

広大科研

19

15360226

0100453480

人間の筋特性に基づく感覚-運動統合理論の
構築とインピーダンストレーニング法の提案

課題番号：15360226

平成15年度～平成18年度科学研究費補助金
(基盤研究(B))研究成果報告書

平成19年4月

研究代表者 辻 敏 夫

広島大学図書

広島大学大学院工学研究科 教授

0100453480



はしがき

21世紀の高齢化社会においては、高齢者や障害者に対する介護や看護、また日常生活での活動支援などの問題に対して、ロボット機器を積極的に活用していくことが期待されている。このようなロボット機器を開発する際には、人間の運動特性を十分に考慮して、人間にとって違和感のない制御特性を実現する必要がある、そのためには人間の運動系が備えている特徴をできるだけ定量的に工学の言葉で記述しておく必要がある。

人間の優れた運動能力は主に中枢神経系と運動神経系の相互作用によって実現されているが、効果器である筋骨格系自体にも生体運動の鍵を握る重要な特徴がある。筋は単なる力発生器ではなく粘弾性要素としての性質を備えており、しかもその粘弾性特性は筋の活動レベルに依存して大きく変化する。もちろん手先の慣性特性は腕全体の姿勢によって大きく変化する。人間は、筋レベルの機械インピーダンス（剛性、粘性、慣性）と関節レベルの姿勢制御をうまく組み合わせ、作業に必要な運動制御特性を巧みに調節していると考えられる。

本研究では、人間の筋運動系のインピーダンス特性をシステム・制御論の観点からモデル化し、その筋インピーダンスモデルに基づいた新しいトレーニングシステムを開発した。そのため、[1] ヴァーチャルリアリティ技術を利用したヴァーチャルスポーツシステムを新たに構築し、対象物のダイナミクスに依存した人間の手先インピーダンスの変化を実験的に計測・解析・モデル化した。そして、[2] 自らの筋インピーダンスの調節能力と対象物インピーダンスの知覚能力の2つの観点から人間の能力を実験的に解析し、運動と感覚の両面からインピーダンス特性を評価する新しい統合理論を提唱した。そして、以上の結果を踏まえて、[3] 2自由度リニアモータと可変インピーダンス制御に基づくインピーダンス・トレーニングシステムの開発を行った。このシステムでは、訓練者はインピーダンス知覚能力とインピーダンス調節能力を統合的に訓練する。このトレーニングシステムを実用化することにより、筋運動系の特徴を考慮した効果的な運動リハビリテーションを実現できるだけでなく、在宅で補助的にこのシステムを利用することにより現在の理学療法士不足の問題をある程度、改善できる可能性がある。本報告書では、その主要な成果を学術雑誌等に発表した論文を中心に統括する。

平成19年4月

辻 敏夫

広島大学 大学院工学研究科 教授



研究組織

研究代表者：辻 敏夫 広島大学・大学院工学研究科・教授
研究分担者：金子 真 大阪大学・大学院工学研究科・教授
笠井 達哉 広島大学・大学院国際協力研究科・教授
大塚 彰 県立広島大学・保健福祉学部・教授
田中 良幸 広島大学・大学院工学研究科・助手
福田 修 独立行政法人産業技術総合研究所・研究員

研究経費

	直接経費	間接経費	合計
平成15年度	5,200,000	0	5,200,000
平成16年度	4,200,000	0	4,200,000
平成17年度	4,300,000	0	4,300,000
平成18年度	1,400,000	0	1,400,000
総計	15,100,000	0	15,100,000

