

解説

生体インピーダンス特性のシステム・インテグレーションを目指して

Toward System Integration of Mechanical Impedance Properties into Human-machine Systems

辻 敏夫* 田中良幸* *広島大学大学院工学研究科

Toshio Tsuji* and Yoshiyuki Tanaka* *Graduate School of Engineering, Hiroshima University

1. はじめに

20世紀の工学技術は、優れた機械システムをいかにして大量に作るかという点に重点をおいて発展してきたと言える。しかし、その機械を使用するのは我々人間である。すべての人にとって使いやすく、意のままに操作可能な機械システムを開発すること、これこそが21世紀の工学に求められるヒューマン・マシン・システム設計の考え方であろう。そのためには、図1に示すように、人間の感覚・運動特性を計測・理解し、その特性を人間と機械の相互作用を考慮しながらシステムにインテグレートすることが必要不可欠となる。

例えば自動車の運転という日常作業一つを例に取ってみても、ステアリング操作やペダル操作に見られる四肢の巧みな協調運動、ステアリング操作とシフト操作の切り替え運動など、高度なスキルを必要とする運動が行われている。したがって、より操作性に優れた自動車を実現するためには、人間の感覚・運動特性を十分に考慮して自動車の設計・開発をせねばならない。

筆者らの研究グループでは、機械インピーダンスを用いて人間の感覚・運動特性の計測とモデル化を行い、その結果をロボット制御、福祉機器、自動車操縦系の研究開発へと応用してきた。本解説では、まず筆者らが行ってきた機械インピーダンスに着目した人間の感覚・運動特性の計測法とその一例について述べる[1]~[4]。そして、それらの計測結果に基づいて研究開発を進めている筋電位駆動型人間支援ロボット[5]~[7]と、ドライビングシミュレータ[9]~[12]について概説する。

2. 人間の感覚・運動特性の計測と理解

2.1 計測システム

上肢による随意運動における感覚・運動特性を明らかにするために、構築した計測システムを図2(a)に示す[3][4]。

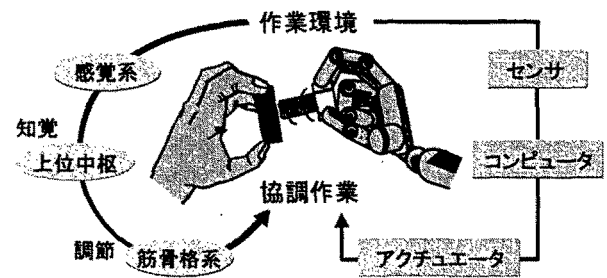


図1 生体システムと機械システムの相互作用

計測システムの本体は、1自由度のリニアモータテーブル((株)日本トムソン)、ロボット制御とデータ計測を行う計算機、手先力や筋収縮レベルなど筋骨格系の活動情報を提示するディスプレイから構成される。テーブル可動部には6軸力覚センサ((株)ビー・エル・オートテック)と被験者が操作するハンドルが取り付けられており、被験者がハンドルに加える力を測定する。ハンドルの位置は、ロボットに内蔵されたエンコーダにより求める。また、テーブル本体の下部に取り付けられた回転台により、テーブルの方向を変化させることができる。計測実験では被験者の手先運動データに加えて、上肢筋群から表面筋電位を測定し、2台のCCDカメラからなるモーションキャプチャ装置を用いて上肢姿勢を測定する。

2.2 計測法

一般に人間の運動特性は慣性、粘性、剛性からなる機械インピーダンスを用いて表現され、図2(b)に示すように人間の手先に外部から強制変位 dX を加えることで計測することができる[1]~[3]。このとき、上肢姿勢維持中の l 次元空間における手先インピーダンス特性は、

$$M_e d\ddot{X}(t) + B_e d\dot{X}(t) + K_e dX(t) = -dF_e(t) \quad (1)$$

で記述される。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行列、粘性行列、剛性行列、 $dF_e(t) (= F_e(t) - F_e(t_0))$ は強制変位 $dX(t) (= X_e(t) - X_e(t_0))$ により発生した反力であり、 t_0 は強制変位の印加時刻である。したがって、強制変位中の手先位置 $X_e(t)$ と手先力 $F_e(t)$ を式(1)に最小二乗法を用いてフィッティングすることにより、手先イン

