

令和 3 年 6 月 19 日現在

機関番号：33302

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18K04214

研究課題名(和文) 下肢の筋特性を考慮したFES交互屈伸運動システムの構築と評価法に関する研究

研究課題名(英文) Development of a FES Alternate Knee Bending and Stretching System by Considering Antagonistic Biarticular Muscles

研究代表者

河合 宏之(Hiroyuki, Kawai)

金沢工業大学・工学部・教授

研究者番号：70410298

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)：本研究では機能的電気刺激を用いた FES ペダリング運動と FES ローイング運動の利点を兼ね備えた FES 交互屈伸運動による新しいリハビリテーション手法を提案した。特に、機能的電気刺激を用いて左右の脚を交互に屈伸運動させる制御則と、適切な速度でトライクを走行させるための制御則を提案し、理論的な安定性解析をおこなった。実用面からの貢献としてチェーン・プーリギア機構と直線運動を回転運動に変換する機構の2つをリカンベントトライクに加えることでリハビリテーションシステムを構築し、健常者を被験者とする検証実験により提案手法の有用性を検証した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で提案した FES 下肢交互屈伸運動は、従来の FES ペダリング運動でみられたデッドゾーンが存在しない運動であり、筋力が弱い患者でも運動の実現可能性が得られる点が大きな特徴である。下肢を含むシステムをラグランジュの運動方程式で表現し、屈伸運動ならびにトライクの移動モデルに対して理論的に安定性を保証する安定化制御則を提案している点に学術的意義があると考えられる。本研究で得られた結果は新しいリハビリテーション手法に繋がる可能性が高いため、社会的意義があると考えられる。

研究成果の概要(英文)：This project has proposed a novel rehabilitation method, we call FES alternate knee bending and stretching motion, by combining FES-cycling and FES-rowing. Specially, RISE-based control with functional electrical stimulation has been considered in order to realize smooth motion. From a theoretical point of view, the stability analysis of the proposed method is given. The chain and pulley gear mechanism achieves alternate knee bending and stretching motion, and the linear motion conversion mechanism achieves converting linear motion to rotary motion. Experimental results in healthy participants are shown to confirm the validity of the proposed system and the potential of use as transportation.

研究分野：ロボット制御工学

キーワード：交互屈伸運動 機能的電気刺激 リハビリシステム

### 1. 研究開始当初の背景

健常者の多くは普段の生活において意識はしていないが、日常生活での複雑な動きを可能にしているのは脊髄運動ニューロンの発火が骨格筋を活性化させているからであり、脊髄運動ニューロンを傷つけるような神経障害は不全麻痺や運動障害を引き起こす可能性がある。特に、脊髄損傷や脳卒中のような上位運動ニューロンの損傷を抱える人は、機能的な運動を実現することが困難になっている。実際、日本全国では脊髄損傷による肢体不自由者が 5.7 万人、血管疾患(脳卒中など)は 117.9 万人の患者がいると報告されている。現在、このような病状に対して根本的に解決する方法は確立されておらず、iPS 細胞の研究が将来的には脊髄損傷からの根本的な回復に貢献する期待が寄せられている一方で、iPS 細胞では筋力までは再生しないため、QOL の回復や向上のためにはやはりリハビリテーションが必要不可欠となる。現在は医師、理学療法士、作業療法士や介護士といった医療従事者が患者のリハビリテーションをおこなっているが、リハビリテーションにおける作業負担軽減やリハビリテーションの質の向上を実現するためには、ロボット・センサ等の技術を活用した新たなリハビリシステムが必要となる。

そのようななか、失われた脊髄運動ニューロンの機能を機能的電気刺激(FES)を用いて人工的に補うことにより、歩行、立ち上がり、物の把持などを実現するための研究がおこなわれている。特に、リカンベントトライクを用いたペダリング運動はバランスが取りやすいため、リハビリテーションの手段としてだけでなく下肢不自由者の移動手段としても期待されている。この FES を用いたペダリング運動については生理学・心理学的な知見からの研究が多く報告されている。しかしながら、筋肉への電気刺激により得られるすべての力をペダリング運動に伝えることはできておらず、健常者に比べると効率的な運動が実現できていないのが現状である。このような背景のもと、近年になって工学的な知見からより効率的な運動の実現を目指した研究がおこなわれはじめているが、ペダリング運動が内在的に抱える機構的な問題により、筋力の弱い患者においては十分なペダリング運動が実現できない場合があった。

このような背景のもと、リハビリテーションとしてより効率的な運動を実現させるために、FES を用いた運動制御に対する理論的な更なる研究成果や工学的な知見を活かした新しい運動システムの提案が期待されている。