研究発表

(1) 学会誌等

1. Human Impedance Perception through Sensory-Motor Integration
Toshio TSUJI, Yoshiyuki TANAKA, Tatuya ABE, Hideki MIYAGUCHI
Journal of Robotic and Mechatronics, Vol.15, No.2, pp.192-199, 2003.
2. Measurement of Human Hand Impedance Characteristics Depending on Dual Arm Configurations
Y.Takeda, Y.Tanaka, and T.Tsuji
Journal of Robotics and Mechatronics, Vol.16, No.6, pp. 635-642, 2004.
3. Brain Activation during Manipulation of the Myoelectric Prosthetic Hand: A Functional Magnetic Resonance Imaging Study
Masaharu Maruishi, Yoshiyuki Takana, Hiroyuki Muranaka, Toshio Tsuji, Yoshiaki Ozawa, Satoshi Imaizumi, Makoto Miyatani, and Junichiro Kawahara
NeuroImage, Vol.21, No.4, pp. 1604-1611, 2004.
4. Analysis of Mechanical Impedance in Human Arm Movements using a Virtual Tennis System
T. Tsuji, Y. Takeda and Y. Tanaka
Biological Cybernetics, Vol.91, No.5, pp.295-305, 2004.
5. Bio-mimetic Trajectory Generation using a Neural Time-Base Generator
Y. Tanaka, T. Tsuji, V. Sanguineti, and P. G. Morasso
Journal of Robotic Systems, Vol.22, No.11, pp.625-637, 2005.
6. 機能的MRI環境下で利用可能な筋電制御型バーチャル義手操作システム
田中 良幸, 野田 聡, 辻 敏夫, 丸石 正治, 村中 博幸
計測自動制御学会論文集, Vol. 41, No. 2, pp. 167-173, 2005.

7. 生体関節トルク特性を考慮した下肢操作特性の解析
田中 良幸, 山田 直樹, 正守 一郎, 辻 敏夫
計測自動制御学会論文集, Vol. 40, No. 6, pp.612-618, 2004.
8. Tracking Control Properties of Human-robotic Systems Based on Impedance Control
Toshio Tsuji, and Yoshiyuki Tanaka
IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans,
Vol. 35, No. 4, pp. 523-535, 2005.
9. Motor Strategies and Excitability Changes of Human Hand Motor Area Are Dependent
on Different Voluntary Drives
Zhen Ni, Nan Liang, Makoto Takahashi, Takamasa Yamashita, Susumu Yahagi, Yoshiyuki
Tanaka, Toshio Tsuji, and Tatsuya Kasai
European Journal of Neuroscience, Vol. 23, pp. 3399-3406, 2006.
10. Functional Demanded Excitability Changes of Human Hand Motor Area
Zhen Ni, Makoto Takahashi, Nan Liang, Yoshiyuki Tanaka, Toshio Tsuji, Susumu Yahagi,
and Tatsuya Kasai
Experimental Brain Research, Vol. 170, pp. 141-148, 2006.
11. 上肢運動訓練を目的とした仮想カーリング作業における人間の感覚運動特性
田中 良幸, 松下 和寛, 辻 敏夫
計測自動制御学会論文集, Vol. 42, No. 12, pp. 1288-1294, 2006.

(2) 口頭発表

a. 国際会議

1. A Virtual Training Sports System for Measuring Human Hand Impedance
Yusaku Takeda, Yoshiyuki Tanaka, Toshio Tsuji
Proceedings of the 2003 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent
Mechatronics (AIM2003), Vol.2, pp. 914-919, 2003.
2. Task Readiness Impedance in Human Arm Movements for Virtual Ball-Catching Task
Yoshiyuki Tanaka, Toshio Tsuji, and Makoto Kaneko
Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,
pp. 478-483, USA, November 2003.
3. A Virtual Prosthetic Hand Using EMG Signals for fMRI Measurements
Yoshiyuki TANAKA, Satoshi NODA, Toshio TSUJI, Masaharu MARUISHI, Osamu
FUKUDA
Proceedings of 2004 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Sys-
tems, pp. 2954-2959, October 2, 2004, Sendai, Japan.
4. Analysis of Human Wrist Joint Impedance: Does Human Joint Viscosity Depend on Its
Angular Velocity?
Yusaku Takeda, Makoto Iwahara, Takashi Kato, Toshio Tsuji
Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, De-
cember, Singapore, pp.998-1003, 2004.