原稿受付 2006年5月22日

キーワード: Mechanical Impedanc, Human-machine System

*〒739-8527 東広島市鏡山1-4-1

*Higashi-hiroshima-shi, Hiroshima

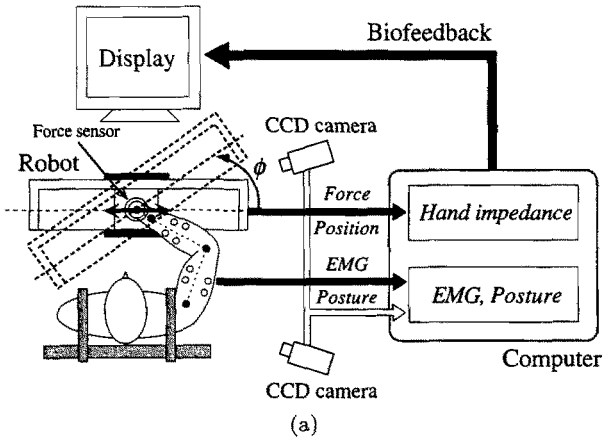


図2 機械インピーダンスによる生体感覚・運動特性の計測

ピーダンス M_e , B_e , K_e を推定できる。
 一方、人間の知覚特性を計測する際には、図2のロボットをインピーダンス制御する[4]。このとき、ロボットの動特性は、

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

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。被験者にはロボットに取り付けたハンドルを操作させ、ロボットに設定した剛性、粘性、慣性の値を口述させる。

2.3 計測例

図3に機械インピーダンスを用いて定量化した人間の運動特性と感覚特性の一例を示す[1][4]。図3(a)は、スティックピクチャで描かれている上肢姿勢において筋収縮レベルを0, 10, 20%と変化させて計測した粘性行列 B_e を楕円で表現したものである。長軸方向には大きな粘性が存在し、逆に短軸方向には粘性が小さいことを示している。このように、人間の手先の運動特性には方向性があり、筋の活動レベルによってある程度、調節することができる。

一方、図3(b)は、ランダムに設定したロボット粘性 B_r (横軸) に対して被験者が知覚した粘性(縦軸)の値をプロットした結果である。設定した値が小さい場合にはかなり上手く知覚ができていたが、大きくなるに従って知覚誤差とデータのばらつきが増加していることが分かる。この

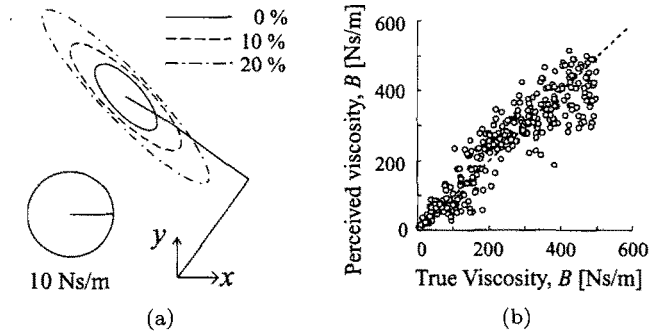


図3 手先粘性特性と粘性知覚特性の一例

ように、人間には作業対象の機械インピーダンス特性を精度よく知覚できる範囲とそうでない範囲が存在する。

次章では、計測した運動・知覚特性を利用して開発したヒューマン・マシン・システムの例を紹介する。

3. 生体インピーダンスのシステムインテグレーション

3.1 筋電位駆動型人間支援ロボット

人間の運動能力には様々なレベルが存在するし、障害が存在する場合にはその度合いに大きな個人差がある。したがって、直感的に操作できるロボットを実現するには、各個人の運動能力レベルに対して高度な適応機能が必要となる。

人間の運動は、上位中枢系から送られてくる神経指令に応じて骨格筋が収縮することによって実現されている。このとき、筋は収縮のレベルに対応した筋電位信号を発生する。したがって、この筋電位から操作者の運動意図を正確に読み取ることができれば、筋電位信号で機械システムを自由自在に操作できる可能性がある。そこで、操作者の運動時に発生する生体信号を利用した筋電位駆動型人間支援ロボットを開発した。