### 2. 研究の目的

本研究の目的は、下肢の筋力の維持と運動特性の向上を目指し、機能的電気刺激(FES)を用いた下肢リハビリテーションシステムにおける運動制御の手法を、3 対 6 筋に基づく下肢の筋特性において最も強い筋(大腿四頭筋:Quadriceps, 図 1 参照)を積極的に運動に利用することでペダリング運動が内在的に抱える問題を解消するための実用的かつ制御工学的なアプローチに基づく新しいリハビリシステムを提案することにある。従来のペダリング運動に対する下肢の筋特性を考慮した制御則では、スムーズなペダリング運動が実現された一方で、大腿四頭筋に電気刺激を施すことができるペダリング角度領域はわずかであった。これは、ペダリング運動においては大腿四頭筋に広い角度領域で電気刺激を施しても無駄な力(ペダリングに寄与しない回転中心への力)が多くかかることを意味しており、ペダリングにおける回転運動の構造上避けられないものである。すなわち、従来のペダリング運動をする上では、(a)大腿四頭筋を広い角度領域で使うが無駄な力が多い、(b)無駄な力は少ないが大腿四頭筋を狭い角度領域でしか使えない、のいずれかであった。

これに対し、ペダリング運動以外の下肢リハビリテーションとしてローイング運動(ボートを漕ぐような運動)がある。ペダリング運動との大きな違いは直線的な運動であるため、下肢の筋のなかでも大きな力を出す大腿四頭筋を積極的に使うことから、ペダリング動作を実現するのに必要な筋力を有しない患者であっても、ローイング運動であれば実現できる可能性がある。しかし、ローイング運動は両脚を同時に動かす運動となり、瞬間的に大きな力を出せる反面、左右の位相差がない運動となる。これは、左右の位相差がある運動(例えば歩行運動)の改善に繋げることが難しく、リハビリテーションとしての効果が十分期待できるとは言いがたい。そこで、本研究ではペダリング運動とローイング運動の特徴を併せ持つ交互屈伸運動による新しいリハビリシステムを構築する。

### 3. 研究の方法

まず FES 交互屈伸運動をオイラーラグランジュシステムと捉えてモデル化する。つぎに、下肢の運動モデルの不確かさに対してロバストな制御則としてモデルパラメータを用いない RISE

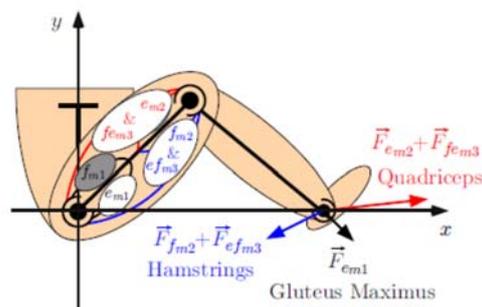


図1 3 対 6 筋に基づく下肢の筋特性

(Robust Integral of Sign of Error) 制御を提案する。

そして、リカンベントトライクに交互屈伸機構を組み込んだ新しいリハビリシステムを構築する。特に、下肢の運動機能に問題を抱える人の移手段の実現とリハビリテーションに対するモチベーションの維持(自分の身体が動かされると自覚できる)の両方を目指し、屋外での環境の変化(例えば使用者の姿勢や路面状況の変化など)に対してロバストなシステムとする。構築したシステムにおいて、実験データに基づき工学的な性能評価および検証をおこなう。

#### 4. 研究成果

交互屈伸運動における右脚のモデルを図2に示す。同様に左脚のモデルも定義でき、それぞれのペダルの位置の  $x$  座標を  $x_r$ ,  $x_l$  とすると両脚はベルトプリー機構により固定されているため、 $x_r + x_l = L$  という拘束条件をもつ。このとき、ペダル位置を  $x := x_l$  と定義すると、交互屈伸の運動モデルは

$$M(x)\ddot{x} + C(x, \dot{x})\dot{x} + g(x) = F$$

と表現される。このとき、目標値  $x_d$  とペダル位置  $x$  との偏差を  $e_1 := x_d - x$  と定義し、偏差系における平衡点  $e_1 = 0$  の漸近安定性をリアプノフの安定定理に基づいて保証するように筋刺激によって発生させるペダルに働く力  $F$  の生成方法ならびに制御則を提案した。

