

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：53301

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2018～2021

課題番号：18K04220

研究課題名（和文）筋肉疲労に対して安全な電気刺激による遠隔リハビリテーションシステムの開発

研究課題名（英文）Development of Safe Tele-Rehabilitation System using Electrical Stimulation for Muscle Fatigue

研究代表者

河合 康典（Kawai, Yasunori）

石川工業高等専門学校・電気工学科・准教授

研究者番号：90413765

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）：本研究は、筋肉疲労に対して安全な電気刺激による遠隔リハビリテーションシステムの開発を考える。

はじめに、「筋肉疲労の推定と安全機構の開発」については、筋電位、外乱オブザーバ、ガウス過程回帰の3つの手法について提案する。次に、「筋肉疲労に対する安定化機構の開発」については、改良型スキャタリング変換、Time Domain Passivity Controlを提案する。次に、「高速化と耐故障性を備えたクラウドシステムの開発」については、Webサーバーを用いてHTTP通信による遠隔リハビリテーションを提案する。最後に、「実験による検証」については、石川高専内と商用サーバを接続して実験を行う。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、電気刺激によるバイラテラルの遠隔リハビリテーションシステムの制御を行っている。しかし、人体はモータで動くロボットとは異なり「疲労」による制御性能の劣化が大きな問題である。このとき、通信時間遅れによる理学療法士の判断遅れや遠隔制御の閉ループの不安定化により患者が怪我をする可能性がある。そこで本研究の手法を用いることで、患者の筋肉疲労を推定することができ、筋肉疲労が入っても不安定化を防ぐことができる。また、Webサーバーを用いた通信により通信の高速化と耐故障性を向上させることができる。

研究成果の概要（英文）：This research considers the development of a safe tele-rehabilitation system using electrical stimulation for muscle fatigue.

First, we propose the electromyography, disturbance observer, and Gaussian process regression for the estimation of muscle fatigue and safety mechanisms. Next, an improved scattering transform and time domain passivity control are proposed for the stabilization mechanism against muscle fatigue. Next, the tele-rehabilitation through HTTP communication using a Web server is constructed for the development of a cloud system with high speed and fault tolerance. Finally, we implement the experiment between National Institute of Technology, Ishikawa College and the commercial server.

研究分野：制御工学

キーワード：遠隔制御 電気刺激 筋肉疲労

1. 研究開始当初の背景

本研究で考える電気刺激は、外部から電極パッドを用いて電気により筋肉を収縮させて手足を動かす方法である。我々の従来研究では、図1に示す電気刺激によるバイラテラルの遠隔リハビリテーションシステムの制御を行っている。図1において、理学療法士が操作パドルに加える力は、力センサで測定されて通信ネットワークを経てフィードフォワード制御で患者の筋肉に電気刺激として伝えられる。同時に、エンコーダで測定された患者の膝関節角度は理学療法士側に伝えられ、操作パドルの角度は、エンコーダとモータを用いて膝関節角度と一致するようにフィードバック制御される。このように、理学療法士側と患者側が同時に制御されるために、閉ループシステムとなっている。しかし、人体はモータで動くロボットとは異なり「疲労」による制御性能の劣化が大きな問題である。このとき、通信時間遅れによる理学療法士の判断遅れや遠隔制御の閉ループの不安定化により患者が怪我をする可能性がある。そこで本研究では、遠隔リハビリテーションシステムの筋肉疲労に対する安全性の向上を課題として考える。

