。さらに肘を肩と同じ平面内にするように被験者に指示する。モニターには目標内力と、現在被験者が発生している内力が示される。被験者はモニターに表示された内力を発生しながらハンドルを保持する。

(2) 垂直方向の内力の場合 Fig. 6(b) に示すように被験者の上半身は椅子にベルトで固定され、ハンドルの回転中心と肩を同じ高さにする。また、ハンドルを持つ位置を $\alpha=0$ 、両腕の目標内力を同じとする。肘は肩と手先を含む地面に対し垂直平面内に保持するように被験者に指示する。

(3) ハンドルを握る握力は内力を発生する際に必要となる。被験者には特に指示を与えず、通常の状態の内力の値のみ設定させるようにする。

(4) 3 人被験者には測定前に十分に練習を行わせ、安定し

Fig. 6 Subject and the handle

た値が得られるようにしてから測定を3回ずつ行う。なお被験者は数値計算で用いた値と同じパラメータ値をもつもので、そのパラメータ値は Table 1 に示されている。

5. 実験結果と考察

5.1 半径方向の内力の場合

4.2 に述べたように半径方向の内力をかけた時のハンドル剛性を測定した。引っ張りの内力 ($F_0 = 40\text{N}$) を加えたとき測定した外乱トルクとハンドルの回転変位の一例を Fig. 7 に示す。強制変位の目標値 $\theta_d = 5^\circ$ に対して強制変位 $\Delta\theta$ は 3.3° となり、強制変位を印加してから約 $0.4 \sim 0.5\text{sec}$ 後安定状態になったことが分かった。それで本論文では強制変位印加後 0.5sec の強制変位 $\Delta\theta$ と外乱トルク Q を読みとりハンドルの剛性を求めた。3人の被験者について測定したハンドルの剛性 K (3回の平均値) を Fig. 8 に示す。測定データのばらつきは約 0.3Nm/deg であった。Fig. 8 の実線は Table 1 に示したパラメータを用いた内力剛性 K_i の数値計算結果であり、●印は実験によって求められた全体の剛性の値である。Fig. 8 より理解できることは全体の剛性 K に対して内力剛性 K_i が大きな割合を占めていることである。ただし、ハンドルに対して同じ内力を発生していても筋肉を緊張させて腕の剛性を高めることも可能である。そのようないわゆる力む状態においては内力剛性 K_i が無視できる値となるかもしれない。この疑問に答えるために Fig. 9 に示される実験を行った。Fig. 9 では被験者に同じ内力を発生しながら腕の剛性をできるだけ高めるように指示した。ただし、 50N 以上の内力を発生しながら腕の剛性を高めることは困難であるので、内力 50N までの剛性を測定した。結果的に、筋肉の剛性 K_h を高めることができ、通常状態よりも全体の剛性 K が大きくなっている。しかし、力む状態の値と内力剛性の値を比較しても内力がハンドル剛性に強く影響することが明らかとなった。

式 (1) に従って Fig. 8 の結果から筋肉の剛性 $K_h = K - K_i$ を求めたものが Fig. 10 である。Fig. 10 に示したように押しつける内力 (負) を発生させた時の筋肉剛性は、引っ張る内力 (正) を発生させた時の筋肉剛性に比べやや高くなった。これは肩、肘関節の屈曲・伸展の動作を行う時、屈・伸筋群の筋収縮の作用が異なったためと考えられる。

Fig. 7 Example of measured results

Fig. 8 Changes of rotational stiffness with radial internal forces in normal muscle contractions state

5.2 垂直方向の内力の場合

4.2 に述べたようにハンドルの回転平面に対して垂直方向の内力をかけた時のハンドル剛性を測定した。測定値を3回平均した結果を Fig. 11 の●印に示す。また、Fig. 11 の実線は Table 1 に示したパラメータを用いた内力剛性 K_i の数値計算結果である。半径方向の内力を加えた時と同じように、内力は大きいほどハンドルの剛性は高くなり、内力剛性 K_i は全体の剛性 K に対して大きな割合を示している。

式 (1) により Fig. 11 から求めた筋肉剛性 K_h を Fig. 12 に示す。ここで注目すべきは押しつけの内力 (正) を発生させた時の筋肉剛性に比べ、引っ張りの内力 (負) を発生させた時の筋肉剛性はかなり低かったことである。この結果から、押しつけ時よりも引っ張り時の方が筋活動が低いと想像される。このことを確認するために、この場合のハンドルの操作に最も影響する筋肉である上腕二頭筋 (Biceps brachii), 上

Fig. 9 Changes of rotational stiffness with radial internal forces in maximal isometric muscle contraction state

