

令和 3 年 6 月 18 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04063

研究課題名（和文）作業動特性に対する人間の認知能力解明と筋・脳賦活状態に関する解析手法の創成

研究課題名（英文）Development of analysis method for identifying muscle/brain activation state to clarify the human cognitive ability for work dynamic characteristics

研究代表者

積際 徹（TSUMUGIWA, Toru）

同志社大学・生命医科学部・教授

研究者番号：90362912

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,400,000円

研究成果の概要（和文）：本研究の目的は、動特性を有する作業を行う人間の筋肉や脳機能の賦活状態などの生理情報に関わる解析結果と、人間が行う運動に付随する位置や力に関わるデータを相互に分析することにより、作業対象の動特性に対する人間の応答特性を明らかにする解析手法の創成である。また、本研究の成果は、(1) 作業に対する人間の応答（筋・脳賦活などの生理情報）について解析する手法を提案し、(2) 実験ならびに解析結果より、作業動特性の差異によって筋肉や脳機能の賦活状態などの応答特性が異なることを明らかにしたことである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究によって得られた成果は、筋・脳賦活状態に関わる情報と運動データの相互分析によって、動特性を有する作業に対する人間の応答についてエビデンスに基づいた定量評価が可能となる解析手法を創成したことである。提案手法によれば、人間が扱いやすい操作機器やHMIインターフェース、ロボットなどの運動を規定する動特性の設計時に必要となるデータに関わる解析が実現可能となることから、得られた成果は学術的意義を有するのみならず、未来の先端ものづくりに不可欠となる、ヒトを中心とした機器開発に関わる設計支援を具現化する可能性を秘めており、高い社会的意義を有していると考えられる。

研究成果の概要（英文）：The purpose of this study is to develop an analysis method that clarifies the response characteristics of humans to the work dynamic characteristics by mutually analyzing the physiological information such as the activation state of muscles and brain functions during human work, and the position and force data associated with the movement performed by humans. The results of this study are as follows: (1) We proposed a novel method for analyzing human responses to work dynamic characteristics based on the muscle and brain activations, and (2) We clarified that response characteristics such as the activation state of muscles and brain functions differ depending on the differences in the work dynamic characteristics.

研究分野：ロボット工学

キーワード：ロボット 人間-機械協調系 ロボットの運動制御 マンマシンインターフェース 脳機能解析

## 1. 研究開始当初の背景

マンーマシン系（人間－機械協調系）に関する従来研究において、手腕による作業時の動特性や動作特性を同定する試みや[1, 2]、ロボットとの協調作業系における手腕動特性の調整機能など[3, 4]、人間の動作特性を明らかにしようと試みた研究が数多く行われてきた。その中でも辻らは、人間とリニアスライダロボットの協調動作時の力・位置データによって手腕のインピーダンス特性やその調整能力を明らかにしている[2]。しかしながら、作業に伴う筋肉や脳機能の賦活状態、ストレス状態等の生体・生理情報との関連性は明らかにされていなかった。人間の状態を表す生体・生理情報を含めた精緻な解析が実現できれば、作業動特性に対する人間の認知特性、その調整能力をより定量的に評価できると考えられる。

そこで本研究では、マンーマシン系（人間－機械協調系）において作業対象となる機械やロボットの動特性や動作特性に対する人間の認知特性を解明する解析手法の創成を行う。辻らの研究により、人間は巧みに手腕の動特性（インピーダンス特性）を変化させつつ作業を遂行していること、そして、その調整能力は高いことが示されているものの[2]、それらに付随する人間の生体・生理情報については明らかになっていなかった。本研究では、筋肉や脳機能の賦活状態、それに伴う思考・ストレス状態等の生体・生理情報に関わる解析をもとに、作業対象の動特性や動作特性に対する人間の認知特性の一端を明らかにすることで、機械操作や自動車操縦、ロボットとの協調作業のような、力学的な相互作用を伴う操作や作業に付随する動特性の調整や設計を定量的に実現するために不可欠となる基盤情報獲得のための解析手法の創成を行う。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、人間の作業中における筋肉や脳機能の賦活状態、それに伴う思考・ストレス状態等の生体・生理情報に関わるデータの相互的な分析を実現し、人間が行う運動に付随する位置や力に関するデータとともに解析することにより、作業対象の動特性に対する人間の認知特性を明らかにする解析手法を創成することである。特に、筋・脳賦活状態と運動に関わるデータをリンクできれば、作業に対する人間の応答について、エビデンスに基づいた定量評価が可能になる。このため、提案手法により得られた結果は、力学的な相互作用を伴う作業やロボット、HMIインターフェースの操作に関わる動特性の調整や設計支援を実現するために必要となる有益な基盤情報になり得る。これらの成果は、高い学術的意義を有するのみならず、製造業に関わる基幹産業への波及効果が期待できることから、社会的意義についても有していると考えられる。