構築した FES 交互屈伸システムを図3に示す。交互屈伸運動によるペダルの位置を観測するために、リカンベントトライクの左ペダルにリニアエンコーダを取り付けた。筋刺激はコンピュータに USB 接続可能な Hasomed 社の筋刺激装置 RehaStim を用いて、大腿四頭筋、ハムストリングスに貼った経皮電極を通しておこなう。制御プログラムは MATLAB と Simulink を用いて設計し、Quanser 社の DSP (Digital Signal Processor) である Q2-USB に実装する。

機構面では2つの機構を開発した。まず、交互屈伸運動においてペダリング運動と同様に 180 度の位相差を持った左右の脚の動きを実現させるために、チェーン・プリーギア機構を開発した。本機構では、レール上を直線運動する左右のペダルを、プリーを介してチェーンで接続している。そのため、左右のペダルでずれのない 180 度の位相差を保った屈伸運動が可能となる。左脚を前方に伸展させると、右脚は手前に屈曲する。また、左右のペダルはそれぞれ駆動チェーンで別々のフリーホイール(以下、FW と呼ぶ)に接続されており、シャフトを回転させる。そして、開発したシステムを移手段として使用するためには、交互屈伸運動で得られる直線的なペダルの前後動作で後輪を回転させる必要がある。そこで、2つの FW を同じ方向に取り付けた直線運動変換機構を開発した。FW は回転を 1 方向にのみ伝えるラチェット機構を有しており、FW が逆回転してもシャフトは回転させないという特徴がある。

提案した制御手法と構築したシステムの有用性を示すための検証実験をおこなった。被験者は 20 代の健常な男性 5 人であり、金沢工業大学の倫理委員会の承認を得たうえで被験者に実験内容の十分な説明をして同意を得て実験をおこなった。本実験検証では、提案手法で下肢に電気刺激を施し目標値追従をおこなう交互屈伸運動と、自発的に下肢を動かし目標値追従をおこなう交互屈伸運動を比較する。なお、自発的な運動の際に被験者はパソコンのモニター上で目標ペダル位置と目標ペダル速度、実際のペダル位置とペダル速度を確認しながら目標値追従をおこなった。提案手法による運動の際には被験者にはモニターを見せずに下肢を自発的に動かさないようにし、身体をリラックスさせた状態で電気刺激のみで交互屈伸運動をおこなわせた。また、自発的な運動ではモニター上で確認する目標軌道を、筋刺激による実験において意識することを避けるため、すべての被験者において提案手法による実験を先に実施した。なお、すべての実験は 3 分間おこない、実験と実験の間には 5 分以上の休息を挟んだ。

そのうちのひとりの実験結果を図4と図5に示す。図4は電気刺激による運動の目標値追従のグラフ、図5は自発的な運動の目標値追従のグラフである。それぞれ3分間の実験のうち最初の 60 秒間のペダル位置(上図)とペダル速度(下図)を表している。実線は計測した左脚のペダル位置と速度、点線は目標ペダル位置と目標ペダル速度である。図4と図5より、交互屈伸の伸展と屈曲の切り替えのタイミングで目標値に対して遅れが見られるものの、提案手法による交互屈伸運動が自発的な運動と同様に、目標ペダル位置と目標ペダル速度に追従できていることが確認できる。また、被験者ごとの二乗平均平方根による目標値との偏差を表1に示す。