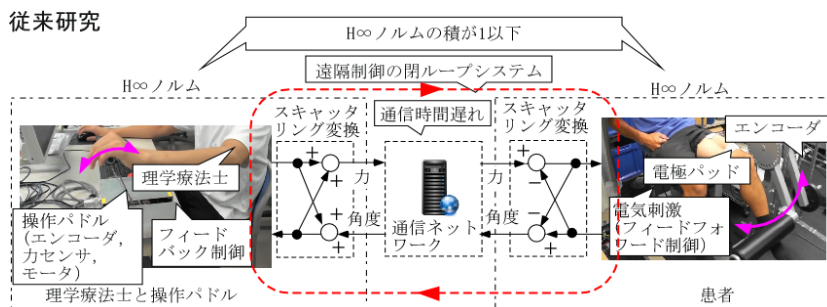


図1: 従来のバイラテラルの遠隔リハビリテーションシステム

2. 研究の目的

本研究の目的は、筋肉疲労に対して安全な遠隔リハビリテーションシステムを提案するために、以下の4つの課題を解決することである。

- (1) 筋肉疲労の推定機構の開発。
- (2) 筋肉疲労に対するバイラテラル遠隔制御システムの安定化機構の開発。
- (3) 高速化と耐故障性を備えたクラウドシステムの開発。
- (4) 遠隔地での実験による検証。

3. 研究の方法

(1) 筋肉疲労の推定機構の開発

疲労を推定するために、バイラテラルの遠隔リハビリテーションシステムを用いて膝関節の屈伸運動を行い、筋電位、外乱オブザーバ、ガウス過程回帰の3つの手法で疲労推定を考える。

筋電位については、表面筋電位(EMG)を用いて疲労を推定する[1]。筋線維には周波数帯域があり、遅筋線維は20~45 [Hz]で高い持久力を得る代わりに出力そのものは低く、速筋線維は80~350 [Hz]で高い出力を得る代わりに持久力は低いという特徴がある。この特徴を用いて、電気刺激を与えた場合に、自発運動同様、疲労時にEMGの周波数解析結果が低周波帯域にシフトしていることを確認することで疲労を推定する。

外乱オブザーバは、疲労を入力外乱と捉えて外乱を推定することで筋肉疲労を推定する[2]。同じ大きさの電気刺激を与えたときに筋肉疲労が発生すると、患者の膝関節の動作範囲は小さくなる。よって、筋肉疲労はマイナスの入力外乱が発生したことに等しいと考えることができる。マイナスの入力トルクを推定するために、図2に示すように、図1の患者側とスキュッタリング変換の間に膝関節の運動モデルを用いた非線形の外乱オブザーバを用いる。

ガウス過程回帰は、外乱オブザーバと同様に疲労を入力外乱と捉えて外乱を推定することで筋肉疲労を推定する[3]。マイナスの入力トルクを推定するために、膝関節の数式モデルを用いて、観測値と数式モデルによる偏差からガウス過程回帰により平均と分散を求める。図3に示すように、図2と同様に膝関節への入出力信号と運動モデルを用いて、ガウス過程回帰により疲労

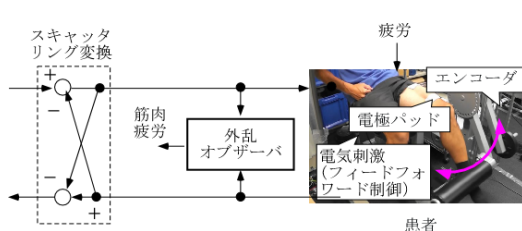


図2: 外乱オブザーバ

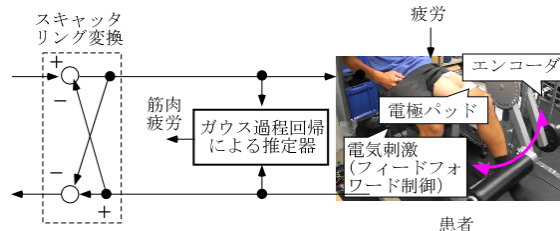


図3: ガウス過程回帰

を推定する。

(2) 筋肉疲労に対するバイラテラル遠隔制御システムの安定化機構の開発

安定化機構として、改良型スキュタリング変換と Time-Domain Passivity Control を考える。

改良型スキュタリング変換は、図 4 に示すように従来のスキュタリング変換において、設計パラメータの自由度を増やす構造にすることで制御系設計を行いやすくする[4]。次に、Time-Domain Passivity Control は、疲労による外乱が生じた場合、図 5 に示すように患者側の受動性を満たすように新たな制御入力を加えることで安定性を保証する[5]。

