

人の腕の運動機能特性把握と産業への応用

後藤 和弘
機械電子部

Understanding the Human Arm Characteristics and its Application to Industry

Kazuhiro GOTOH
Mechanics & Electronics Division

1. はじめに

通常、人が機械を操作する場合には、人が機械の使い方を習得することが当然のように思われている。そしてその機械や道具をいかにうまくつかいこなせるかが職人と呼ばれる条件でもあった。このことを異なる側面から見ると、機械のもつ特性を人がどれだけ把握し、それに応じて自らの身体の運動特性を調節できるか、であるといえる。一般的に熟練者は必要最小限の力で作業を行うことができ、不要な操作は行わないことから身体の運動特性を巧みに調節できていると考えられる。

将来的な高齢化社会を考えると、作業現場や医療福祉現場におけるロボットや自動機械による支援は今後需要が高まっていくと予想され、人とロボットが協調して作業を行うようになって考えられる。そして、このような場面では人が機械の特性にあわせるのではなく、機械が人の運動特性に応じて自らの動きを調節できることが要求される。

人と協調するロボットについては、以前から多くの研究が行われている。たとえば、Kosugeら¹⁾は人とロボットが協調して物体を運ぶなどの相互作用を伴うメカニカルシステムを提案している。医療福祉分野では、藤江²⁾は、人を「さりげなく」支援するという考え方のもとで歩行介助システムなどを開発している。また、榊らはリハビリテーションにおける訓練機器として、関節癒着防止や関節軟骨の治癒促進の目的で使用される関節可動域訓練装置を開発している^{3)~5)}。

一方、機械が人の特性に応じて自らの動きを調節するには、人の運動制御特性を知る必要がある。人の姿勢や運動制御に関しては機械的インピーダンスの計測が報告されていて、腕や手先、指、肘関節、足関節など、さまざまな部位について研究が行われている。Tsujiら⁶⁾は手先位置や上肢の姿勢などによって手先インピーダンス特性が変化することを示している。Gomiら⁷⁾は2関節での平面内の運動中の手先インピーダンスを計測し、他の研究者の結果と比較している。下肢については、佐藤ら⁸⁾が直立姿勢における足関節の粘弾性、伸張反射、姿勢制御系の機能分担について検討している。このような運動計測、運動制御機構に関する研究成果は、ロボット制御などの工学応用ばかりでなく、動力義手やリハビリなど

の医用応用などに役立つと考えられている。たとえば、辻ら⁹⁾は人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、リハビリテーションへの応用可能性について検討している。

これらの研究では、肘や足関節などの単関節運動、または水平面や垂直面内での多関節運動について解析されているが、多関節運動に関する解析はその困難さからあまり報告されていない¹⁰⁾。そこで本研究では、3次元の運動領域での多関節運動における手先インピーダンスの解析手法について検討するとともに、リハビリ分野等産業への応用について考察する。

2. 方法

2.1 手先インピーダンスの計測

手先インピーダンスとは、筋の活動度によって変化する筋の粘弾性特性を手先における仮想的なバネやダンパ、質量として表す。筋の活動度が高ければ腕は堅くなり、低ければ柔らかくなる。人はこのような特性を積極的に利用し、道具などの物体や周囲環境との相互作用を伴う作業を巧みに実現していると考えられる。

手先インピーダンスの計測については、Mussa-Ivaldiら¹¹⁾が姿勢維持中の被験者の手先に振幅1cm程度の微小変位を与え、このときに手先に発生する力を計測することで、インピーダンスの静的な成分であるバネ要素を推定している。また、Dolanら¹²⁾、Tsujiら⁶⁾はバネ要素である弾性だけでなく、粘性、慣性についても同時に計測を行い、それらの特性について詳細に調べている。これらはいずれも腕の姿勢を維持した状態での計測であるが、Gomiら⁷⁾は2関節での平面内の運動中の手先インピーダンスを計測し、姿勢を維持した状態（静止時）よりも小さくなることを示した。

これら手先インピーダンス特性に関する研究では、手先に微小な変位を与え、そのときに発生する手先力との対応を求めることで特性を計測している。そこで、本研究においても同様の手法を用いることにする。

