

平成 30 年 6 月 12 日現在

機関番号：51401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05919

研究課題名(和文) 下肢障害者のための車いす取り付け型サイクリングユニットの開発と評価

研究課題名(英文) Development and evaluation of wheelchair-attachment type cycling unit for people with disabilities

研究代表者

小林 義和 (Kobayashi, Yoshikazu)

秋田工業高等専門学校・その他部局等・准教授

研究者番号：50331971

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：4輪型，アップライト型，リカンベント型の3種類の障がい者用自転車を開発した．それぞれの自転車は自転車装置と車いすから構成される．これらの3つの自転車は地面からのクランク軸中心高さ(ボトムブラケット(BB)高さ)が異なっている．電気刺激不使用時(随意運動)および電気刺激使用時(FES運動)の結果を評価した．本研究は，健常被験者に対して下肢関節モーメントに及ぼすBB高さの影響を調査した．FES運動時，随意運動時いずれの場合においてもBB高さの最も高いリカンベント型を使用すると，高強度の運動が行いやすく，一方BB高さの低いアップライト型や4輪型では低い運動強度の運動に適していることが示唆された．

研究成果の概要(英文)：For this study, we developed bicycles of three types for people with disabilities: a four-wheel type, an upright type, and a recumbent type. Each cycle apparatus has a cycling device unit and a wheelchair. These three cycling devices have different bottom bracket (BB) heights from the ground level. Here, the bottom bracket is a machine element at the center of the crankshaft. Voluntary and functional electrical stimulated (FES) motions were evaluated. This study investigated the effects of BB height on lower limb joint moments of healthy subjects. Experimentation with those bicycles clarified the following results. In cases during either FES exercise or voluntary exercise, use of the recumbent type with the highest BB height facilitates high-intensity exercise. By contrast, the exercise intensity was lower with the upright type and the four-wheel type with a low BB height.

研究分野：機械力学・計測制御

キーワード：機能的電気刺激 車いす 関節モーメント リハビリテーション 随意運動

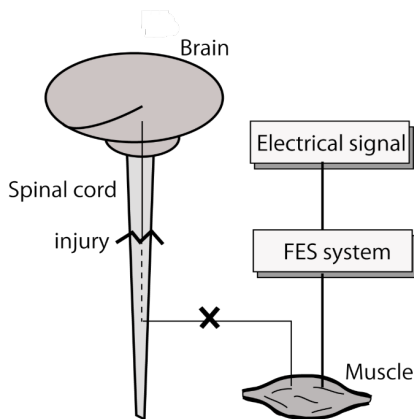


図1 FESの原理

1. 研究開始当初の背景

脊椎損傷 (Spinal cord injury: SCI)や脳血管障害により脊髄や脳に障害が起きた場合、脳からの指令が筋肉に伝わらないために四肢を随意的に動かすことができない。この運動不足による二次障害として下肢のさらなる筋萎縮の進行や骨強度の低下、血行障害などが生じる。前述の疾患において脊椎に損傷があっても途中の神経は無事な場合が多い。そこで、筋肉に直接電氣的刺激を与えることで筋収縮を引き起こすことが可能であり、麻痺している神経に電気刺激を与え、失われた身体機能の再建を行うことが可能である。この技術を FES(Functional Electrical Stimulation: 機能的電気刺激)と呼ぶ。動作を再現するにはその動作を行う場合の筋肉の活動を記録した筋電図を用いて FES により再現する (図1)。本研究で対象としている FES サイクリングとは通常の車いすと、下肢でクランクを漕ぐための前輪ユニットを合体させたものをいう。前輪ユニットは通常の車いすの前方部分に取り付け、麻痺患者が FES の刺激を用いて下肢でペダルを漕ぐためのものである。国内外の FES サイクリングに関する先行研究では前輪と車いすが一体となったものがほとんどである。また、類似のものとして、FES を併用しない足こぎ車いすなどもあるが一体型である。障害者の方は、普段使用している車いすを日常的な使いやすさや体格などに応じてオーダーメイドしている場合が多いが、本ユニットは、様々な車いすに取り付け可能である。これまで考案されてきた FES サイクリングは、ペダルの位置が座面よりも上部に位置しているものが多かった。この理由として、海外の研究では、「リカンベントトライク:寝そべった形でサイクリング運動をする 3 輪自転車」を FES サイクリングとして改造し使用する例が多いためと考えられる。FES 駆動のためには、この姿勢は幾分窮屈な姿勢であり適さず、本研究では、下肢障害者の使用し易さを考慮し、ペダル位置をより低く設定することが必要であると考えている。ペダル位