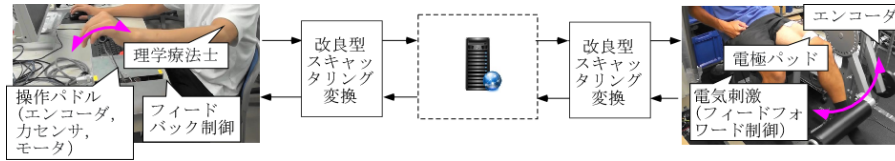


図 4: 改良型スキュタリング変換

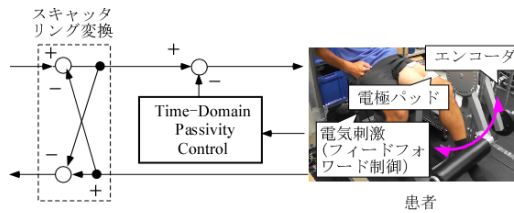


図 5: Time-Domain Passivity Control

(3) 高速化と耐故障性を備えたクラウドシステムの開発

Web サーバを用いて HTTP 通信による遠隔リハビリテーションを考える[6][7]。

図 1 に示す我々のバイラテラルの遠隔リハビリテーションシステムにおいて、図 6 に示すように通信ネットワークの箇所について、Web サーバに Node.js を用いて送受信することで、様々な端末から通信可能なシステムを構築する。

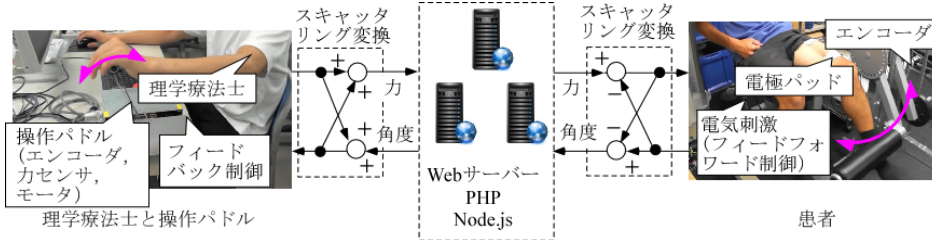


図 6: クラウドシステム

(4) 遠隔地での実験による検証

当初の長岡技術科学大学、フロリダ大学との実験が困難になったため、石川高専（石川工業高等専門学校）内に理学療法士用の操作パドルと患者用の電気刺激装置を配置して、石川高専から商用サーバを介した実験を行うことで、通信速度と性能を検証する。

4. 研究成果

(1) 筋肉疲労の推定機構の開発

筋電位、外乱オブザーバ、ガウス過程回帰による疲労推定が下記のように得られる。

筋電位について、電気刺激を与えた場合の最初 0.5 秒間の EMG の周波数解析結果は、図 7 に示すように MDF = 80.6888 [Hz], MNF = 155.5399 [Hz] である[1]。また、電気刺激を与えた場合の最後 0.5 秒間であり、疲労後の EMG の周波数解析結果は図 8 に示すように MDF = 46.4730 [Hz], MNF = 121.9536 [Hz] である。このことから、疲労時に筋電位の周波数解析結果が低周波帯域にシフトしていることが確認できる。しかし、これらの結果は電気刺激装置の影響を排除できていないため、さらなる検証が必要である。