## 3. 研究の方法

本研究では、人間が操作する作業対象の動特性（インピーダンス特性として表現される慣性、粘性、剛性から構成される動特性）に対する人間の応答特性について明らかにする。ロボットマニピュレータによってインピーダンス特性を具現化したうえで、人間に提示する運動制御を実現し、それを操作する被験者の応答特性に関する計測を行う。具体的には、光トポグラフィ装置、筋電計測装置、三次元位置計測装置、力覚センサを用いて生体・生理情報を計測する実験を実施し、得られたデータの解析を行う。インピーダンス特性をパラメータとして変化させたときに、その変化に対する応答の差異を検出可能かどうかについて検証を行い、特に筋肉や脳機能の賦活状態に差異が認められるかの検定を実施することで、大局的な応答特性の推移について把握する。次に、操作感覚を表現する主観評価と、先に得られた筋肉や脳機能の賦活状態に関わる定量評価に関わる相互解析を行い、作業対象の動特性に対する人間の応答特性の一端を明らかにする。

## 4. 研究成果

### (1) 作業対象の動特性に対する人間の応答特性に関わる計測実験

図1に実験概要図を示す。被験者は垂直多関節型ロボット(PA-10)の手先位置に取付けたハンドルを把持し、力を加えることによって1自由度の往復運動(運動距離0.1m)を行う。なお、1往復の動作時間を3sに設定したうえで、被験者には事前に練習を行わせて、与えられた時間で動作するように指示を行った。試行時間については30s、レストタイムを30sとして、試行時間とレストタイムを3回連続で実施し、データ計測を行った。

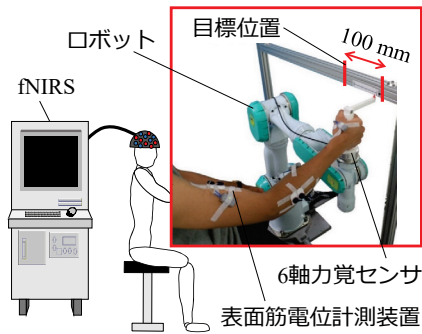


図1 実験概要図

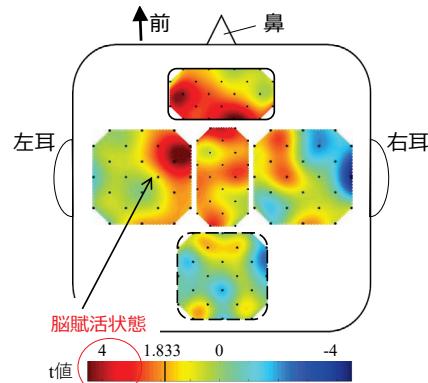


図2 脳機能の賦活状態を表すトポグラフィ図

ロボットの先端位置の運動制御については、被験者が加えた力に応じて慣性・粘性特性に従って動作するアドミタンス制御を施した。実験条件として、慣性特性を表現する慣性係数を $5 \cdot 10 \cdot 15 \text{ kg}$ の3条件、粘性特性を表現する粘性係数を $30 \cdot 60 \cdot 90 \text{ Ns/m}$ の3条件を設定し、これらの組み合わせとなる合計9条件とした。各条件の提示順序はランダムとし、順序効果を排除した。実験条件の表記方法として、慣性、粘性係数をそれぞれM、Dと表現し、慣性係数 $5 \text{ kg}$ 、粘性係数 $30 \text{ Ns/m}$ となる試行の場合、M5D30と示す。被験者は、 $21.9 \text{ (S.D.: } 0.90)$ 歳の右利き健康男性16名とした。

fNIRS計測装置によって酸素化ヘモグロビン(Oxy-Hb)および脱酸素化ヘモグロビン(Deoxy-Hb)を計測し、表面筋電位計測装置によって短拇指屈筋(FPB)、尺側手根屈筋(FCU)、長橈側手根伸筋(ECR)、上腕二頭筋(BB)の計4カ所を計測した。また、6軸力覚センサによって被験者がロボットに加える操作力を計測した。各試行の実験終了時に、“起動しやすさ”、“動かしやすさ”、“止めやすさ”、“総合評価”の4項目についてのアンケート調査を行い、主観評価を実施した。

