

令和 6 年 6 月 12 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21K03973

研究課題名(和文) 操作・作業対象物の動特性に対する人間の運動特性調整能力と適応メカニズムの解明

研究課題名(英文) Analysis of human motor skill and its adaptation mechanism to the dynamic characteristics of manipulated objects

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) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人間-機械協調系における操作・作業対象物が有する動特性に対するヒトの運動特性調整能力と適応メカニズムの一端を解明することを目的として、作業実施中の脳血流動態・筋電位計測、運動計測、感性評価によって得られた種々のデータをもとに多面的な解析を試みた。研究期間を通して様々な作業や運動を対象とした計測実験を行い、脳・筋賦活状態や運動特性、主観評価に関する統合的な解析を行うことによって、人間の応答特性に関わる様々な知見を明らかにすることができた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

作業対象が有する動特性の差異に対する人間の運動・生体生理・心理状態の応答特性の一端を明らかにした本研究の成果については、機械操作のような力学的相互作用を伴う作業に付随する動特性パラメータの調整を定量的に実現する設計手法として応用できることから、その学術的・社会的意義は大きいと考えられる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we aimed to elucidate aspects of human motor skills and its adaptation mechanisms to the dynamic characteristics of manipulated objects within human-machine physical interaction systems. We conducted multidimensional analyses based on various data obtained from measurements of cerebral blood flow dynamics, electromyography, motion analysis, and subjective evaluation during task execution. Throughout the research period, measurement experiments were conducted on various tasks and movements. By integrating analyses of muscle and brain activation states, motor characteristics, and subjective evaluations, we were able to reveal various insights into human response 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 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

人間-機械協調系において、人間は巧みに手腕の動特性（インピーダンス特性）を変化・調整させながら協調作業を行うことが明らかにされている[1][2]。しかしながら、人間自身のインピーダンス特性とその変化に関する同定実験に基づく解析が主体となっており、作業対象物が有する動特性に対する調整能力や適応過程については解明されておらず、種々の課題が残されていた[3]。近年においては、作業中における筋肉や脳機能の賦活状態についての計測を行い、作業に伴う人間の応答特性（運動・生体生理・心理情報）に関わる解析が実施されつつあるものの、作業対象物が有する動特性に対して発現される人間の運動特性については明らかにされていなかった。

2. 研究の目的

本研究の目的は、人間の生体生理・心理状態を表す筋・脳賦活状態の解析結果と、運動特性に付随する位置・カデータならびに主観評価を相互的に解析することにより、“ヒトの身体運動に関わる制御メカニズム”の一端を明らかにすることである。ヒトの運動制御に関わる本質解明に繋がる知見が明らかにできれば、機械操作や自動車操縦のような力学的相互作用を伴う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ことが可能になると考えられるため、その学術的意義は大きい。そこで本研究では、人間が操作・作業を行う対象となる機械やロボットの動特性が人間の運動・生体生理・心理状態に与える影響に関する解析を行い、動特性に対する人間の応答特性、ならびに、運動制御に関わる調整能力の一端を解明することを目指す。

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、剛性など）に対する人間の運動制御戦略を明らかにするために、生体生理情報計測（脳血流変化量・筋電位）、運動情報計測（位置・力）、心理情報計測（脳血流変化量・主観評価）を同時に行い、実験パラメータ間の関連性や相関の有無を明らかにした。

実験の概要図を図1に示す。本実験では、2カ所の目標位置（ポイントA、B）に対してロボットの先端位置が合致するように手腕動作を繰り返す往復運動を実験課題とした。アーム型ロボットPA-10（三菱重工業社製）と力覚センサ（Leprino社製）を使用し、被験者が操作ハンドルに加えた操作力  $F(t)$  [N]を計測してインピーダンスモデル（式(1)）に従うようにロボットの運動制御を行った。被験者とロボットの運動計測については、3次元位置計測装置（Northern Digital社製）を使用した。なお、被験者は健康な男性13名（22.3（S.D.: 1.11）歳）である。