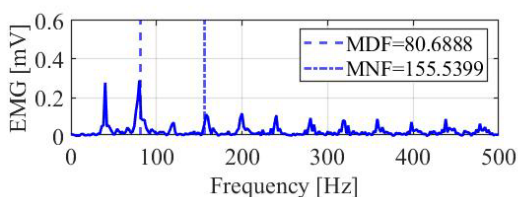


図 7: 疲労前の周波数特性

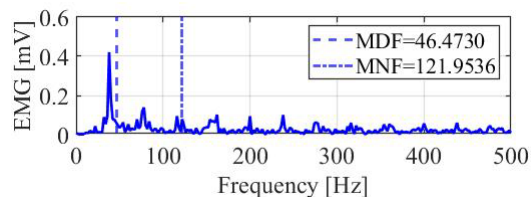


図 8: 疲労後の周波数特性

次に、外乱オブザーバによる疲労推定結果を図 9 に示す[2]。時間の経過とともに、推定された入力外乱 (疲労) $\hat{\tau}_d(t)$ が負の方向へ推移していることから、疲労が増えていると推定できる。次に、ガウス過程回帰による疲労推定結果を図 10 に示す[3]。実線は入力外乱 (疲労) の平均の中央値 $\hat{\tau}_d(t)$ を示す。また、学習データが存在する区間における分散で一番大きい値を用いて、 $\hat{\tau}_d(t)$ から上下にずらした値を上限値と下限値としている。リハビリテーションを続けると $\hat{\tau}_d(t)$ が下がっていくため、疲労が増加していると判断できる。そして、第 7 回の疲労推定後、休憩を取った後に $\hat{\tau}_d(t)$ は回復しているが、再びすぐに下がったため、再度、休憩を取った。休憩から再開後、再び $\hat{\tau}_d(t)$ は回復しているが再び下がる。以上より、疲労を推定できていると判断できる。

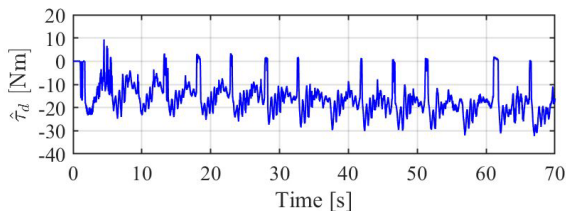


図 9: 疲労の推定値

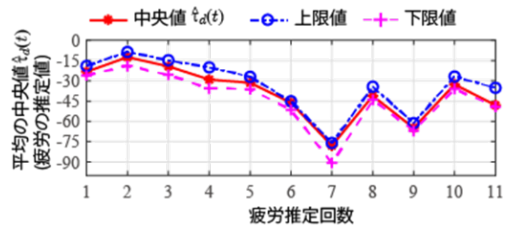


図 10: 疲労の推定値

(2) 筋肉疲労に対するバイラテラル遠隔制御システムの安定化機構の開発

Time-Domain Passivity Control を用いた結果を図 11 に示す[5]。ここで、実線は患者の膝関節角度 $q_s(t)$ 、破線は操作パドルの角度 $q_m(t)$ を示す。理学療法士の操作パドルの動きに対して、膝関節角度が同じ動きをしていることが分かる。

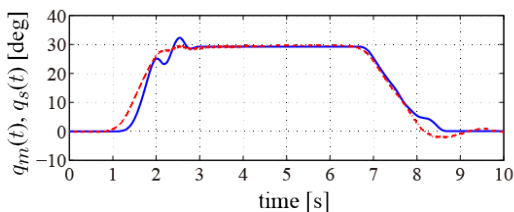


図 11: 膝関節角度とパドル角度

(3) 高速化と耐故障性を備えたクラウドシステムの開発と(4) 遠隔地での実験による検証

図 12 に示すように、Node.js を用いた Web サーバと理学療法士側と患者側の装置を接続するために、C アプリケーションと Python アプリケーションを用いる。Python アプリケーションと Web サーバは HTTP 通信、Python アプリケーションと理学療法士側と患者側の装置は UDP 通信を用いる。理学療法士が力 $f_h(t)$ を与えて膝関節を動かした結果を図 13, 14 に示す[7]。図 13 は膝関節角度とパドル角度、図 14 に理学療法士側から患者側への片道の通信時間遅れを示し、平均値が 0.18 [s] である。往復では通信時間遅れの平均値は 0.36 [s] であるが、安定して制御できていることが分かる。