2.2 手先インピーダンスのモデル化

人がある姿勢を維持している場合に外部から強制的に手先を変位させた場合、姿勢によって決定される手先インピーダンスによって手先に反力が発生すると考えられ

る。このときの手先動特性はインピーダンスモデルを用いて以下のように表すことができる⁶⁾。

$$M(t)\ddot{X}(t)+B(t)\dot{X}(t)+K(t)(X(t)-X_v(t)) = -F(t) \quad (1)$$

ここで、 $X(t)$ は手先の位置ベクトル、 $F(t)$ は手先力ベクトル、 $M(t), B(t), K(t)$ は手先インピーダンスの成分行列で、それぞれ手先の慣性（質量）、粘性（ダンパ要素）、弾性（バネ要素）をあらわす。変位を与える微小時間のあいだにはこれらは変化しないと仮定すると、(1)式は次のように近似表現できる。

$$M d\dot{X}(t)+B d\dot{X}(t)+K dX(t) = -dF(t) \quad (2)$$

$dX(t), dF(t)$ は、それぞれ微小変位を与える直前からの手先位置と発生力の変化分を表し、実験によりこれらを計測すれば手先インピーダンスを推定できる。

2.3 計測システム

開発した計測システムの構成を Fig.1 に示す。本研究でのシステムは、手先を変位させるためのパラレルリンクマニピュレータ（以下、PLM と表す）、手先力を計測する6軸力センサ、制御計測用のコンピュータで構成される。このPLMは3つの腕（リンク）で1つの手先を支持する機構になっており、それぞれのリンクを各々1つのモータで駆動し、全体として3自由度を有する。すなわち、3次元領域内での並進移動のみが可能である。PLMは一般的に可動領域は狭いものの、高剛性があり、高速な移動が可能、高精度な位置決めが可能であるといった特長

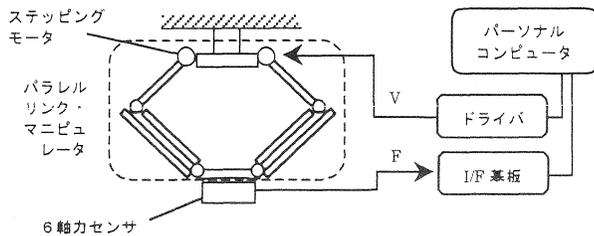


Fig.1 計測システムの構成

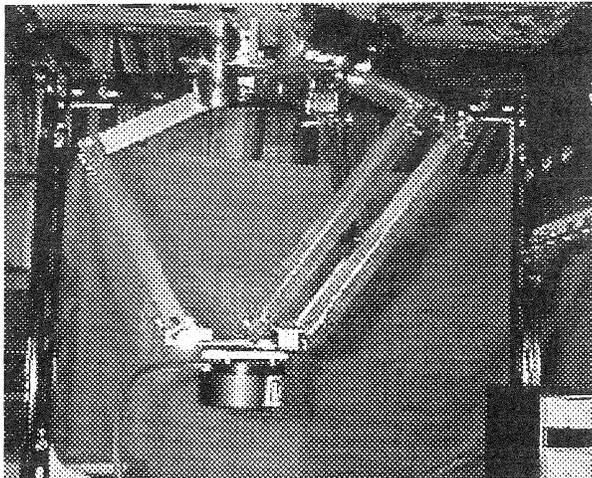


Fig.2 計測システムの外観

があるので、本研究のように短時間のあいだに微小な変位を与える用途には適している。また、手先の移動方向による動特性の差が無く、等方性の特長をもつことから3次元領域での移動にも適しているといえる。PLMの手先には、6軸力センサ（株式会社ニッタ製）を取りつけ、変位時の手先力を計測する。Fig.2に外観図を示す。