図4に、開発した筋電位駆動型人間支援ロボットのシステム構成を示す[5]~[7]。本システムは、ロボットマニピュレータ、上腕制御系、前腕制御系、フィードバックディスプレイなどから構成される。マニピュレータのアームには Move Master RM-501 ((株)三菱電機)、エンドエフェクタには超音波モータ駆動型動力義手[8]を用いた。また、操作者の個人差、電極位置や疲労、発汗などに伴うEMG信号の時間変動に適応するため、ニューラルネットを利用したEMGパターンの学習・識別機能を備えている。

腕全体の大きな動きを実現する上腕制御系では、磁気を利用した三次元位置センサを入力装置として用いる。オペレータは、装着したセンサの位置とエンドエフェクタの位置を対応させることにより上腕の姿勢を制御する。一方、手先の細かな動きを実現する前腕制御系では、操作者のEMGから前腕動作とその力を推定し、それらの情報に基づいてマニピュレータ前腕部の各関節角度を制御する。このとき、計測した人間の手首関節のインピーダンス特性を用いて前

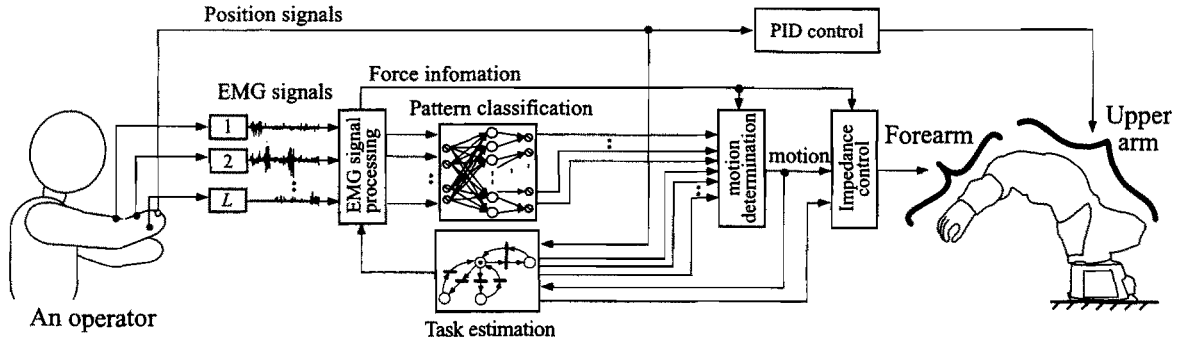


図4 生体インピーダンスを導入した筋電位駆動型人間支援ロボット

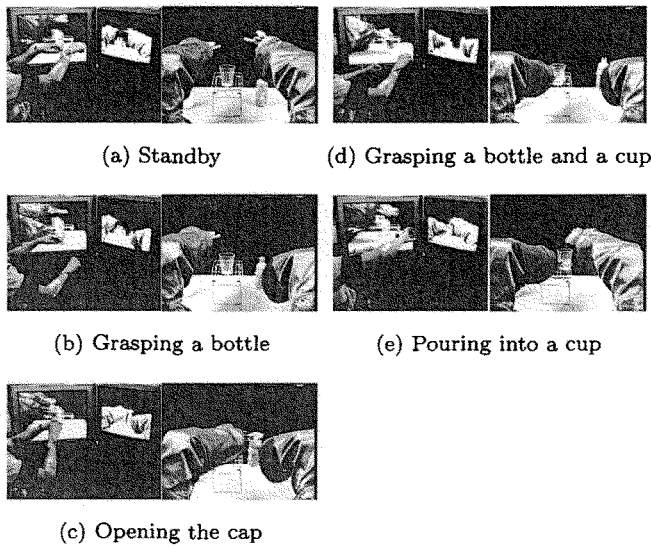
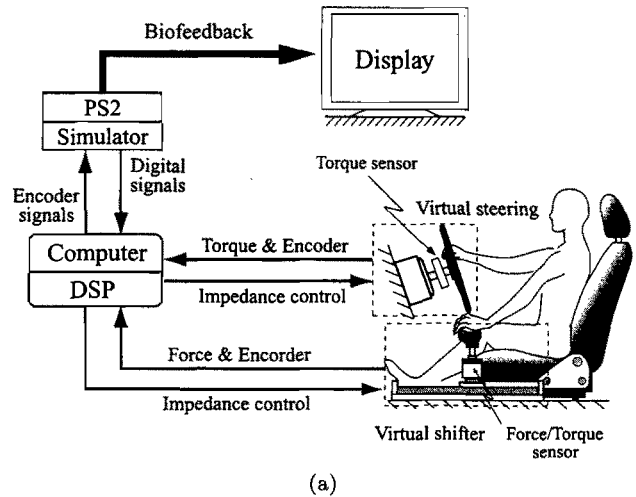
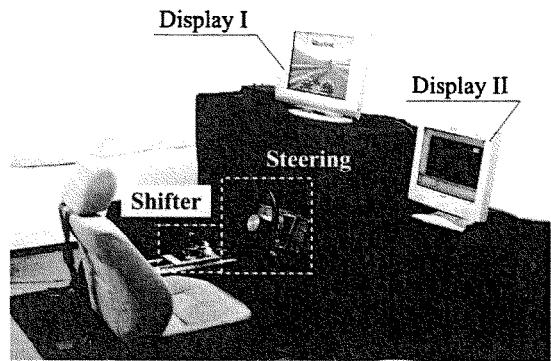


