

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：34310

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05915

研究課題名(和文)人間とロボットの動特性干渉制御に基づくロボットの運動制御法の創成と高次脳機能評価

研究課題名(英文) Analysis of higher brain activation of human operator under robot motion control strategy based on dynamical interaction control between human operator and robot

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) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、人間とロボットが行う力学的な相互作用下での協調作業において、作業対象となる動特性や動作特性が人間の脳機能や筋肉の賦活状態に与える影響に関する評価を行った。対象とする動特性、動作特性として、(i)最も直感的と考えられる慣性、そして、(ii)日常生活から切り離すことのできない摩擦特性を設定し、協調作業における動特性や動作特性が人間の応答や生体情報に与える影響について調査する実験を行った。実験結果より、設定したパラメータ(慣性、摩擦力)によって人間の応答や生体情報に影響を及ぼすことを明らかにした。得られた研究成果については、国際会議での発表ならびに英語原著論文にて公開を行った。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this study is to investigate brain and muscle activation state during machine operation such as a human-robot cooperation task under the robot motion control strategy based on dynamical interaction control between the human operator and the robot. In this study, inertia and frictional force were set as the experimental conditions. The inertia and frictional force are parameters representing dynamic characteristics and motion characteristics during the human-robot cooperation task. The experimental results revealed significant differences in the brain and muscle activation. The results of this study were published in the internal/international conferences and international journals of the mechanical engineering and the robotics.

研究分野：ロボット工学

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

1. 研究開始当初の背景

人間とロボットの協調作業におけるロボットの運動制御法として、インピーダンス制御(アドミタンス制御)が広く用いられてきた[1-5]。しかし、ロボットの運動特性として規定されるインピーダンス特性やシステムの制御遅れなどが原因となり、高剛性環境との接触において制御システムが不安定になる問題を抱えていた。この問題を解決すべく、研究代表者はロボットの動特性(インピーダンス特性)と人間の作業動特性を分離・結合することで両者の動特性の干渉制御を実現する制御概念を考案し、この制御概念を具現化する“動特性調整器”の開発を行ってきた[6]。これらの研究において、従来のインピーダンス制御における不安定問題に関する解決手法を明らかにしたものの、動特性調整器の動作帯域が狭いことに加えて応答性が低かったことから、適用範囲が限定されていた。また、協調制御下における動特性の可変制御がもたらす本質的な効果や意味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、人間とロボットの力学的な相互作用下での協調作業において、人間-ロボット間の結合・分離状態(干渉状態)に基づいて生じる両者の動特性の干渉具合を可変制御する制御概念に基づく協調制御法の創成とその評価である。まず、本研究では、作業対象となる動特性や動作特性が人間の脳機能や筋肉の賦活状態に与える影響に関する計測実験から評価を行い、新たに創成する制御概念の効果に対する検証を行うことを目指す。

本研究では、対象とする動特性、動作特性として、人間にとって最も直感的と考えられる慣性、そして、日常生活から切り離すことのできない摩擦特性をパラメータとして検証実験を実施し、動特性の干渉制御が人間に与える影響を解明するための一端を見いだすこととする。

3. 研究の方法

3年の研究期間内に、下記項目に関わる研究を進め、協調作業において人間とロボットの動特性同士の干渉制御を両者間の摩擦特性によって実現する動特性調整器を用いて、動特性の干渉制御が人間に与える影響を解明する。

1. 動特性調整器の開発・改良(動作の広帯域化・ハードウェアの設計開発)
2. 動特性の干渉制御が人間に及ぼす影響の解明(脳血流変化量・筋電計測に基づく定量評価)

提案制御概念は、人間とロボットが有するそれぞれの動特性を動特性調整器によって結合状態(インピーダンス制御)から分離状態の間で可変させる特徴を有している。動特性調整器の制御具合によって、作業状況に適した動特性の干渉状態が提供できることから、(i) インピーダンス制御下における接触安定問題を解決し、(ii) 安定制御下で直感的な作業が実現できる[6-9]。しかし、従来研究における動特性調整器は動作帯域が狭く応答性が低かったため、人間に与える影響に対する本質的な解明には至っていなかった[6]。

そこで、本研究では、作業動特性の干渉状態を純粋な受動的機構のみによって実現し、能動的な制御等の遅れがない状況下で人間に対して提示し、その応答と生体情報を観測することでこれまで明らかにできなかった提案制御概念がもたらす影響の本質解明を目指した。