5. Impedance simulator: Analysis of Human Hand Impedance Characteristics
Y.Takeda, Y.Tanaka, T.Tsuji
Proceeding of the 2nd International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions, June, Genova, Italy, pp. 237-242, 2004.
6. Manipulability Analysis of Lower Extremities Based on Human Joint-Torque Characteristics
Yoshiyuki Tanaka, Naoki Yamada, Ichiro Masamori, and Toshio Tsuji
Proceedings of the 2nd International Symposium on Measurement, Analysis and Modeling of Human Functions, June, Genova, Italy, pp. 261-266, 2004.
7. Analysis of Human Hand Impedance Regulation Ability
Yoshiyuki Tanaka, Toshio Tsuji
Proceedings of the 2004 IEEE Conference on Cybernetics and Intelligent Systems, December, Singapore, pp.986-991, 2004.
8. Analysis of Human Perception Ability for Robot Impedance
Yoshiyuki Tanaka; Toshio Tsuji; and Hideki Miyaguchi
Preprints of the 16th IFAC World Congress, We-M10-TO/4, Prague, Czech Republic, July 2005.
9. Motion Dependence of Impedance Perception Ability in Human Movements
Yoshiyuki Tanaka, Tatsuya Abe, Toshio Tsuji, Hideki Miyaguchi
Proceedings of the First International Conference on Complex Medical Engineering, pp.472-477, Takamatsu, May 2005.
10. Manipulability Analysis of Human Arm Movements during the Operation of a Variable-Impedance Controlled Robot
Yoshiyuki Tanaka, Naoki Yamada, Kazuo Nishikawa, Ichirou Masamori, and Toshio Tsuji
Proceedings of the 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robotics and Systems, pp. 3543-3548, Alberta, Canada, August 2005.
11. Manipulability Analysis of Kicking Motion in Soccer Based on Human Physical Properties
Yoshiyuki Tanaka, Mitsuhsa Shiokawa, Hiroyuki Yamashita, and Toshio Tsuji
Proceedings of the 2006 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, pp.68-73, Taipei, Taiwan, Oct. 2006.
12. Human Hand Movements in Skilled Motor Performance of a Virtual Curling Task
Yoshiyuki Tanaka, Kazuhiro Matsushita, Toshio Tsuji, Nobuaki Imamura
Proceedings of the First International Conference on Complex Medical Engineering, May 2007 (In press).

b. 国内学会講演会

1. DSP 装置を用いた仮想スポーツシステムの開発
山下裕之, 坪田広明, 田中良幸, 辻敏夫
第 12 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp.210-211. 2003.
2. 人間の上肢インピーダンス解析ツールの開発
武田雄策, 田中良幸, 辻敏夫
第 24 回バイオメカニズム学術講演会 SOBIM2003 講演予稿集, pp.37-40. 1A2-2. 2003.

3. 上肢関節トルク特性を考慮した手先力操作法の解析
田中良幸, 高野大作, 辻敏夫, 山田直樹, 正守一郎
第 24 回バイオメカニズム学術講演会 SOBIM2003 講演予稿集, pp.41-44. 1A2-3. 2003.
4. fMRI 環境下における生体運動計測システムの開発
今岡宣普, 田中良幸, 辻敏夫, 福田修
第 12 回計測自動制御学会中国支部学術講演会論文集, pp.48-49. 2003.
5. fMRI 環境下における生体信号計測システム
田中良幸, 辻敏夫, 丸石正治, 村中博幸
第 37 回日本人間工学会中国・四国支部大会講演予稿集, pp. 18-19, 2004.
6. 多関節運動における人間の手先インピーダンスの計測とシミュレーション
武田雄策, 田中良幸, 辻敏夫
第 37 回日本人間工学会中国・四国支部大会講演予稿集, pp. 44-45, 2004.
7. 感覚運動統合による人間のインピーダンス知覚
阿部達也, 田中良幸, 辻敏夫, 宮口英樹
第 37 回日本人間工学会中国・四国支部大会講演予稿集, pp. 46-47, 2004.
8. 感覚-運動統合理論に基づいたインピーダンストレーニング
田中良幸, 阿部達也, 辻敏夫
第 5 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門 講演会論文集, 2A1-2, pp.408-409. 2004.
9. 仮想カーリング訓練における運動スキルの解析
松下和寛, 田中良幸, 辻敏夫, 宮口英樹
第 23 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 1J32, 2005.
10. fMRI による人間の追従制御メカニズムの解明
藤村直樹, 田中良幸, 丸石正治, 村中博幸, 笠井達哉, 辻敏夫
第 38 回日本人間工学会中国・四国支部大会 講演論文集 pp. 28-29, 2005.
11. サッカーキック動作の可操作性解析
山下裕之, 田中良幸, 塩川満久, 辻敏夫
第 38 回日本人間工学会中国・四国支部大会 講演論文集 pp. 60-61, 2005.
12. 上肢姿勢維持中の人間の手先力知覚特性
松下和寛, 田中良幸, 辻敏夫
第 21 回生体・生理工学シンポジウム論文集, pp. 255-256, 2006.