$$M\ddot{x}(t) + D\dot{x}(t) = F(t) \tag{1}$$

ここで  $x(t)$  はロボット先端位置 [m]であり、 $M$  は慣性係数 [kg]、 $D$  は粘性係数 [Ns/m]を表す。実験条件は慣性係数（5・10・15 kg）と粘性係数（30・60・90 Ns/m）を組み合わせた計9条件とした。また、各条件の実験順序はランダムとし、順序効果を排除した。課題を行う時間（Task Time）を30 s、休憩時間（Rest Time）を30 sに設定し、両者を合わせたものを1試行と定義して、3試行を1セットとしたうえで、各条件において1セットずつ実験を行った。なお、本研究については、同志社大学「人を対象とする研究」に関する倫理審査委員会による承認を得ている。

主観評価についてはSD法を用いて、“動かしやすさ”、“起動しやすさ”、“止めやすさ”、“総合評価”の4項目として調査を行った。各項目について、それぞれ7段階での評価を実施した。表面筋電位の計測には、表面筋電位計測装置（COMETA System社製）とディスプレイ電極（日本光電社製）を使用し、計測部位については、拇指の屈曲に関わる短拇指屈筋（FPB）、手関節の掌屈に関わる尺側手根屈筋（FCU）、手関節の撓屈に関わる長橈側手根伸筋（ECR）、肘関節の屈曲に関わる上腕二頭筋（BB）の計4部位とした。そして、NIRS計測装置（日立メディコ製：ETG-7100）を用いて大脳皮質における酸素化ヘモグロビン濃度変化量（ $\Delta Oxy-Hb$ ）を計測した。

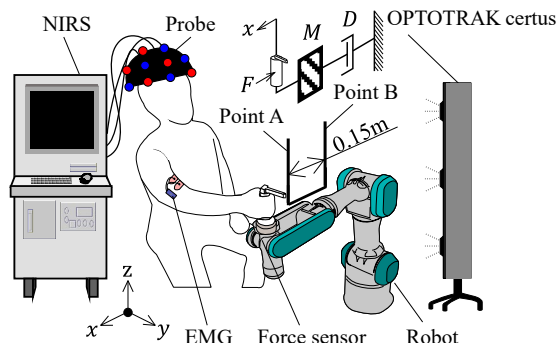


図1 実験風景

#### 4. 研究成果

##### (1) 上肢筋活動計測結果

表面筋電位については、Task Time 中におけるデータの最大値から 10 番目までの大きさのデータの平均値を 100 % として正規化を行い、%RMS 値として評価を行った。Tukey-HSD 法による条件間比較を行ったところ、ECR については M5 の条件下で D30 と D90 との間で有意差が認められ、FCU では M5 と M15 の条件下において D30 と D90 との間で有意差が確認できた (図 2)。粘性特性の違いが筋活動に影響を与える可能性は示唆されたものの、慣性特性の違いによる影響が確認できなかったことは興味深い。

##### (2) 大脳皮質活動計測結果

本研究では、認知機能に関わる前頭前野 (PFC)、随意運動の実行を行う補足運動野 (SMA)、運動の企画・選択を行う運動前野 (PMA)、運動指令の出力を行う一次運動野 (PMC)、体性感覚情報の処理を行う一次体性感覚野 (PSC) に焦点を当て、脳血流動態に関する解析を行った。まず、安静時と課題実行時の脳活動に対する有意差を検証するために CH ごとに Student の t 検定を行った。図 3 におけるカラーバーの下部に示した数値は、色の濃淡と対応した t 値であり、境界線上の値は棄却境界値を表す (有意水準 5 %)。結果より、すべての条件において前頭前野と一次運動野において有意な賦活が確認された。一次運動野については、活動肢の対側および同側において有意な賦活が認められた。また、Tukey-HSD 法による条件間比較を行った結果、Probe 4 の ch 13 においては、M5D30 の条件について、M5D60、M10D60、M10D90、M15D30、M15D60、M15D90 との間で有意差が認められた。