問題を単純化するため、実験パラメータについては、動特性としてインピーダンス特性の慣性(質量)、そして動作特性として摩擦力の2種に焦点を当て、それぞれ3段階ずつのパラメータ値を設定した。図1に示す動特性調整器を開発し、慣性、摩擦力を調整した状態で被験者が操作を行い、その応答と作業時の生体情報を計測する実験を行った。

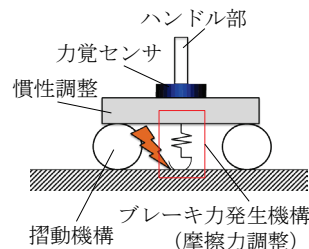


図1. 動特性調整器の概要(質量・摩擦力をパラメータとして調整)

対象とする動作(運動)は、被験者がハンドル部を握り、-0.05 mから+0.05 mまでの位置を往復する運動とした。なお、厳密な目標値設定は行わず、目標地点を越えた時点で往復するように指示を与えた。

動作中における被験者(計5名)の脳血流変化量(NIRSによる計測)、筋電(筋電アンブによる計測)、手先位置(三次元計測装置による計測)、手先力(力覚センサによる計測)を計測し、全9条件において1人の被験者につき2試行ずつ計18試行(9条件×2試行)の計測実験を行った(図2、表1参照)。

NIRSによる脳血流変化量の計測については、計測点を国際10-20法(international 10-20 system)を参考にして配置した。評価対象として、運動の統合を行う前頭前野(Prefrontal

cortex、PFC)、運動の構成を行う補足運動野 (Supplementary motor area、SMA)、運動前野 (Premotor area、PMA)、運動の出力を行う一次運動野 (Primary motor cortex、PMC)、感覚情報の処理を行う体性感覚野 (Primary somatosensory cortex、PSC) とした。

表 1. 実験条件 (慣性、摩擦力のパラメータ)

Task no.	Mass condition	Mass \pm S.D. [kg]	Friction condition	Frictional force \pm S.D. [N]
1	1	2.2 ± 0.1	1	3.3 ± 1.2
2			2	8.6 ± 2.7
3			3	11.5 ± 3.8
4	2	3.2 ± 0.2	1	3.3 ± 1.2
5			2	8.6 ± 2.7
6			3	11.5 ± 3.8
7	3	4.4 ± 0.2	1	3.3 ± 1.2
8			2	8.6 ± 2.7
9			3	11.5 ± 3.8

また、筋電アンプによる筋電計測については、対象とする運動に関わる主要筋を対象とし、短母指屈筋 (Flexor Pollicis Brevis、FPB)、橈側手根屈筋 (Flexor Carpi Radialis、FCR)、尺側手根伸筋 (Extensor Carpi Ulnaris、ECU)、上腕二頭筋 (Biceps Brachii、BB) の計 4 部位とした。

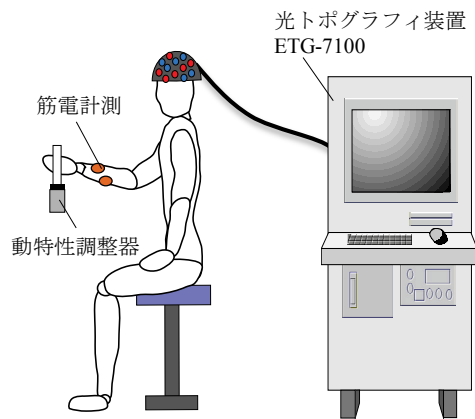


図 2. 実験風景 (光トポグラフィ装置による脳血流変化量計測、筋電計測、手先位置の運動計測)

4. 研究成果

まず、設定した動作 (運動) の妥当性を検証するため、往復運動の操作力および手先位置の軌跡 (手先軌跡) における平均値および標準偏差、95%信頼区間に関する検討を実施した。図 3 から図 6 に操作力と手先軌跡をパラメータごとにまとめた実験結果を示す。実験パラメータとして設定した、慣性や摩擦力の大きさに応じて操作力が大きくなることが明らかとなったが、手先軌跡の 95%信頼区間は目標位置に対して $+0.023$ m から -0.011 m

の間に収まっており、全実験条件においてほぼ同様の手先軌跡を実現できたことが判明した。

以上の結果から、計測実験における人間の運動 (手先軌跡、操作力) の妥当性を示すことができたため、次に脳活動・筋活動に関する解析を行った。NIRS による脳血流変化量に関する代表的な結果を図 7 に示す。