(3) 出版物

なし

研究成果による工業所有権の出願・取得状況

1. 知覚特性測定システム
田中良幸, 辻敏夫, 松下和寛
日本国特許出願 2006-309977
2006年11月16日出願

研究成果概要

[平成 15 年度]

平成 15 年度は筋インピーダンスモデルに基づいた新しいトレーニングを実現するために必要となる基盤技術の確立と新たなヴァーチャルスポーツシステムの構築を行った。そして、プレイ中に変化する人間の手先インピーダンスを実験的に計測・解析を試みた。主要な結果は以下の通りである。

1. ヴァーチャルスポーツシステムの開発

対象物のダイナミクスに依存した人間の手先インピーダンスの変化をモデル化するためには、まず人間の手先にインピーダンスを計測するための外乱を与え、その外乱に対する手先の応答を厳密かつ高速に計測する必要がある。そこで、(1) ロボット制御技術と生体信号計測技術、およびコンピュータグラフィックスを有機的に結合させ、新たにヴァーチャルスポーツシステムを構築した。このシステムは、1 自由度ダイレクトドライブ型リニアモータ（日本精工（株））を 2 台直交に配置し、可動部には訓練者が操作するハンドルと運動中に発揮される手先力を計測するための 6 軸力・トルクセンサ（ニッタ（株））が取り付けられている。また、DSP（リンクス（株））を搭載したサーボコントローラを用いてリニアモータを高サンプリング周期で制御することにより、優れた制御特性と高精度のインピーダンス計測を実現している。そして、(2) 対象スポーツとしてエアホッケーとカーリングを組み込み、(3) さまざまな環境ダイナミクスを精度良く提示できることを確認した。

2. 環境ダイナミクスに対する筋インピーダンスへの影響

次に、仮想スポーツにおけるパックの質量やホッケー台表面の摩擦係数などの環境ダイナミクスを変化させて、プレイ中の人間の手先インピーダンスを計測した。そして、筋骨格系の解剖学的知見と運動学的知見を交えて、(1) 被験者の作業に対する熟練度に応じてインピーダンスが異なること、(2) 環境ダイナミクスの変化に対して人間が自らの筋骨格系の特性を適応的に調節していることを確認した。

[平成 16 年度]

平成 16 年度は、前年度に構築したヴァーチャルスポーツシステムを用いて人間の筋インピーダンス調節能力と対象物インピーダンス知覚能力の相互関係を解析し、運動と感覚の両面からインピーダンス特性を定量評価するために必要となる基礎資料を得た。そして、二台のスポーツシステムから成る対戦型システムの基本フレームを構築した。主要な結果は以下の通りである。