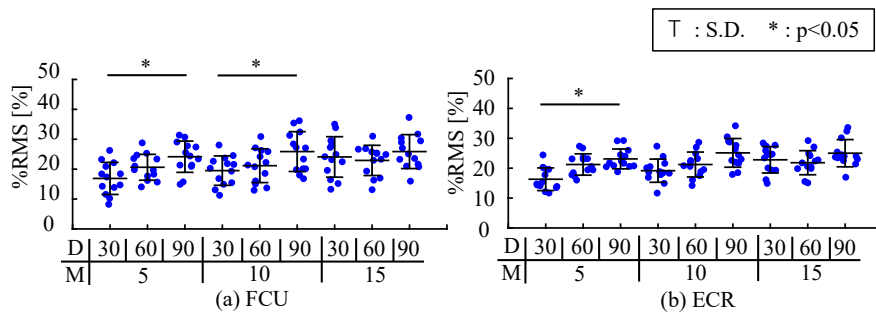


図 2 上肢筋活動を表す表面筋電位に関する解析結果

##### (3) 課題実施中における大脳皮質活動に関する考察

本実験では、全条件下で前頭前野と一次運動野において有意な賦活が確認され、一次運動野については、活動肢の対側および同側の双方において有意な賦活が認められた。前頭前野はワーキングメモリに関連する部位とされており [4] [5]、新規課題を実施する際に賦活するとの報告が行われている [6]。このことから、慣性・粘性特性の差異によって生じる動特性の違いを被験者が新たな課題として認識していた可能性があると考えられる。また、同一慣性条件間で比較した場合、低粘性条件に比べ高粘性条件において多くのチャンネルで脳賦活が確認できたことから、特に粘性特性の増大が脳賦活に影響を及ぼすと推察できる。今回の研究期間内においては、このような現象を説明できるメカニズムまでは明らかにできなかったものの、操作対象となるロボットの動特性を規定するインピーダンス特性の差異によって、高次的な脳機能を担う大脳皮質における脳血流動態が変化するとする知見を明らかにした成果は意義深いと考えられる。

##### (4) 作業特性評価に関する考察

次に、慣性・粘性特性の差異が作業特性に及ぼす影響を調査するために手先速度の時系列データを解析したところ、同一粘性条件間において被験者群によって手先速度がピークに達するまでの時間が異なることが分かった。そこで、手先速度のピークの発生が動作の前半で確認された被験者群を GroupA、後半に生じる被験者群を GroupB として解析を行った。ほとんどの試行において、ほぼ同様の傾向を示す時間プロファイルが得られたことから、手先位置と目標位置との差異の大きさを示す位置偏差に対して解析を行った。図 2(a)より、GroupA は横長の釣鐘型の形状を示し、GroupB よりも有意に位置偏差が小さいことが分かった ( $p < 0.001$ )。また、各 Group の位置偏差データのばらつきに対して Levene 検定を行ったところ、有意差が認められ、GroupA のばらつきの方が小さいことが確認できた ( $p < 0.001$ )。したがって、GroupA の被験者は目標位置との偏差が小さくなるような手腕動作を行うために、動作の前半において大きい速度を發揮し、ピークを早めに発現して、その後、位置調整を試みる運動を行っている可能性が示唆された。

##### (5) Group 間比較による大脳皮質・上肢筋活動に関する考察

上肢筋活動について、各 Group における計測筋の活性化パターンに関する調査を行うために試行時間中の筋賦活の時間プロファイルについて、相互相関解析による形状比較を実施した。結果として、各計測筋の相関係数の平均値が強い正の相関を示し ( $R > 0.9$ )、標準偏差も比較的小さいことが分かった ( $S.D. < 0.08$ )。これにより、すべての計測筋において時系列データに関わる時間のずれは小さく、活性化パターンの差異が各 Group における位置調整の違いに影響を及ぼしている可能性は低いことが分かった。