全実験条件に関する解析の結果、領域毎に賦活が観測された箇所には差異があるものの、各実験条件 (各 Task. no) において共通して脳活動の賦活が認められた領域は PMC および PSC であることが分かった。

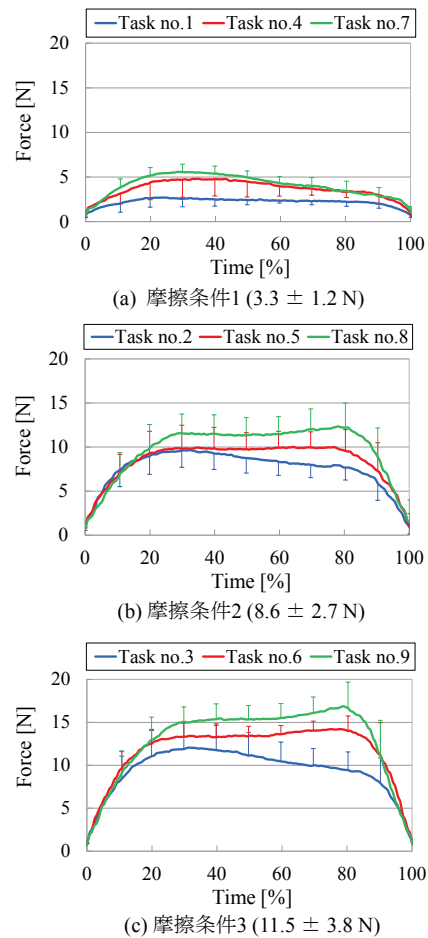


図 3. 摩擦条件調節時の手先力に関する結果 (エラーバーは標準偏差を示す)

動作特性となる摩擦力への応答に関しては、摩擦条件間での PMC、PSC における Oxy-Hb 濃度変化量に有意な差は認められなかった。つまり、摩擦力を付加した条件 (Friction 1 および 2) でも、脳活動には変化が認められないことが分かった。しかし、筋活動についての解析結果では、摩擦条件 1 (Friction 1) の場合に摩擦条件 3 (Friction 3) と比較して FPB、FCR が有意に賦活していた。これらの結果から、摩擦力の変化は脳活動には影響を与えないが、筋活動には影響することが分かった。

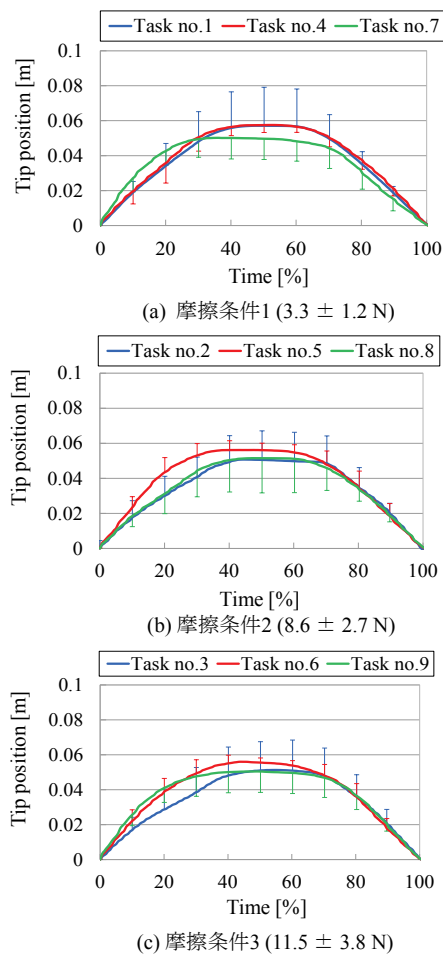


図 4. 摩擦条件調節時の手先位置に関する結果 (エラーバーは標準偏差を示す)

慣性条件に関する結果については、左側 PMC において、慣性条件 2 の場合に慣性条件 1 および 3 と比較して有意に賦活した。右側 PSC においては、慣性条件 2 の場合が慣性条件 3 と比較して有意に賦活した。つまり、左側 PMC および右側 PSC において、慣性の違いによって脳活動が賦活する可能性が示唆された。また、左側 PMC、右側 PSC の対象筋である FPB、ECU、BB において、慣性条件 2 の実験結果に着目すると、FPB、ECU、BB は慣性条件 1 と比較して賦活しておらず、FCR は慣性条件 3 と比較して賦活状態にあることが分かった。