図5 双腕による遠隔操作の風景



(a)



(b)

図6 ドライビングシミュレータ

腕部をインピーダンス制御することで、人間と同様な滑らかな運動を実現している。

図5は2台の人間支援ロボットを用いた遠隔操作実験の風景であり、操作者はモニターを見ながらコップに水を注ぐ作業をスムーズに実施することができている[7]。現在、障害者が日常的に使用可能な支援システムの実現を目標として、新しい生体信号識別法の考案とともにハードウェアの小型化・軽量化を進めている。

3.2 ドライビングシミュレータ

自動車を運転する際、我々はステアリング操作を介して車両スピードやカーブの緩急に応じた操舵反力を知覚し、時々刻々と変化する運転状況に応じて両腕の姿勢や手先力の大きさを積極的に調節している。そのため、運転者に過度な操作量や無理な体勢を強いる操縦系は、操作感の悪化と疲労感を引き起こす直接的な要因となる。したがって、自動車操縦系の特性を人間の感覚・運動特性に応じて設計することができれば、より快適に運転できる自動車を実現できると考えられる。筆者らは、ステアリングやシフトなどの自動車操縦系における手先インピーダンス特性を明らかにすることを目的として、ロボット技術を利用したドライ

ビングシミュレータの研究開発を進めている。

図6に、開発したドライビングシミュレータを示す[10][11]。本システムはステアリング操作とシフト操作を再現するためのアクチュエータ、制御用計算機、ドライビング空間を表示するディスプレイ部から構成される。ステアリング部はダイレクト・ドライブ型回転モータの回転軸にハンドルと操舵力計を取り付けており、操作者のステアリング動作によって発生する操舵力と操舵角が計測できる。同様に、シフト部ではリニアモータの可動部にシフトノブと力覚センサを取り付けており、操作者のシフト動作時の手

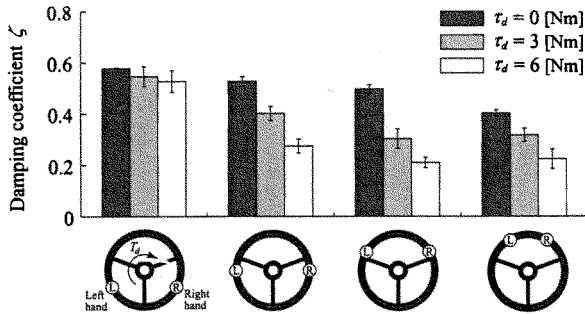


図7 ステアリング操作における人間の運動特性

先力と手先位置が計測できる。各ロボットのモータ制御には、ホスト計算機を介してDSP ボードを使用し、高サンプリングでのシステム制御とインピーダンス計測を実現している。そして、本システムに実装された可変インピーダンス制御により、様々なステアリング特性とシフト特性を操作者に提示することができる。

図7は、4種類の把持位置において、ステアリング操舵力を変化させた際に推定した手先インピーダンスの値を用いて算出した減衰係数の一例である。図から、ステアリング操作における人間の手先運動特性は、把持位置や操舵力に大きく影響されることが分かる。現在、ステアリング以外の運転インタフェース操作におけるインピーダンス計測を進めるとともに、人間の運動インピーダンス特性を考慮した自動車操縦系の設計手法について研究を行っている [12]。