次に、大脳皮質活動に関する調査を行うために、Group間で血流動態 ( $\Delta\text{Oxy-Hb}$ ) に差異が生じているかについての解析を実施した。安静時と課題実行時の脳活動の差異に対して Student の t 検定を行った結果、GroupA はすべての条件において補足運動野 ( $t > 2.824$ )、対側の運動前野 ( $t > 2.969$ )、同側の一次運動野 ( $t > 2.979$ )、対側の一次体性感覚野 ( $t > 2.803$ ) で有意な活動が認められ、全体的に GroupA の方が活動的であることが確認できた。補足運動野は運動イメージとの関連や[8]、課題の複雑さや難易度の増加によって活動が活性化すると報告があることに加えて[9]、同側の一次運動野については、課題の難易度が高い場合に賦活することが明らかにされている[10]。本研究においても、補足運動野および同側の一次運動野における賦活の差異が確認されたことから、GroupA の被験者群は位置偏差を意識した手腕動作をより難易度の高い課題として捉えていた可能性があり、大脳皮質の血流動態に影響を及ぼしていたと推測できる。

最後に位置偏差と関連がある要因を調査するために、位置偏差を目的変数としたステップワイズ重回帰分析を Group ごとに行った。投入変数を、運動情報 (手先速度、手先加速度、1 往復当たりの操作力積分値、操作力ピーク値)、手先加速度の微分値より算出したスムーズネス指標、計 4 か所の部位における表面筋電位 (BB、ECR、FCU、FPB)、計 5 領域における平均  $\Delta\text{Oxy-Hb}$  (両側の前頭前野、補足運動野、両側の運動前野、両側の一次運動野、両側の一次体性感覚野) とした。補足運動野に関しては、両 Group で高い影響度を示したが (GroupA :  $p < 0.01$ , GroupB :  $p < 0.05$ )、GroupA では正の関連を示し、GroupB においては負の影響度を示した。これらの結果については、“GroupA の被験者は位置偏差を意識しながら手腕動作を行っており、位置偏差を小さくする手腕動作を難易度として知覚することで補足運動野が活性化した”との考察を支持する内容となっている。また、GroupA において ECR が正の影響度を示した ( $p < 0.001$ )。ここで、ECR は、手関節の剛性に寄与しており[11]、手関節における剛性の増大が位置決め精度の向上に関与することが報告されている[12]。ECR の活性と位置偏差の関連から GroupA の被験者は ECR を活性化させて手関節の剛性を増大させることによって、GroupB とは異なる手腕動作の制御戦略を実現していた可能性があると推測できる。それぞれの Group において大脳皮質活動と上肢筋活動の関係性が異なる上肢運動を行っていたことは非常に興味深い結果である。