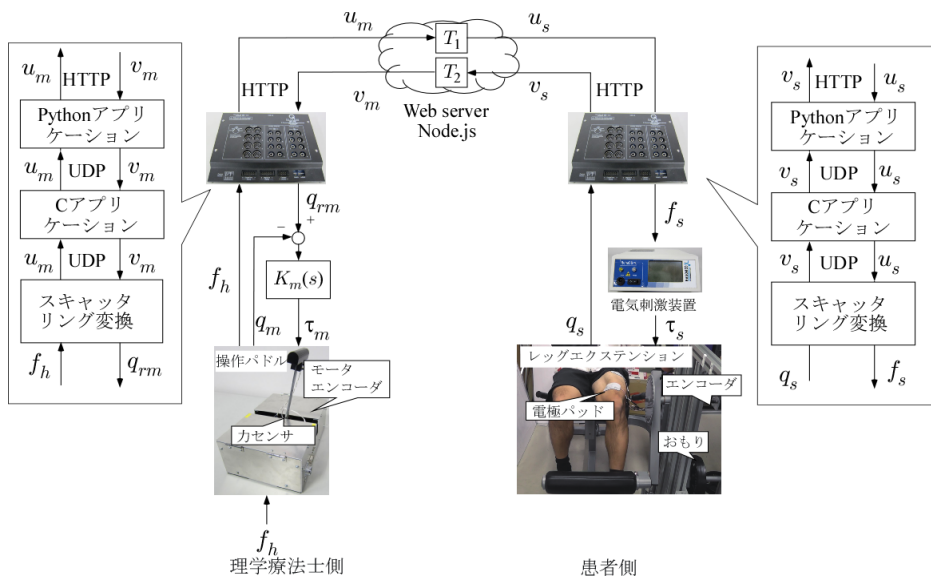


図 12: クラウドシステムを用いたバイラテラルの遠隔リハビリテーションシステム

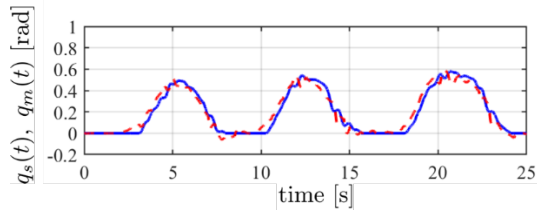


図 13:膝関節角度とバドゥル角度

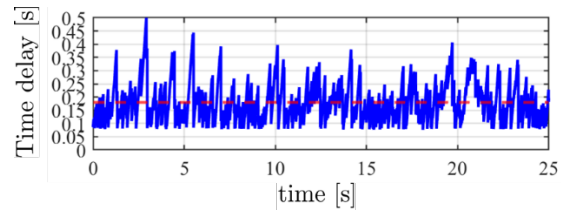


図 14:片道の通信時間遅れ

【参考文献】

- [1] 中出遼彦, 河合康典, “電気刺激による下肢の制御における筋電計を用いた疲労の評価,”第 41 回バイオメカニズム学術講演会予稿集, pp. 1B5-3, 2020.
- [2] Y. Kawai, F. Sugimoto, K. Fujie, H. Kawai, and T. Miyoshi, “Fatigue Estimation using Nonlinear Disturbance Observer for Tele-Rehabilitation System with Electrical Stimulation,” Proc. 2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), pp. 1-2, 2021.
- [3] 河合康典, 藤江謙伸, 河合宏之, “電気刺激を用いたバイラテラル遠隔リハビリテーションのガウス過程回帰による疲労推定,” 第 9 回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム, pp. 3B2-2, 2022.
- [4] Y. Kawai, K. Honda, H. Kawai, and T. Miyoshi, “Bilateral Tele-Rehabilitation System for Human Lower Limb based on Scattering Matrix with New Gains,” Proc. of the SICE Annual Conference 2018, pp. 1604-1607, 2018.
- [5] Y. Kawai, K. Shibano, H. Kawai, T. Miyoshi, and M. Fujita, “Bilateral Tele-Rehabilitation System using Electrical Stimulation applying Modulated Time-Domain Passivity Control,” IFAC PapersOnLine (8th IFAC Symposium on Mechatronic Systems MECHATRONICS 2019), Vol. 52, No. 15, pp. 79-84, 2019.
- [6] Y. Kawai, K. Honda, and M. Koshino, “Bilateral Tele-Rehabilitation System with Electrical Stimulation through Cloud Server,” Proc. 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), pp. 1-2, 2019.
- [7] Y. Kawai, “Bilateral Tele-Rehabilitation System with Electrical Stimulation using Web Server,” Proc. 2022 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW), 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計15件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 8件）