3. システムの評価実験

3.1 実験方法

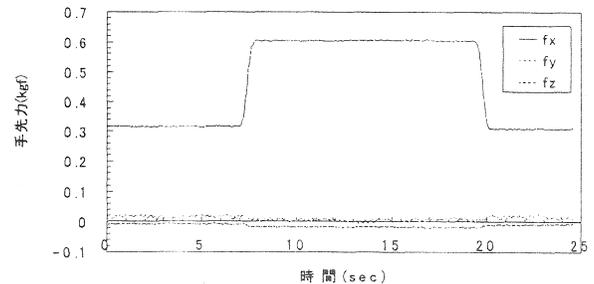
従来の研究では、手先インピーダンスの計測結果を比較すると、特性の傾向は似ているものの、数値的にはかなり異なった値となっている。この原因は微小変位の与え方や推定に用いるデータの時間区間など、実験条件や計測条件の違いにあると考えられ、それぞれの結果を直接に比較することはできなかった。このため Tsuji ら⁶⁾はバネ（バネ定数）や重り（質量）など既知の物理量について予備実験を行い、開発した計測方法を検証している。

そこで、システムを評価するための予備実験として力センサと環境とのあいだに機械バネを取りつけ、PLMの手先を変位させた場合の発生力を計測した。

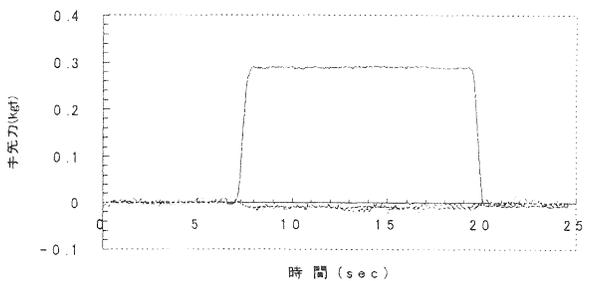
バネ定数の異なる4種類のバネを用意し、これらについて、①振幅が10mm程度の手先変位を与え、定常状態の測定値から静的な特性を計測した。また、②振幅4mm程度の手先変位を与え、動的な変化におけるシステムの性能を評価した。なお、これらの振幅については他の研究者の事例を参考に設定した。

3.2 実験結果

Fig.3に手先発生力の計測結果の一例を示す。PLMの



(a) バイアス除去前



(b) バイアス除去後

Fig.3 手先力の計測例

手先を x 軸負方向に 10mm 変位させ、しばらく静止させた後に元の位置に戻し、このときに機械バネによる発生力を力センサで計測した。力センサには PLM を変位させる前からある程度のバイアス力がかかっているが、インピーダンス特性を計測するには手先を変位させた場合における微小変化分を必要とするので、変位前のバイアス成分を除去しなければならない。Fig.3(a)はバイアス分を除去する前、Fig.3(b)はバイアス分を除去した後の手先発生力をそれぞれあらわしている。図から、手先変位後の力の変化分が得られていることが分かる。

4種類の機械バネについて同様の測定を行った結果をFig.4に示す。手先発生力の定常部分から機械バネのバネ定数を求めると、それぞれ 283, 148, 300, 30(N/m)となり、あらかじめ測定していた値とほぼ一致した結果が得られた。

Fig.5にはPLMの手先を変位させた後、すぐに元の位置に戻した場合の手先位置の計測結果を示している。本研究では微小変位を印加する短時間のあいだには手先インピーダンスが変化しないと仮定しているため、変位の印加方法が推定結果に与える影響は大きい。Tsujiら⁶⁾が