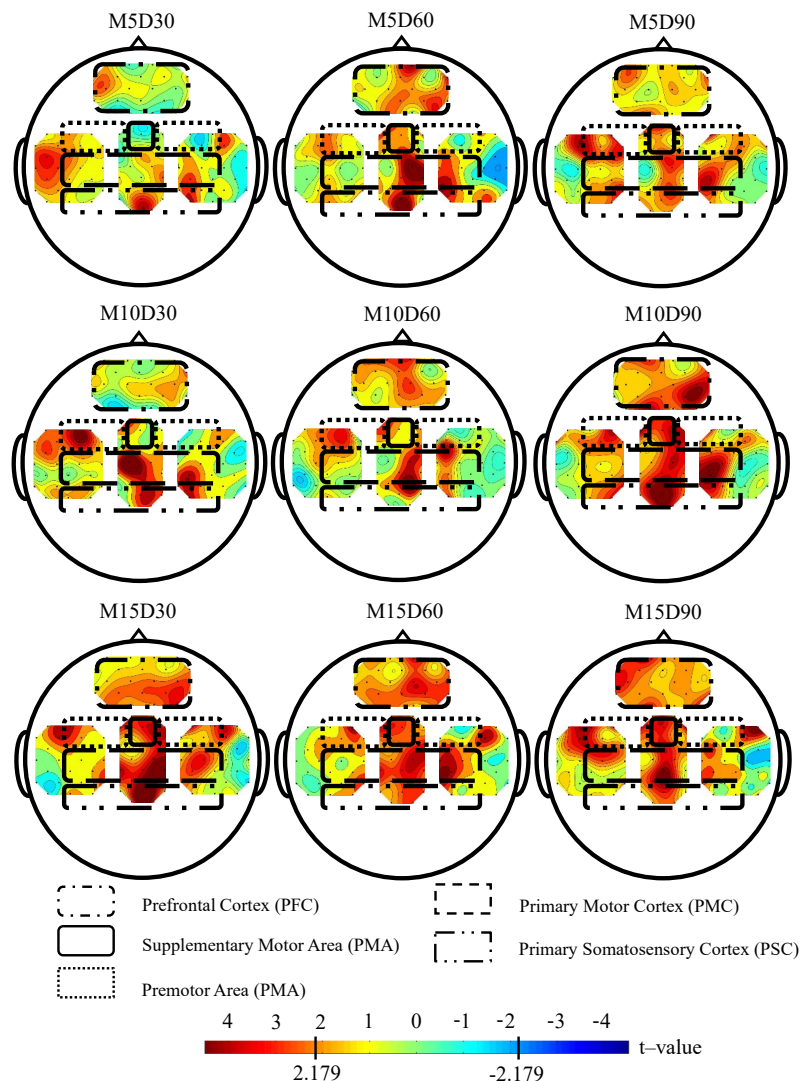


図3 脳血流動態に関する解析結果

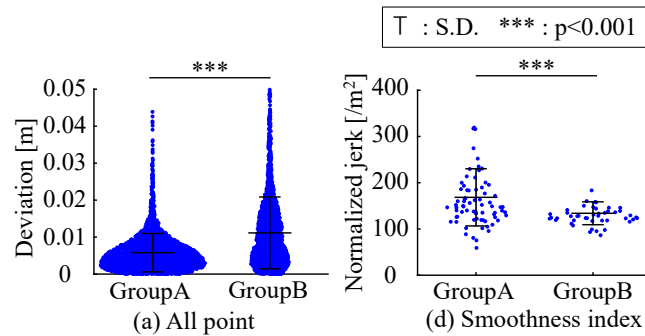


図4 目標位置との位置偏差に関する解析結果

(6) まとめ

本研究では、ロボット操作時における動特性として付与されるインピーダンス特性のうち、慣性・粘性特性が人間の生体生理・心理状態を表す筋・脳賦活状態、作業特性に与える影響について調査した。得られた実験結果に関する解析を行ったところ、インピーダンス特性の差異によって主観評価、位置偏差、大脳皮質活動、上肢筋活動に与える影響や関連性が確認され、作業対象が有する動特性の違いが人間の作業特性や上肢運動に関わる制御戦略に影響を与える可能性を示した。