1. インピーダンス知覚特性の運動依存性

本研究で取り上げている機械インピーダンスの知覚タスクでは、人間はロボットのハンドルを握って上肢運動を行い、インピーダンス知覚に必要な反力情報を取得している。そこで、被験者に二種類の運動パターンを提示し、運動変位と運動周期の大きさによってインピーダンス知覚特性の運動依存性について解析した。その結果、(1) 剛性知覚能力は運動変位に、粘性・慣性知覚能力は運動周期の大きさによって変化し、それぞれのインピーダンスパラメータには知覚に適した手先運動が存在すること、(2) 掌の受動インピーダンス（皮膚組織）の影響により、インピーダンス知覚能力が劣化すること、(3) インピーダンス知覚において深部体性感覚が重要な役割を担うこと、などが明らかになった。本実験により、効果的なトレーニング・プログラムとともにロボットによる知覚運動アシスト機能の制御系を設計するために必要な基礎資料が得られた。

2. 対戦型スポーツシステムの基本フレーム

昨年度に構築したスポーツシステムと既存システムをネットワーク接続することにより、(1) 遠隔地治療を想定した対戦型スポーツシステムの基本フレームを構築した。そして、(2) カーリング対戦を可能とする制御システムを設計し、基礎動作の確認実験を行った。

[平成 17 年度]

平成 17 年度は、前年度までに構築したヴァーチャルスポーツシステムを拡張して、手先の水平面運動が可能なインピーダンス・トレーニングシステムを開発した。そして、仮想カーリング作業を訓練タスクとして実装し、健常者による基礎訓練実験を通じて習熟度と手先運動特性の関係を明らかにした。主要な結果は以下の通りである。

1. インピーダンス・トレーニングシステム

開発システムは、(1) 訓練者の手先のインピーダンスを計測する手先インピーダンス計測部、(2) 健常者のインピーダンスモデルと患者の訓練履歴から目標のインピーダンスの値を決定するリハビリテーション・プログラム部、(3) 訓練中、計測した手先の運動（位置、速度、加速度、力）、筋電図、インピーダンス、姿勢などの情報を訓練者にリアルタイムでフィードバックするバイオフィードバック部、(4) 2 自由度リニアモータの可変インピーダンス制御を行うロボット制御部から構成される。また、インターネットを介した対戦型トレーニングも可能とした。ロボットは DSP 装置によってインピーダンス制御され、訓練者に合わせた運動負荷を柔軟に提示することができる。そして、訓練中の手先インピーダンス特性を計測する機能を有しており、訓練者の筋骨格系の状態を定量的に解析・評価することが可能である。

2. 仮想カーリング作業による運動訓練

訓練タスクの一例として、カーリング作業をプラットフォームに組み込んだ。訓練者はディスプレイに提示された仮想空間情報をもとに、ハウス中心にストーンが止まるように投げ出すという実際のカーリングを簡略化した仮想スポーツを行う。健常者による基礎訓練実験を通じて、習熟過程における手先運動特性の推移と作業に要する運動スキルの解析・評価を行い、開発システムの有用性を確認することができた。

[平成 18 年度]

平成 18 年度は、前年度までに構築した対戦型運動訓練システムに組み込んだ仮想カーリング作業に対する訓練実験を健常者多数により実施し、対象作業の訓練規範と期待される訓練効果を明確にした。そしてまた、指先による予見型追従運動実験を行い、運動作業の難易度に応じて運動系と上位中枢系の活動関係が変化することを脳神経科学の側面から明らかにした。主要な結果は以下の通りである。

1. 仮想カーリング作業における人間の感覚運動特性

健常者 18 名による作業スキル獲得の訓練実験を行い、仮想カーリング作業の学習過程における手先の空間・時間軌道の推移と訓練規範となる手先速度波形の特徴を明確にした。また、ハンドル慣性の変化に対する被験者の手先軌道と手先インピーダンスの関係から、健常者はストーンのダイナミクスに応じた手先速度波形を生成するように、自らの筋骨格系を積極的に調整することを示した。これにより、仮想カーリング作業を通じて訓練者は (1) 作業環境の特性を知覚する能力、(2) リリース後のストーン挙動をシミュレートして最適な手先軌道を計画する能力、そして (3) 作業目的を達成するために自らの運動特性を調節する能力という、人間の運動制御メカニズムを構成する基本能力の訓練を統合して行えることを確認できた。