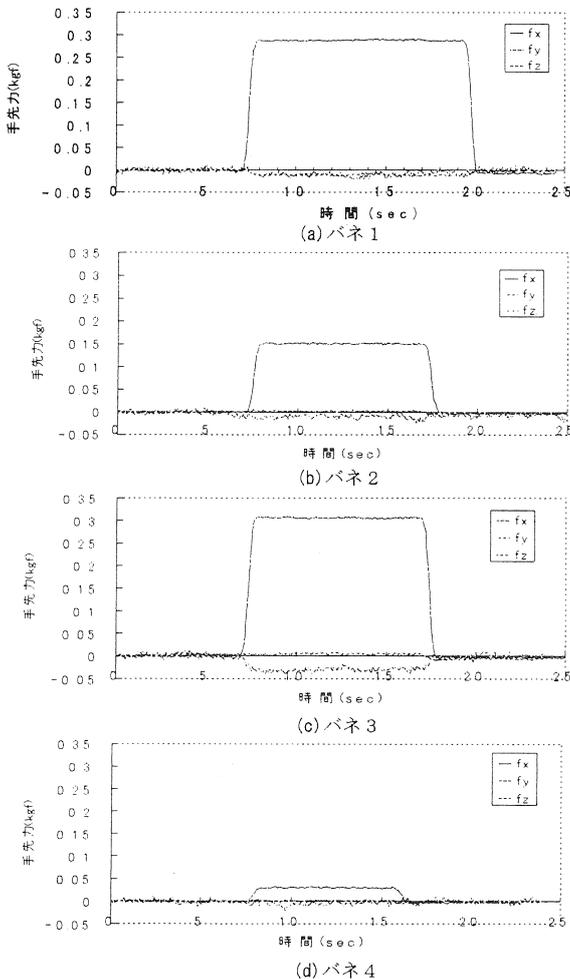


Fig. 4 機械バネによる手先力

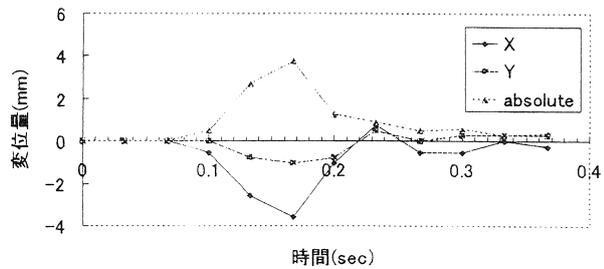


Fig. 5 手先位置の計測例

使用した変位パターンでは、目標手先位置までの立ち上がり時間は 200ms 程度であった。今回の評価実験から、本システムの PLM では 4mm の目標位置に対しおよそ 100ms での変位が可能であることを確認できた。この結果より、手先インピーダンスを計測するのに十分な動作性能を有すると考えられる。

4. 産業への応用可能性について

インピーダンスの概念は、ロボットの制御には既に取り入れられていて、玉子を割らずに柔らかく握ることのできるロボットハンドやリハビリ目的の下肢訓練装置^{3),4)}などにインピーダンス制御が用いられている。

一方、人の運動機能特性を機械的なインピーダンスとして計測する研究はこれまでも報告されているが、その多くは単関節運動や、ある平面内に限定された多関節運動など簡単な運動であった。しかし、最近になって人のインピーダンス特性を実際に応用しようとする研究が報告されてきた。川村ら¹³⁾は合気道の力学解析として、相手の胴体に効果的に力を与えるためには自分の身体全体の機械的インピーダンスをどこまで増加できるかという問題点を提示し基礎実験を行った。辻ら¹⁴⁾は手先インピーダンス・トレーニング装置のプロトタイプを開発し、スポーツ・トレーニングへの応用可能性について紹介するとともに、プロ野球選手など熟練者の運動中のインピーダンスを計測し、そのインピーダンスを目標として訓練することで、高度な技能が必要な作業を効率良く実現できる可能性があることを提案している。また、山田ら¹⁵⁾は生産現場における自動車組立て作業について、作業者が身体のもつ機械インピーダンスを巧みに調整することで作業を実現していると考え、この調整の仕方こそが”スキル”であるとしている。そして「スキルアシスト」と名づけた作業支援機器によって、加齢した作業者のインピーダンス調整能力の不足分を補うように制御することを試みている。

このようなスポーツや生産現場の作業などは空間内で身体を動かすため、本研究で示したように多関節運動における空間的なインピーダンス特性の計測結果を適用できる可能性があると考えられる。また、本間ら¹⁶⁾が開発した

ワイヤ型上肢動作補助装置のように身体を外部から動かす力が作用する場合についても、あらかじめその部位のインピーダンス特性を把握できれば、身体に無理な力を与えることなく外部から動かすことができ、安全に操作できる。