<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 (2000), pp.285–291.
- [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 (1999), pp.1300–1306.
- [3] 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(2002), pp.180–186.
- [4] Curtis, C. E. and D’Esposito, M., Persistent activity in the prefrontal cortex during working memory, *Trend in Cognitive Sciences*, Vol.7, No.9 (2003), pp.415–423.
- [5] Li, S., Rosen, C. M., Chang, S., David, S. and Freedman, J. D., Alterations of neural activity in the prefrontal cortex associated with deficits in working memory performance, *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, Vol.17 (2023), DOI: 10.3389/fnbeh.2023.1213435.
- [6] Mugruza-Vassallo, A. C., Potter, D. D., Tsiora, S., Macfarlane, A. J. and Maxwell, A., Prior context influences motor brain areas in an auditory oddball task and prefrontal cortex multitasking modelling, *Brain Informatics* (2021), DOI: 10.1186/s40708-021-00124-6.
- [7] Valevicius, M. A., Boser, A. Q., Lavoie, B. E., Murgatroyd, G., Pilarski, P., Chapman, S. C., Vette, A. and Hebert, S. J., Characterization of normative hand movements during two functional upper limb tasks, *PLOS ONE* (2018), DOI: 10.1371/journal.pone.0199549.
- [8] Lotze, M., Montoya, P., Erb, M., Hülsmann, E., Flor, H., Klose, U., Birbaumer, N. and Grodd, W., Activation of cortical and cerebellar motor areas during executed and imagined hand movements: An fMRI study, *Journal of Cognitive Neuroscience*, Vol.11, No.5 (1999), pp.491–501.
- [9] Shibasaki, H., Sadato, N., Lyshkow, H., Yonekura, Y., Honda, M., Nagamine, T., Suwazono, S., Magata, Y., Ikeda, A., Miyazaki, M., Fukuyama, H., Asato, R. and Konishi, J., Both primary motor cortex and supplementary motor area play an important role in complex finger movement, *Brain*, No.116 (1993), pp.1387–1398.
- [10] Barany, A. D., Revill, P. K., Caliban, A., Vernon, I., Shukla, A., Sathian, K. and Bueteifisch, C., Primary motor cortical activity during unimanual movements with increasing demand on precision, *Journal of Neurophysiology*, Vol.124, No.3 (2020), pp.728–739.
- [11] Holmes, M. W., Tat, J. and Keir, P., Neuromechanical control of the forearm muscles during gripping with sudden flexion and extension wrist perturbations, *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, Vol.18, No.16 (2015), pp.1826–1834.
- [12] Milner, E. T., Contribution of geometry and joint stiffness to mechanical stability of the human arm, *Experimental Brain Research*, Vol.143 (2002), pp.515–519.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 神谷 紀慶, 積際 徹, 横川 隆一	4. 巻 88
2. 論文標題 アドミッタンス制御により駆動する歩行車の運動特性を考慮した起立 - 歩行動作解析	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 p.22-00075
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.22-00075	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Somei Kengo, Oshima Kentaro, Tsumugiwa Toru, Yokogawa Ryuichi, Narusue Mitsuhiro, Nishimura Hiroto, Takeda Yusaku, Hara Toshihiro	4. 巻 11
2. 論文標題 Effects of Display Response Latency on Brain Activity During Device Operation	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 34860 ~ 34869
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2023.3262658	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 槌野 太倫, 積際 徹, 横川 隆一	4. 巻 89
2. 論文標題 アドミッタンス制御により駆動する歩行車を用いた起立 - 歩行補助時における被補助者の起立動作解析	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 日本機械学会論文集	6. 最初と最後の頁 p.23-00060
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.23-00060	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計9件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 力学的協調作業を実現する協働ロボットの動特性が人間の脳・筋活動に与える影響
2. 発表標題 大石 夏輝, 積際 徹, 横川 隆一
3. 学会等名 第40回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 三好 輝, 高城 周作, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 梁支点反力調整理論を用いた両端固定梁型アドミッタンス可変機構の開発
3. 学会等名 第40回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 高城 周作, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 両端固定梁構造を用いた引張梁反力調整型アドミッタンス可変機構の開発
3. 学会等名 第40回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Kentaro Oshima, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa, Mitsuhiro Narusue, Hiroto Nishimura, Yusaku Takeda, Toshihiro Hara
2. 発表標題 Effect of Display Response Time on Brain Activity in Human-Machine Interface Commander Operation
3. 学会等名 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 植野 太倫, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 歩行車型歩行支援機の運動特性が被補助者の歩行動作に与える影響
3. 学会等名 第39回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 柴田 凌輝, 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制御入力調節機構の開発
3. 学会等名 第39回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 村上 将功, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 慣性・粘性特性を有する機器操作時における筋活動および脳活動解析
3. 学会等名 第39回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐竹 俊祐, 積際 徹, 横川 隆一
2. 発表標題 人と人の協調運搬作業におけるリーダ・フォロワ間に生じる情報の非対称性が脳活動に与える影響
3. 学会等名 第39回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 染井 健吾, 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 HMI コマンドを用いた入力操作時における画面表示応答遅延が脳活動に及ぼす影響
3. 学会等名 第39回 日本ロボット学会 学術講演会
4. 発表年 2021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
---------	---------