### (2) 実験結果に関する解析と考察・研究成果

アンケート調査についてはSD法に基づいて実施し、“最も良い”を+3、“良い”を+2、“どちらかといえば良い”を+1、“どちらとも言えない”を0、“どちらかといえば悪い”を-1、“悪い”を-2、“最も悪い”を-3としてスコア化を行った。実験結果より、“起動しやすさ”と“動かしやすさ”については粘性の増加に伴い、評価点数が低くなる傾向が見られた。“止めやすさ”については、粘性が $60, 90 \text{ Ns/m}$ の試行において評価点数が高くなる傾向が確認された。また、“総合評価”については、粘性が $60 \text{ Ns/m}$ において評価点数が高くなる傾向が見られた(図3参照)。

筋活動については、被験者によって筋電強度等に差異が生じることから、RMS処理後に正規化を行い、%EMG値を求めて比較を行った。解析として、各条件間で%EMG値に差があるか、また、各条件間で操作力に差があるか、について、Tukey検定( $p < 0.05$ )を行った(図3参照)。個別の筋肉に関するデータとして、尺側手根屈筋の賦活状態に関する解析結果を図4に示す。全筋群と操作力に対する解析において、慣性の大きさにはよらず、粘性の増加に伴って筋賦活量、操作力ともに有意な増加傾向にあることが明らかになった。

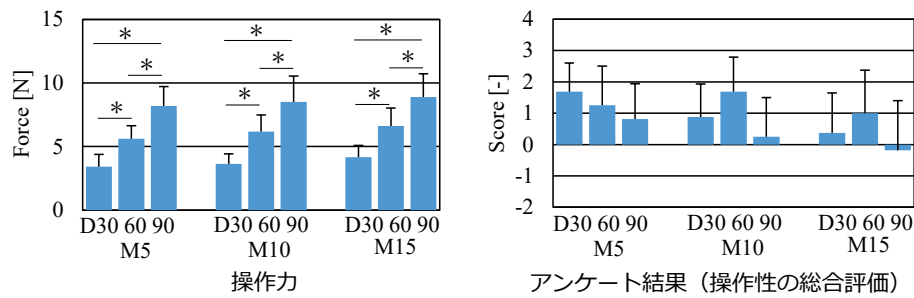


図3 操作力とアンケート結果の解析

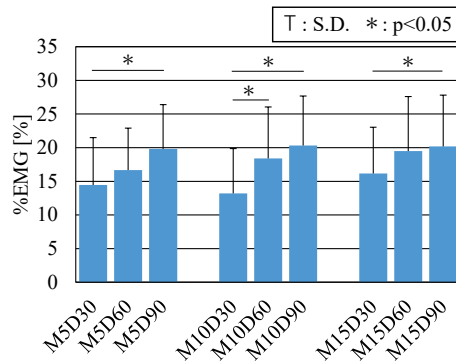


図4 尺側手根屈筋の賦活状態

脳活動の同定については、血行動態信号を測定するために広く用いられている Oxy-Hb に関する解析を行った。安静時と課題試行時における Oxy-Hb に差があるか、について、t 検定(p<0.05)を行った解析結果を図 5 に示す。全条件に共通して、両側の一次運動野における賦活、ならびに、同側側の一次運動野における試行時間中の継続した賦活、および、時間経過に伴う前頭前野の活動低下が確認できた。また、一次運動野に関しては、実験課題の難易度が高い場合や緻密な運動において、同側側が賦活するとの報告があり[5]、本実験においても同様に同側側で継続した賦活が確認されたことから、対象とした実験動作そのものが被験者にとっては複雑な動作であったと示唆される。この原因については、日常的な動作において粘性特性を直接的に感じる機会が少ないことから、実験動作に関わる粘性特性に対して現われた応答であったと推測されるが、今後、更なる解析と検証が必要となる。