以上の結果から、各条件間で脳活動および筋活動に有意な差異が認められることが判明し、それぞれ異なる傾向を示すことが分かった。しかし、各条件間における脳活動および筋活動の賦活状態に違いが認められた要因については、明確には説明できなかった。本研究では被験者が 5 名であり、試行的な計測実験に止まったことが原因と考えられ、この点については本研究の限界であった。しかし、動特性 (慣性) と動作特性 (摩擦力) が

人間の応答や生体情報に影響を与えることを明らかにでき、有用な知見を示すことができた。

本研究では、NIRS 計測装置、筋電位計測装置、力覚センサ、3 次元位置計測装置を用いて、作業対象となる動特性や動作特性が人間の高次脳機能や筋肉の賦活状態に与える影響に関する計測実験を行い、その評価を行った。具体的には、動特性や動作特性となる慣性と摩擦力が、上肢の運動特性や脳活動、筋活動へ及ぼす影響を調査した。得られた実験結果より、摩擦力の大きさに応じて操作力が有意に大きくなり、摩擦条件間で筋活動には有意な変化が認められたが、脳活動には有意な変化が認められなかった。慣性条件に関しては、操作力、筋活動、脳活動に有意な違いが認められることが明らかとなった。ただし、本研究には被験者数に関する限界が存在すること、そして、慣性条件と摩擦条件を明確に切り分けた解析が実施されていない限界が存在するため、さらなる解析が必要である。

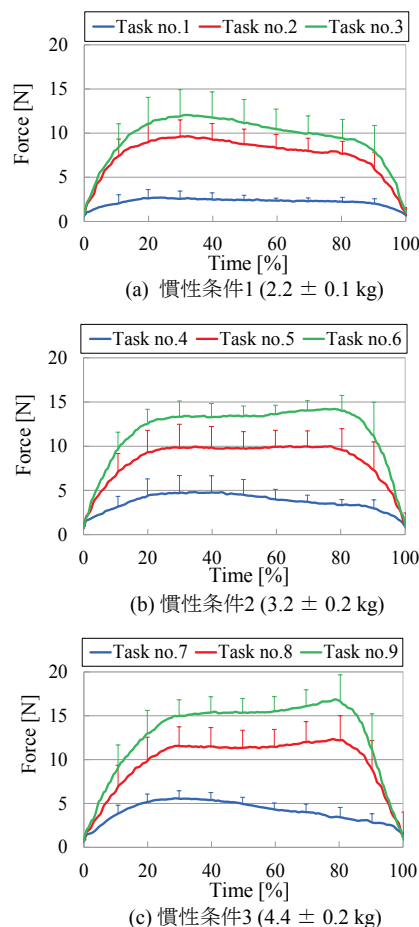
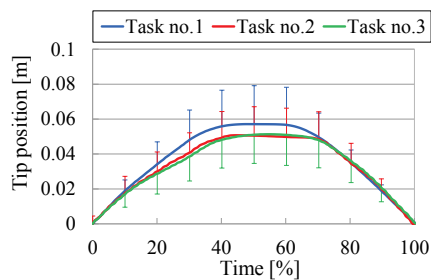
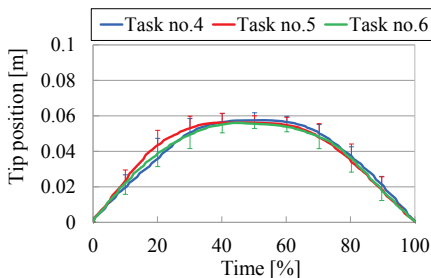


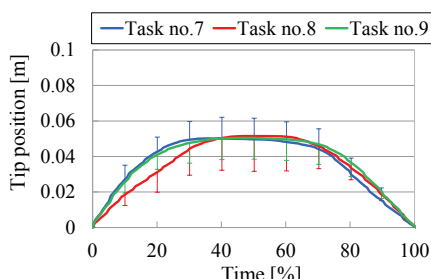
図 5. 慣性条件調節時の手先力に関する結果 (エラーバーは標準偏差を示す)



(a) 慣性条件1 (2.2 ± 0.1 kg)



(b) 慣性条件2 (3.2 ± 0.2 kg)



(c) 慣性条件3 (4.4 ± 0.2 kg)