Fig. 10 Changes of rotational stiffness due to muscle contractions with radial internal forces

腕三頭筋 (Triceps brachii) 及び三角筋 (Deltoides) 前、後部の筋電位を測定した。被験者が最大努力の力 (130N) の約 50 % (70N) を発生させた時の測定結果を Fig. 13 に示す。ただし、この測定では、ハンドルを握った状態で被験者に内力 $F_0 = 0$, $F_0 = -70\text{N}$, $F_0 = 70\text{N}$ の力をゆっくりと発生するように指示したもので、筋電発生のタイミングは被験者本人の意志によるものである。内力を発生しない場合、Fig. 13(c) に示したように肩関節 (Shoulder joint) は前方挙上の動作を行い、腕を持ち上げるため、三角筋前部の筋収縮レベルが高くなった。しかし、上腕二頭筋、上腕三頭筋及び三角筋後部での筋活動はわずかであった。従って、この場合は腕の重力に抗するには三角筋前部の働きが大きいと考える。ハンドルに押しつけの内力を加えた時 (Fig. 13(a)), 肘関節 (Elbow joint) は伸展の動作を行い、押しつけの力を発生するため上腕三頭筋及び三角筋前部の筋収縮レベルは顕著に高まった。それに対して、ハンドルに引っ張りの内力を加えた時 (Fig. 13(b)), 肩関節は後方挙上、肘関節は屈曲の動作を行い、その動作に関与する上腕二頭筋、三角筋の後部の筋収縮レベルはかなり低かった。その時の三角筋前部の筋収縮レベルは $F_0 = 0$ の時より低くなった。これは、上腕二頭筋による引っ張りの力が腕の重力を支える方向に働き、三角筋前部の負荷が小さくなったと考えられる。この結果から、ハンドルと手の内力を発生する際に押しつけよりも引っ張りの方が効率的に内力を発生できることが分かった。以上の考

Fig. 11 Changes of rotational stiffness with axial internal forces

Fig. 12 Changes of rotational stiffness due to muscle contractions with axial internal forces

察より、引っ張りの内力による剛性を利用することによって、筋活動を低く保った状態でハンドル剛性が効率的に高められることが判明した。

6. 結 論

本研究では、腕とハンドルの内力による剛性及び腕の剛性がハンドル剛性に与える影響について理論的及び実験的に検討した。主な内容は次の通りである。

(1) 腕の内力によるハンドルの剛性は、腕の筋肉によるハンドル剛性比べても同じ程度の値であることが明らかになった。

(2) ハンドルを回転軸方向に引っ張った時は、腕の筋収縮レベルを低く保った状態で内力によってハンドル剛性が効率的に高められた。

Fig. 13 Measured EMG signals during stiffness experiments

本研究は科学技術庁の科学技術振興調査費総合研究「システムと人間との調和のための人間特性に関する基礎的・基盤的研究」の一部として行われた。

参考文献

- 1) 花房秀郎, M. Arif ADLI: 閉じた機構の剛性に及ぼす内力の効果, 日本ロボット学会誌 10, 1, 128/134 (1992)
- 2) F.A. Mussa-Ivaldi, et al., Mechanical and Geometric Factors Subservicing Arm Posture in Humans, Journal of Neuroscience, 5, 10, 2732/2743 (1985)
- 3) 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 32, 2, 319/328 (1996)
- 4) 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 32, 3, 369/378 (1996)
- 5) 辻 敏夫, 後藤和弘, 伊藤宏司, 長町三生: 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)

[著者紹介]

黎 子 椰 (正会員)

1983年中国天津大学大学院精密工学専攻修士課程修了。1992年京都大学大学院工学研究科精密工学専攻博士課程修了。1994年立命館大学理工学部助手。1996年上越教育大学助手となり、現在に至る。人間機械協調システム、機械設備の異常診断等の研究に従事。工学博士。日本ロボット学会、システム制御情報学会、日本機械学会等の会員。

久 保 敬 司

1994年立命館大学理工学部機械工学科卒業。1996年同大学大学院理工学研究科情報システム工学専攻修士課程修了。同年よりシャープ(株)に入社、現在に至る。主に自律移動ロボット、人間工学等の研究に従事。

川 村 貞 夫 (正会員)

1981年大阪大学基礎工学部生物工学科卒業。1986年同大学大学院基礎工学研究科博士課程修了。同年同大学基礎工学部助手。1987年立命館大学理工学部機械工学助教授。1995年同教授。1996年より同大学理工学部ロボティクス学科教授。学習制御、空気圧制御、生体ロボティクス、人間工学等の研究に従事。工学博士。IEEE、日本機械学会、システム制御情報学会、日本ロボット学会等の会員。