前頭前野における受動的な知覚学習の初期段階を示す傾向に関して、まず、Oxy-Hb が増加し、その後減少していくことが知られているが[6]、本実験においても同様の結果が確認された。また、M15D90 の実験条件では、アンケート調査の“起動しやすさ”、“動かしやすさ”、“総合評価”の計 3 項目について、最も点数が低い結果となった(図 3 参照)。加えて、全 9 条件の中で M15D90 の実験条件のみにおいて、動作イメージの作成を行う際に賦活する領域[7]とされる対側側の前頭前野において賦活が確認できなかった。本条件については、他の 8 条件と比較して、被験者が動作イメージを掴むことが困難であったと推測され、操作しにくいと感じていたと考えられることから、アンケート調査における評価点数が最も低くなったと考えられる。

慣性 5 kg の実験条件においては、粘性の増加に伴って前頭前野の賦活 CH 数が増加していた。これは賦活領域が増加していることと等価であり、脳活動が活発になっていることを意味している。また、粘性 30 と 90 Ns/m の実験条件では、全筋群において粘性の増加に伴い筋賦活量が有意に増加し、アンケート項目の“起動しやすさ”と“動かしやすさ”に関して評価点数が有意に低くなることが明らかになった。慣性 10、15 kg の実験条件においても同様の傾向が確認できたものの、粘性係数と慣性係数の比である D/M 値が高くなるほど、筋賦活量および“起動しやすさ”と“動かしやすさ”に関して顕著な差異が見られた。この点についても、日常動作における粘性特性との接触機会の問題が挙げられると推測できる。これらの結果に関わる本質的な原因の解明については、今後、解析を実施していく予定である。

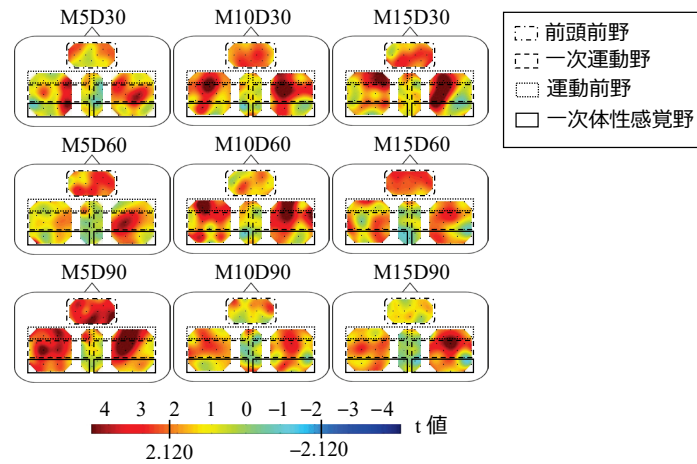


図5 脳機能の賦活状態（光トポグラフィ図）

このように、本研究課題の主たる成果は、脳・筋活動解析およびアンケート調査から慣性・粘性特性を有する機器操作時における人間の応答特性に関する評価を行い、作業対象が有する動特性の差異が、人間の応答特性に影響を与えることを明らかにした点である。また、主観評価と定量評価の両面から解析を行う提案手法の有効性についても示すことができ、当初の研究目的を果たすことができた。

### (3) 研究限界

本研究においては、作業時のストレス状態の計測や思考状態を調査し、明らかにする必要があったが、今回実施した実験では計測上の限界から実現できなかった。また、種々の計測実験によって膨大な量のデータが得られているが、データ容量が相当量に及ぶことから、解析済みのデータは未だ一部にとどまっている。このため、現段階では、人間の応答特性に関わる大局的な変化についてのみを確認し、脳機能・筋活動の応答特性における差異を紐付けているに過ぎない。これらは本研究の限界であり、今後、得られたデータから判明した現象に関する本質的なメカニズムや動特性に対する認知分解能について明らかにしていくことを付記しておく。