つぎに、周期性に関する比較をするために交互屈伸運動の周期、脚の伸展、脚の屈曲のそれぞれ

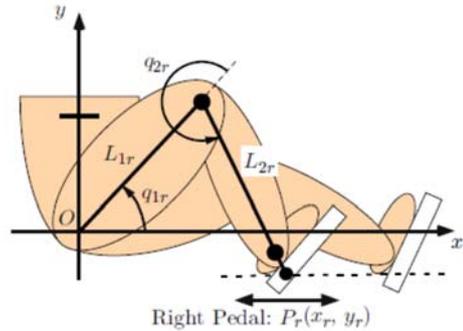


図2 右脚のモデル

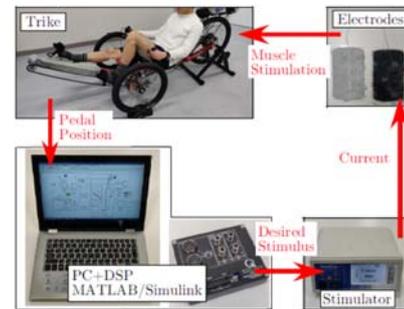


図3 構築した FES 交互屈伸システム

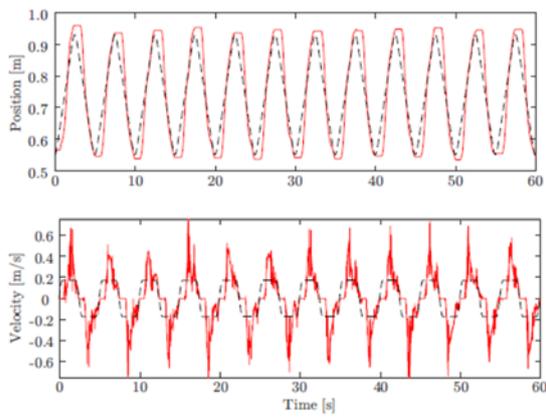


図4 提案する手法による実験結果

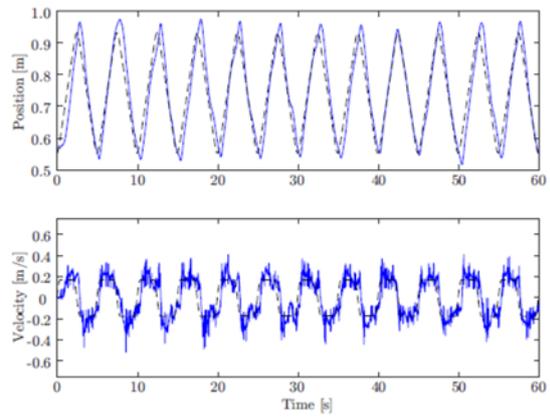


図5 自発運動による実験結果

表1 目標値との偏差

Participants	Position Error [m]		Velocity Error [m/s]	
	RISE	Volu.	RISE	Volu.
A	0.069	0.044	0.153	0.099
B	0.087	0.045	0.184	0.095
C	0.096	0.038	0.216	0.089
D	0.128	0.039	0.282	0.074
E	0.062	0.023	0.137	0.060

表2 交互屈伸運動の周期と脚の伸展屈曲

Participants		Time Cycle [s]		Amplitude of Stretches [m]		Amplitude of Bends [m]	
		Max	Min	Max	Min	Max	Min
		A	RISE	5.174	4.918	0.230	0.196
	Volu.	5.238	4.542	0.233	0.200	-0.190	-0.236
B	RISE	5.232	4.764	0.237	0.176	-0.189	-0.238
	Volu.	5.356	4.632	0.218	0.182	-0.209	-0.250
C	RISE	5.338	4.464	0.227	0.170	-0.156	-0.242
	Volu.	5.308	4.612	0.200	0.145	-0.140	-0.227
D	RISE	5.380	4.512	0.247	0.224	-0.243	-0.265
	Volu.	5.370	4.560	0.232	0.176	-0.170	-0.208
E	RISE	5.080	4.889	0.226	0.181	-0.217	-0.250
	Volu.	5.434	4.520	0.223	0.171	-0.191	-0.236

れの最大値と最小値を表2に示す。なお周期の理想値はすべての被験者で5秒であり、被験者A-Dの脚の伸展の理想値は0.19m、屈曲は-0.19mで、被験者Eではそれぞれ0.20mと-0.20mである。表1と表2より、追従性能は自発的な運動の方が優れているものの、提案手法においても自発的な運動と同様の周期と振幅で交互屈伸運動を実現できていることが確認できる。

本研究では、ペダリング運動とローイング運動の特徴を併せ持つ交互屈伸運動による新しいリハビリシステムを構築するという目的に対し、機能的電気刺激を用いた交互屈伸運動の追従制御手法を提案し、移動体としての機能を付加したFES交互屈伸トライクシステムを構築した。そして、健常者を被験者とした目標値追従の実験により提案手法の有用性を検証した。対麻痺患者への実験や医学・理学療法的な観点からのリハビリテーションとしての評価は今後の課題となる。

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 1件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Kushima Yoshihiro, Kawai Hiroyuki, Murao Toshiyuki, Kawai Yasunori, Kishitani Miyako, Suzuki Ryoichi	4. 巻 140
2. 論文標題 Development of a FES Knee Bending and Stretching Trike System with RISE-based Control and Its Experimental Verification	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 227 ~ 234
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.140.227	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 H. Kawai, M. J. Bellman, R. J. Downey, and W. E. Dixon	4. 巻 27-2
2. 論文標題 Closed-Loop Position and Cadence Tracking Control for FES-Cycling Exploiting Pedal Force Direction With Antagonistic Bi-Articular Muscles	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Control Systems Technology	6. 最初と最後の頁 730-742
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCST.2017.2771727	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Kushima Yoshihiro, Kawai Hiroyuki, Murao Toshiyuki, Kawai Yasunori, Kishitani Miyako, Suzuki Ryoichi, Fujita Masayuki	4. 巻 138
2. 論文標題 FES-assisted Cycling with Cadence Tracking Control for Rehabilitation of Hemiparesis	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 1391 ~ 1398
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.138.1391	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計18件（うち招待講演 2件/うち国際学会 9件）