4. まとめと今後の課題

本解説では、機械インピーダンスによる人間の感覚・運動特性の計測法を説明し、インピーダンス特性のシステムインテグレーションを試みた例を紹介した。

人間の運動特性をシステム設計の中心におくという考え方は、まだ始まったばかりである。この視点で人間が使用するすべての機械システムを見直すことにより、新しいシステムへのヒントや新しい研究への手がかりが得られるかもしれない。そして、そのような試みの先に、すべての人間

にとって使いやすい機械システムが実現されるに違いない。

参考文献

- [1] T. Tsuji, P. Morasso, K. Goto and K. Ito: "Human Hand Impedance Characteristics during Maintained Posture in Multi-Joint Arm Movements," *Biological Cybernetics*, vol.72, pp.475-485, 1995.
- [2] T. Tsuji, Y. Takeda and Y. Tanaka: "Analysis of Mechanical Impedance in Human Arm Movements using a Virtual Tennis System," *Biological Cybernetics*, vol.91, no.5, pp.295-305, 2004.
- [3] 辻敏夫, 神宇芳彦, 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.
- [4] 辻敏夫, 島崎知之, 金子真: "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", 日本ロボット学会誌, vol.20, no.2, pp.180-186, 2002.
- [5] O. Fukuda, T. Tsuji, M. Kaneko and A. Otsuka: "A Human-Assisting Manipulator Teleoperated by EMG Signals and Arm Motions," *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, vol.19, no.2, pp.210-222, 2003.
- [6] 辻敏夫: "神経とインタフェースするロボット", 学術月報, vol.58, no.2, pp.38-43, 2005.
- [7] T. Tsuji, K. Tsujimura and Y. Tanaka: 'Myoelectric Teleoperation of a Dual-Arm Manipulator Using Neural Networks,' *Neural Networks in Healthcare: Potential and Challenges* (R. Begg, J. Kamruzzaman and R. Sarker, ed.). pp.154-175, Idea Group Inc., 2006.
- [8] 伊藤宏司, 水岡英明, 辻敏夫, 加藤厚生, 伊藤正美: "超音波モータを用いた3自由度前腕筋電義手", 計測自動制御学会論文集, vol.27, no.11, pp.1281-1289, 1991.
- [9] 田中良幸, 山田直樹, 正守一郎, 辻敏夫: "生体関節トルク特性を考慮した下肢操作特性の解析", 計測自動制御学会論文集, vol.40, no.6, pp.612-618, 2004.
- [10] Y. Tanaka, N. Yamada, K. Nishikawa, I. Masamori and T. Tsuji: "Manipulability Analysis of Human Arm Movements during the Operation of a Variable-Impedance Controlled Robot," *Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems*, pp.3543-3548, 2005.
- [11] Y. Tanaka, R. Kanda, N. Yamada, H. Fukuba, I. Masamori and T. Tsuji: "Virtual Driving Simulator for Measuring Dynamic Properties of Human Arm Movements," *Journal of Robotics and Mechatronics*, vol.18, no.2, pp.177-185, 2006.
- [12] 神田龍馬, 田中良幸, 山田直樹, 福庭一志, 正守一郎, 辻敏夫: "ステアリング操作における人間の手先インピーダンス特性の解析", *ロボティクス・メカトロニクス講演会'05 講演論文集*, 1P1-N-077, 2005.



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。同年広島大学工学部助手。1994年同助教授を経て、2002年より同大学大学院工学研究科教授、現在に至る。工学博士。計測自動制御学会学術奨励賞(1986)、論文賞(2002)、バイオメカニズム学会論文賞(1990)、日本義肢装具学会論文賞(2000)、日本医科器械学会論文賞(2003)、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス部門学術業績賞(2004)、IEEE R&A Society The K. S. Fu Memorial Best Transactions Paper Award (2004)などを受賞。人間とロボットの運動制御、生体信号解析、ニューラルネット、ヒューマン・マシンシステムなどの研究に従事。(日本ロボット学会正会員)



田中良幸 (Yoshiyuki Tanaka)

2001年広島大学大学院工学研究科博士課程後期修了。同年5月広島市立大学情報科学部助手、2002年10月より広島大学大学院工学研究科助手、現在に至る。博士(工学)。主として、人間とロボットの運動制御、マン・マシンシステムに関する研究に従事。計測自動制御学会、日本人間工学会、IEEE等の会員。(日本ロボット学会正会員)