### <引用文献>

- [1] 辻敏夫、加藤荘志、金子真、人間—ロボット系の追従制御特性、日本ロボット学会誌、vol.18、no.2、pp.285–291、2000
- [2] 辻敏夫、神字芳彦、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整できるのか？、計測自動制御学会論文集、vol.35、no.10、pp.1300–1306、1999
- [3] Ikeura, R. et al, Investigating the Impedance Characteristic of Human Arm for Development of Robots to Cooperate with Human Operator, *Proc. of IEEE Int. Conf. on Systems, Man and Cybernetics*, pp.676-681, 1999
- [4] 矢野賢一、前刀大輝、長田継伸、加藤典彦、手先剛性推定に基づく研削抵抗制御による精密手仕上げ加工の実現、日本機械学会論文集（C編）、vol.78、no.792、pp.2884-2897、2012
- [5] Morishita, T., Ninomiya, M., Uehara, K. and Funase, K., Increased excitability and reduced intracortical inhibition in the ipsilateral primary motor cortex during a fine-motor manipulation task, *Brain Research*, vol.1371, pp.65–73, 2011
- [6] Head, J. and Helton, W. S., Passive perceptual learning versus active searching in a novel stimuli vigilance task, *Brain Research*, vol.133, no.5, pp.1481–1489, 2015
- [7] Vogt, S., Buccino, G., Wohlschläger, A. M., Canessa, N., Shah, N. J., Zilles, K., Eickhoff, S. B., Freund, H. J., Rizzolatti, G. and Fink, G. R., Prefrontal involvement in imitation learning of hand actions: effects of practice and expertise, *NeuroImage*, vol.37, pp.1371–1383, 2007

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件）

1. 発表者名 東 悠介, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 大脳皮質・筋活動解析に基づく人間 - ロボット協調作業系におけるインピーダンス特性評価
3. 学会等名 第38回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 西原 由佳, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 円筒型可変アドミッタンス機構を用いたロボットの運動制御に関する安定解析
3. 学会等名 第38回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 伊藤 大樹, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 可変アドミッタンス制御を実現する力覚情報調節機構の開発
3. 学会等名 第38回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 野田 大介, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 リアルタイム筋収縮提示システムを用いたペダリング動作時における下肢筋群収縮解析
3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 青木 宏充, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 協調運搬作業時におけるリーダー・フォロワの役割が脳活動及び運動に与える影響
3. 学会等名 第41回バイオメカニズム学術講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shun Watanabe, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa
2. 発表標題 Gait Analysis of Walking Locomotion Enhanced by an Impedance-Controlled Gait-Aid Walker-Type Robot
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Rio Okatani, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa, Mitsuhiro Narusue, Hiroto Nishimura, Yuusaku Takeda, Toshihiro Hara
2. 発表標題 Muscle and Brain Activations in Cylindrical Rotary Controller Manipulation with Index Finger and Thumb
3. 学会等名 IEEE International Conference on Robotics and Automation
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shun Watanabe, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa
2. 発表標題 Gait Assessment on EMG and Trunk Acceleration with Impedance-Controlled Gait-Aid Walker-Type Robot
3. 学会等名 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Shun Watanabe, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa
2. 発表標題 Gait Analysis of Walking Locomotion Enhanced by an Impedance-Controlled Gait-Aid Walker-Type Robot
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 杉田 俊, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 可変アドミッタンス制御を実現する操作力調整機構
3. 学会等名 第37回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 竹内 良樹, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 マン・マシンインターフェイスにおける操作支援トルクに対する操作性評価
3. 学会等名 第37回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡谷 梨央, 積際 徹, 横川 隆一, 成末 充宏, 西村 啓人, 武田 雄策, 原 利宏
2. 発表標題 示指・拇指によるつまみ回転操作時の筋・脳賦活解析
3. 学会等名 第37回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2019年



1. 発表者名 田中 懐, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 円筒形物体操作における上肢の筋活動および脳活動解析
3. 学会等名 第36回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 山本 洋介, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 把持・把握条件による機器操作時の脳・筋賦活と操作性評価への影響
3. 学会等名 第36回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 中島 詩惟, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 協調運搬作業におけるリーダ・フォロワの役割が脳・筋活動と運動に与える影響
3. 学会等名 第36回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Kai Tanaka, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa
2. 発表標題 Analysis of muscle activity of upper limbs and cortex brain function in cylindrical object manipulation
3. 学会等名 International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yosuke Yamamoto, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa
2. 発表標題 Identification of brain/muscle activation and instrument maneuverability under pinching and grasping condition
3. 学会等名 International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinobu Nakajima, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa
2. 発表標題 Influence of leader and follower role in human-human cooperative transportation task on brain-muscle activation
3. 学会等名 International Symposium on Artificial Life and Robotics (国際学会)
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関