図 6. 慣性条件調節時の手先位置に関する結果 (エラーバーは標準偏差を示す)

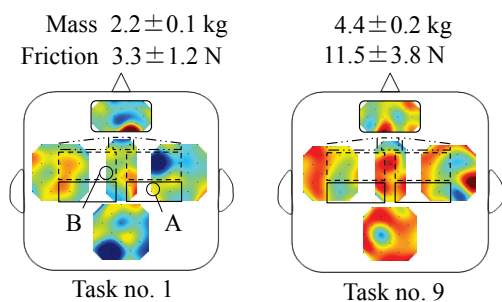


図 7. 慣性・摩擦条件調節時の脳血流変化量を示すトポグラフィ図 (実験条件 1 [慣性 2.2kg、摩擦力 3.3 N]、実験条件 9 [慣性 4.4kg、摩擦力 11.5 N])

<引用文献>

[1] R. Ikeura, H. Inooka, Variable impedance control of a robot for cooperation with a human, *IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation*, pp. 3097-3102, 1995.
 [2] Y. Yamada, H. Konosu, T. Morizono, Y. Umetani, Proposal of Skill-Assist: a system of assisting human workers by reflecting their skills in positioning tasks, *IEEE Int.*

Conf. on Systems, Man and Cybernetics, pp. (IV)11-16, 1999.

[3] R. Kikuuwe, S. Yasukouchi, H. Fujimoto, M. Yamamoto, Proxy-based sliding mode control: A safer extension of PID position control, *IEEE Trans. on Robotics*, 26-4, pp. 670-683, 2010.
 [4] Y. Hirata, Y. Matsuda, K. Kosuge, Handling of an object in 3-D space by multiple mobile manipulators based on intentional force/moment applied by human, *IEEE/ASME Int. Conf. on Advanced Intelligent Mechatronics*, paper no. 219, 2007.
 [5] R. Kikuuwe, N. Takesue, A. Sano, H. Mochiyama, H. Fujimoto, Admittance and impedance representations of friction based on implicit Euler integration, *IEEE Trans. on Robotics*, 22-6, pp. 1176-1188, 2006.
 [6] 木下敦之, 積際徹, 横川隆一, 人間とロボットの協調作業系における作業動特性の干渉制御を実現する動特性調節器の開発および評価, *日本機械学会論文集 C 編*, pp. 4705-4720, 2013.
 [7] 永田求, 神吉厚之, 積際徹, 横川隆一, 両もち梁理論を用いたロボット装着型機械インピーダンス可変機構の開発・評価, page no. RSJ2017AC3G1-03, 2017.
 [8] 由良美帆, 神吉厚之, 積際徹, 横川隆一, 両もち梁理論を用いた機械インピーダンス可変機構による人間とロボットの協調作業, 第 35 回 日本ロボット学会 学術講演会, page no. RSJ2017AC3G1-02, 2017.
 [9] 内田智之, 神吉厚之, 積際徹, 横川隆一, インピーダンス可変機構を用いた人間とロボットの協調作業システムにおける安定解析, 第 35 回 日本ロボット学会 学術講演会, page no. RSJ2017AC3G2-02, 2017.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 3 件)

1. Toru Tsumugiwa, Atsushi Shibata, and Ryuichi Yokogawa, Analysis of upper-extremity motion and muscle and brain activation during machine operation in consideration of mass and friction, *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, 査読有, DOI: 10.1109/THMS.2018.2789682, Vol. 48, Issue 2, 2018.
 2. Kazue Sugiura, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa, Changes in brain activation associated with backlash magnitude: a step toward quantitative evaluation of maneuverability, *Artificial Life and Robotics*, 査読有, DOI: 10.1007/s10015-017-0406-x, 2017.
 3. Toru Tsumugiwa, Yoshiki Takeuchi, and Ryuichi Yokogawa, Maneuverability of Impedance-Controlled Motion in a Human-Robot Cooperative Task System, *Journal of Robotics and Mechatronics*, 査

[学会発表] (計 16 件)