1. 発表者名 河合康典, 藤江謙伸, 河合宏之
2. 発表標題 電気刺激を用いたバイラテラル遠隔リハビリテーションのガウス過程回帰による疲労推定
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Yasunori Kawai, Futoshi Sugimoto, Kenshin Fujie, Hiroyuki Kawai, and Takanori Miyoshi
2. 発表標題 Fatigue Estimation using Nonlinear Disturbance Observer for Tele-Rehabilitation System with Electrical Stimulation
3. 学会等名 2021 IEEE International Conference on Consumer Electronics-Taiwan (ICCE-TW) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yasunori Kawai, Hiroyuki Kawai, and Takanori Miyoshi,
2. 発表標題 Bilateral Tele-Rehabilitation Control System Using Electrical Stimulation for Therapist and Patient
3. 学会等名 3rd IFAC Conference on Cyber-Physical & Human-Systems(CPHS2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 中出遼彦, 河合康典
2. 発表標題 電気刺激による下肢の制御における筋電計を用いた疲労の評価
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 Yasunori Kawai, Koshiro Shibano, Hiroyuki Kawai, Takanori Miyoshi, and Masayuki Fujita
2. 発表標題 Bilateral Tele-Rehabilitation System using Electrical Stimulation applying Modulated Time-Domain Passivity Control
3. 学会等名 8th IFAC Symposium on Mechatronic Systems MECHATRONICS 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasunori Kawai, Taiga Takagi, and Takanori Miyoshi
2. 発表標題 Written Communication System Based on Multilateral Teleoperation Using Time-Domain Passivity Control
3. 学会等名 2019 2nd International Conference on Communication Engineering and Technology (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasunori Kawai, Kenya Honda, and Makoto Koshino
2. 発表標題 Bilateral Tele-Rehabilitation System with Electrical Stimulation through Cloud Server
3. 学会等名 2019 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Taiwan (ICCE-TW) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Yasunori Kawai, Koudai Houga, Hiroyuki Kawai, and Takanori Miyoshi
2. 発表標題 Bilateral Tele-Rehabilitation System with Electrical Stimulation by Using Cloud Service
3. 学会等名 2020 the 10th International Workshop on Computer Science and Engineering (WCSE 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 保賀航大, 河合康典
2. 発表標題 電気刺激によるバイラテラル遠隔リハビリテーションシステムの高速度化
3. 学会等名 2019 年度電気情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 中出遼彦, 河合康典
2. 発表標題 電気刺激を用いたリハビリテーションの疲労度の推定
3. 学会等名 2019 年度電気情報関係学会北陸支部連合大会 講演論文集
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宮田湧気, 河合康典
2. 発表標題 入力飽和を考慮した電気刺激による遠隔リハビリテーションの実験による検証
3. 学会等名 令和元年度学生による研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Yasunori Kawai, Kenya Honda, Hiroyuki Kawai, and Takanori Miyoshi
2. 発表標題 Bilateral Tele-Rehabilitation System for Human Lower Limb based on Scattering Matrix with New Gains
3. 学会等名 SICE Annual Conference 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yasunori Kawai, Yukimi Miyamoto, and Hiroyuki Kawai
2. 発表標題 RISE-based Anti-Windup Control of Human Lower Limb using Electrical Stimulation
3. 学会等名 The 11th International Conference on Future Computer and Communication (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 本多健也, 河合康典, 越野亮
2. 発表標題 クラウドを用いた電気刺激によるバイラテラル 遠隔リハビリテーションシステム
3. 学会等名 平成 30 年度電気関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 河合康典, 本多健也, 河合宏之
2. 発表標題 改良型スキッピング変換を用いた下肢のテレリハビリテーションの制御
3. 学会等名 計測自動制御学会 システム・情報部門学術講演会2018
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

石川工業高等専門学校 電気工学科 河合研究室 https://www.ishikawa-nct.ac.jp/lab/E/y_kawai/www/

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
研究分担者	越野 亮 (Koshino Makoto) (90369968)	石川工業高等専門学校・電子情報工学科・准教授 (53301)	
研究分担者	三好 孝典 (Miyoshi Takanori) (10345952)	長岡技術科学大学・技術経営研究科・教授 (13102)	

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