1. 発表者名 河合宏之
2. 発表標題 リハビリシステム構築に向けた機能的電気刺激による下肢の運動制御
3. 学会等名 MSCS2020 ワークショップ「Cyber-Physical & Human/Social Systemの最前線」(招待講演)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 D. Horiki, H. Kawai, Y. Kushima, T. Murao, Y. Kawai, and M. Kishitani
2 . 発表標題 Tracking Control of FES Alternate Knee Bending and Stretching Trike in Consideration of Running Velocity
3 . 学会等名 Proc. of the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 M. Nagumo, H. Kawai, Y. Kushima, T. Murao, Y. Kawai, and M. Kishitani
2 . 発表標題 Iterative Learning Control for FES-Cycling With Antagonistic Biarticular Muscles
3 . 学会等名 Proc. of the 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 Y. Kushima, Y. Araki, H. Kawai, T. Murao, Y. Kawai, and M. Kishitani
2 . 発表標題 Velocity Tracking Control of Recumbent Trike with Functional Electrical Stimulation
3 . 学会等名 Proc. of the 3rd IFAC Conference on Cyber-Physical & Human Systems ( 国際学会 )
4 . 発表年 2020年

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

1. 発表者名 Y. Kawai, K. Houga, H. Kawai, and T. Miyoshi
2. 発表標題 Bilateral Tele-Rehabilitation System with Electrical Stimulation by using AWS IoT
3. 学会等名 Proc. of 2020 the 12th International Conference on Future Computer and Communication (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀木大地, 久島康嘉, 河合宏之, 村尾俊幸, 河合康典, 岸谷都
2. 発表標題 車速を考慮した機能的電気刺激による下肢交互屈伸運動に関する研究
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 新田圭佑, 久島康嘉, 河合宏之, 村尾俊幸, 河合康典, 岸谷都
2. 発表標題 機能的電気刺激とRISE制御による手指屈曲システムの構築
3. 学会等名 令和2年電気学会全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 堀木大地, 久島康嘉, 河合宏之, 村尾俊幸, 河合康典, 岸谷都
2. 発表標題 自動変速機を有するFES下肢交互屈伸トライクシステムの構築
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2019
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 荒木雄太郎, 久島康嘉, 河合宏之, 村尾俊幸, 河合康典, 岸谷都
2. 発表標題 車速を考慮した機能的電気刺激による下肢のペダリング制御に関する研究
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kawai, K. Shibano, H. Kawai, T. Miyoshi, and M. Fujita
2. 発表標題 Bilateral Tele-Rehabilitation System using Electrical Stimulation applying Modulated Time-Domain Passivity Control
3. 学会等名 Proc. of the Joint 8th IFAC Symposium on Mechatronic Systems and 11th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, (Joint Mechatronics 2019 & NoICoS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kushima, K. Nakamura, H. Kawai, T. Murao, Y. Kawai, M. Kishitani, R. Suzuki, and M. Fujita
2. 発表標題 FES-assisted Control for Standing-up Motion from Squatting Position
3. 学会等名 Proc. of the Joint 8th IFAC Symposium on Mechatronic Systems and 11th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems, (Joint Mechatronics 2019 & NoICoS 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Kawai, Y. Miyamoto, and H. Kawai
2. 発表標題 RISE-based Anti-Windup Control of Human Lower Limb using Electrical Stimulation
3. 学会等名 2019 the 11th International Conference on Future Computer and Communication (国際学会)
4. 発表年 2019年

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

1. 発表者名 荒木雄大郎, 久島康嘉, 村尾俊幸, 河合康典, 河合宏之
2. 発表標題 車速を考慮したFESトライクシステムの構築と実験検証
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

1. 発表者名 河合康典, 本多健也, 河合宏之
2. 発表標題 改良型スキャタリ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

1. 発表者名 堀純菜, 澤田隆之, 村尾俊幸, 河合宏之, 鈴木亮一
2. 発表標題 筋骨格シミュレーションによる歩行支援装置の評価
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 河合宏之
2. 発表標題 リハビリテーションに向けた機能的電気刺激による下肢の運動制御
3. 学会等名 平成30年度 電気関係学会北陸支部連合大会 日本生体医工学会 招待講演（招待講演）
4. 発表年 2018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