以上のように、スポーツ分野、工場等の生産現場、福祉分野等、人との接触を伴ない、相互作用的な力を必要とする場面への応用可能性がある。

5. まとめ

本研究では、人の腕の運動機能特性を計測することを目標として、3次元の運動領域での多関節運動における手先インピーダンス計測システムの開発を試みた。そして、システムの評価実験として物理的な機械バネについて計測を行い、実際に人の手先インピーダンス特性を計測できる可能性があることを確認した。

また、人の運動制御特性に関する従来の研究を調査し、産業への応用可能性について検討した。

今後は、実際に人の手先インピーダンスを計測し、具体的な実用化についても検討していきたいと考えている。

近年、「人にやさしい」をキーワードとする研究や製品開発が様々な分野で普及しているが、技術者の立場からは技術シーズありきでの開発になり、実際に使用すると使い勝手が良くないなどの問題が判明することも少なくないのではないだろうか。さまざまな分野において「人にやさしいロボティクス」が叫ばれる状況であるが、これを実現するには、人の特性を把握して機器を柔軟に制御する必要性があるとともに、なによりも現場の声を十分に聞くことが重要ではないかと感じる。

参考文献

- 1) Kosuge, K., Fujisawa, Y., Fukuda, T.: Control of mechanical system with man-machine interaction., Proc of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Vol.1, 87-92, 1992
- 2) 藤江: 21世紀の長寿社会を支援するロボット, Gerontechnology Symposium 2000 講演予稿集, 48-49, 2000
- 3) 榊, 近藤, 永田, 松熊, 坂本, 堀内: 多自由度・力制御の可能な下肢用リハビリ装置, ロボット学会学術講演会論文集, 1039-1040, 1995
- 4) 岡島, 田中, 長谷川, 内田, 木村, 富田, 堀内, 近藤, 榊: 関節可動域訓練装置: 柔らかさを与える機構の検討, 総合リハビリテーション, Vol.26, No.4, 363-369, 1998
- 5) 岡田, 榊, 平田, 堀内, 富田, 岡島: 下肢用運動療法装置 TEM, 日本機械学会第11回バイオエンジニアリング講演会講演論文集, 326-327, 1999
- 6) Tsuji, T., Morasso, P.G., Goto, K., and Ito, K.: Human hand impedance characteristics during maintained posture, Biological Cybernetics, Vol.72, 475-485, 1995
- 7) Gomi, H., Koike, Y., Kawato, M.: Human hand stiffness during discrete point-to-point multi-joint movement., Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 1628-1629, 1992
- 8) 佐藤, 藤田: 直立姿勢維持における足関節粘弾性と伸張反射の機能分担, 計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.5, 600-605, 1999
- 9) 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のか?, 計測自動制御学会論文集, Vol.35, No.10, 1300-1306, 1999
- 10) 川村: ソフトメカニカルスーツの研究概念, 日本ロボット学会誌, Vol.17, No.6, 799-802, 1999
- 11) Mussa-Ivaldi, F.A., Hogan, N., Bizzi, E.: Neural, mechanical and geometrical factors subserving arm posture in humans., Journal of Neuroscience, Vol.5, No.10, 2732-2743, 1985
- 12) Dolan, J.M., Friedman, M.B., Nagurka, M.L.: Dynamic and loaded impedance components in the maintenance of human arm posture., IEEE Transaction on System, Man and Cybernetics, Vol.23, No.3, 698-709, 1993
- 13) 川村, 伊坂, 韓, 下中, 三宅: 合気道の力学解析 第2報 身体姿勢と手先保持力の関係, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.1, 17-18, 1999
- 14) 辻, 島崎, 金子, 川村: インピーダンス・トレーニングとそのスポーツ応用, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.1, 11-12, 1999
- 15) 山田, 佐藤, 鴻巣, 森園, 梅谷: スキルアシストの提案 第1報: 作業過程のフェーズにもとづく可変インピーダンス制御, 第17回日本ロボット学会学術講演会予稿集, Vol.1, 431-432, 1999
- 16) 本間, 新井: パラレルメカニズムを用いた上肢動作補助機構, 日本ロボット学会誌, Vol.15, No.1, 90-96, 1997