1. 田中懐, 積際徹, 横川隆一, 手腕運動時の脳賦活・筋賦活に基づく操作性評価, 日本機械学会 第 30 回バイオエンジニアリング講演会, p.288, 2017/12/15, 京都大学 百周年時計台記念館 (京都市).
2. 山本洋介, 積際徹, 横川隆一, 脳・筋賦活解析に基づく操作機器使用時の操作性評価, 日本機械学会 第 30 回バイオエンジニアリング講演会, p.287, 2017/12/15, 京都大学 百周年時計台記念館 (京都市).
3. 内田智之, 神吉厚之, 積際徹, 横川隆一, インピーダンス可変機構を用いた人間とロボットの協調作業システムにおける安定解析, 第 35 回 日本ロボット学会 学術講演会, page no. RSJ2017AC3G2-02, 2017/9/14, 東洋大学 川越キャンパス (川越市).
4. 由良美帆, 神吉厚之, 積際徹, 横川隆一, 両もち梁理論を用いた機械インピーダンス可変機構による人間とロボットの協調作業, 第 35 回 日本ロボット学会 学術講演会, page no. RSJ2017AC3G1-02, 2017/9/14, 東洋大学 川越キャンパス (川越市).
5. 永田求, 神吉厚之, 積際徹, 横川隆一, 両もち梁理論を用いたロボット装着型機械インピーダンス可変機構の開発・評価, 第 35 回 日本ロボット学会 学術講演会, page no. RSJ2017AC3G1-03, 2017/9/14, 東洋大学 川越キャンパス (川越市).
6. 杉浦和恵, 積際徹, 横川隆一, 操作機器が有するバックラッシュが人間の生体情報に与える影響, 第 35 回 日本ロボット学会 学術講演会, page no. RSJ2017AC1G2-05, 2017/9/12, 東洋大学 川越キャンパス (川越市).
7. Miho Yura, Atsushi Kamiyoshi, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa, Evaluation of mechanical impedance regulator mechanism in human-robot cooperative task system, *AROB 22nd 2017*, pp. 319-322, 2017/1/20, B-Con PLAZA, Beppu (JAPAN).
8. Tomoyuki Uchida, Atsushi Kamiyoshi, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa, Stability analysis for human-robot cooperative task system with the variable impedance mechanism, *AROB 22nd 2017*, pp. 314-318, 2017/1/20, B-Con PLAZA, Beppu (JAPAN).
9. Kazue Sugiura, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa, Effect of mechanical backlash on higher brain functions and surface potential signals, *AROB 22nd 2017*, pp. 130-134, 2017/1/19, B-Con PLAZA, Beppu (JAPAN).
10. Masaki Ohata, Toru Tsumugiwa, Ryuichi Yokogawa, Effect of mechanical interaction between leader and follower on brain

activations during human-human cooperative transportation task, *AROB 22nd 2017*, pp. 125-129, 2017/1/19, B-Con PLAZA, Beppu (JAPAN).

11. 眞鍋奈津季, 積際徹, 横川隆一, 摩擦特性を付与した運動が筋賦活および運動野・体性感覚野に及ぼす影響, 日本機械学会 第 29 回バイオエンジニアリング講演会, page no. 1G24, 2017/1/19, ウィンクあいち (名古屋市).
12. 杉浦和恵, 積際徹, 横川隆一, 機械的バックラッシュが高次脳機能および筋賦活状態に及ぼす影響, 第 34 回 日本ロボット学会 学術講演会, page no. RSJ2016AC3W3-05, 2016/9/9, 山形大学 小白川キャンパス (山形市).
13. 由良美帆, 積際徹, 横川隆一, 機械インピーダンス可変機構の開発・評価, 第 34 回 日本ロボット学会 学術講演会, page no. RSJ2016AC2B2-02, 2016/9/8, 山形大学 小白川キャンパス (山形市).
14. 永田求, 積際徹, 横川隆一, 人間とロボットの協調作業における機械インピーダンス可変機構の開発, 第 34 回 日本ロボット学会 学術講演会, page no. RSJ2016AC2B2-01, 2016/9/8, 山形大学 小白川キャンパス (山形市).
15. 柴田篤志, 積際徹, 横川隆一, 人間-ロボット協調作業系において摩擦特性を付加した位置決め作業に関する高次脳機能評価, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, page no. 2P1-L07(1)-(3), 2015/5/19, みやこめっせ (京都市).
16. 小野一樹, 積際徹, 横川隆一, 人間とロボットの協調作業における動特性の可変制御機構の開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会 2015, page no. 2P1-M09(1)-(4), 2015/5/19, みやこめっせ (京都市).

[図書] (計 1 件)

1. 積際徹 他, 近代科学社, ロボット制御学ハンドブック, 2017, pp. 752-754.

6. 研究組織

(1) 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