2. 運動作業の難易度による運動系と上位中枢系の相互関係

人間の運動訓練効果と学習メカニズムを脳機能レベルから検証することを解明するため、fMRI 環境下で使用可能な力センサを用いて指先の印加力による追従運動実験システムを構築した。そして、目標軌道として与える正弦波の周波数を変化させ、脳賦活部位を健常者 7 名に対して観測した。その結果、運動系では同じ活動量であっても、目標軌道の周波数（作業の難易度）に応じて、補足運動野を中心として脳活動部位が変化することを確認した。これにより、訓練者の運動能力に応じた訓練難易度や訓練効果を、脳機能レベルから解析評価できる可能性を示すことができた。

目次

[1] 筋インピーダンス特性の解析とモデル化

1. Analysis of Human Wrist Joint Impedance: Does Human Joint Viscosity Depend on Its Angular Velocity?	12
2. Measurement of Human Hand Impedance Characteristics Depending on Dual Arm Configurations	18
3. 生体関節トルク特性を考慮した下肢操作特性の解析	26
4. Impedance simulator: Analysis of Human Hand Impedance Characteristics	33
5. 人間の上肢インピーダンス解析ツールの開発	39
6. 多関節運動における人間の手先インピーダンスの計測とシミュレーション	43
7. Manipulability Analysis of Lower Extremities Based on Human Joint-Torque Characteristics	45
8. Manipulability Analysis of Human Arm Movements during the Operation of a Variable-Impedance Controlled Robot	51
9. Manipulability Analysis of Kicking Motion in Soccer Based on Human Physical Properties	57
10. 上肢関節トルク特性を考慮した手先力操作法の解析	63
11. サッカーキック動作の可操作性解析	67

[2] 感覚・運動統合能力の解析

1. Analysis of Human Hand Impedance Regulation Ability	69
2. Analysis of Human Perception Ability for Robot Impedance	75
3. Human Impedance Perception through Sensory-Motor Integration	81
4. Motion Dependence of Impedance Perception Ability in Human Movements	89
5. 感覚運動統合による人間のインピーダンス知覚	95
6. 上肢姿勢維持中の人間の手先力知覚特性	97
7. Tracking Control Properties of Human-robotic Systems Based on Impedance Control	99

[3] 運動タスクに寄与する脳機能の解析

1. Brain Activation During Manipulation of the Myoelectric Prosthetic Hand:
A Functional Magnetic Resonance Imaging Study112
2. 機能的 MRI 環境下で利用可能な筋電制御型バーチャル義手操作システム.....120
3. A Virtual Prosthetic Hand Using EMG Signals for fMRI Measurements127
4. fMRI 環境下における生体運動計測システムの開発 133
5. fMRI 環境下における生体信号計測システム135
6. fMRI による人間の追従制御メカニズムの解明137
7. Motor Strategies and Excitability Changes of Human Hand Motor Area Are
Dependent on Different Voluntary Drives 139
8. Functional Demanded Excitability Changes of Human Hand Motor Area147

[4] 感覚・運動特性とトレーニング

1. Analysis of Mechanical Impedance in Human Arm Movements Using
a Virtual Tennis System 155
2. A Virtual Training Sports System for Measuring Human Hand Impedance 166
3. Task Readiness Impedance in Human Arm Movements for
Virtual Ball-Catching Task 172
4. Human Hand Movements in Skilled Motor Performance of
a Virtual Curling Task 178
5. DSP 装置を用いた仮想スポーツシステムの開発 184
6. 仮想カーリング訓練における運動スキルの解析 186
7. 上肢運動訓練を目的とした仮想カーリング作業における人間の感覚運動特性 188
8. Bio-mimetic Trajectory Generation using a Neural Time-Base Generator195
9. 感覚-運動統合理論に基づいたインピーダンストレーニング 208