図2 FESサイクル: 4輪型 (上, BB 高さ=500mm), アップライト型 (中, BB 高さ=260mm), リカンベント型 (下, BB 高さ=580mm)

置を高くしたときおよび低くした時にペダリングに及ぼす影響がどのようになるかは分かっていない。

2. 研究の目的

この研究の目的は FES を用いた時の乗車姿勢が自転車トレーニングに及ぼす影響を調べることである。これにより、効果的な筋肉強化トレーニングが可能であったり、より少ない刺激強度で運動ができる。将来、屋外での長い距離や時間間隔の運動、筋肉強化トレーニング、心肺のトレーニングなどそれぞれに最も適した乗車姿勢を選択することができる。

本研究では、クランクシャフト中心の高さであるボトムブラケット高さ、以下 BB 高さを種々変更した時の下肢関節モーメントを調べることで、FES サイクルのペダリング挙動を調べることを目的とする。

さらに、近年、SCI 患者だけではなく、下肢の筋力の低下した高齢者も増加してきており、本研究で開発した装置は、それら筋力の低下した高齢者の筋力トレーニングにも利用可能である。そこで、本稿の最後に、FES を用いない場合 (随意運動の場合) について併せて実験を行ったので、結果を報告する。

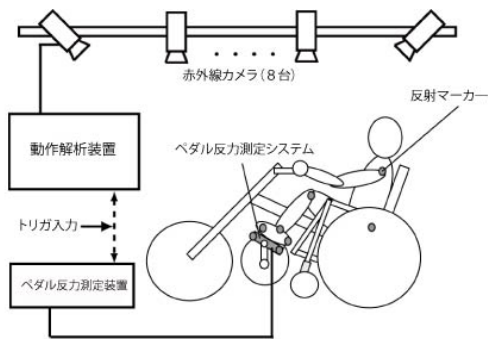


図3 実験装置

本研究では、様々なサイズの車いすに取り付け可能な自転車ユニットを開発した。本研究では代表的な3つのBB高さの自転車を使用して実験を行った。

3. 研究の方法

3.1 サイクルユニットの設計

著者らが開発した3種類のFESサイクルは、(a)4輪型、(b)アップライト型、(c)リカンベント型である。それぞれの外観は車いすとFESサイクルユニットで構成されている。ユニットは、一般的な車いすに着脱可能である。3つのFESサイクルの最も重要な特徴は、クランクシャフト中心高さであるBB高さが異なっていることである。アップライト型、4輪型、リカンベント型のBB高さはそれぞれ、地上から260mm、500mm、580mmであり、図2に外観を示す。

3.2 ペダル反力測定システム

今回のFESサイクルのような自転車運動の計測に必要なペダル反力測定システムを開発した(図4)。システムは、4つの小型3軸力センサ(USL06-H5-500N-C:テック技販)が、4隅に設置されている(図中赤丸で示す)。これらのセンサにより3軸方向の力が計測され、それを用いて(1)靴底に作用する力である圧力中心点(COP)の位置(2)3次元空間でのペダルの位置と傾き(3)ペダル反力と3軸回りのモーメントを測定・計算できる。なお、ペダル運動の対称性を考慮し、ペダルセンサは右足のデータのみ収集し、左足は寸法と重さが等しいダミーペダルを使用した。

3.3 FESペダリングの3次元逆動力学解析

11名の被験者A~K(すべて男性)が実験に参加した。本研究は、秋田工業高等専門学

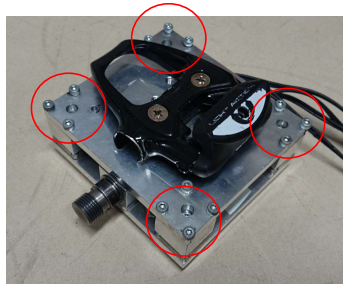


図4 開発したペダル反力測定システム

校ヒト生命倫理委員会の承認を受けている(2017年課題No.5,6,7.なおこれらはすべて2015年からの継続課題である)。それぞれの被験者は、実験の詳細について十分な説明を受けた後、インフォームドコンセントに署名し、実験に参加した。

実験は図3で示されるシステムにより実施された。動作測定に際し、反射マーカは右半身にのみ次のような解剖学的な位置に設置された:すなわち、肩峰、大転子、膝外足部、くるぶし外側部、第5中足骨、第10胸椎である。3次元動作解析システム(Vicon Motion System Ltd., Oxford, UK)を用いて測定した動作軌跡をデータに基づき、制御系CADであるMATLAB(Math Works Inc.,Natick, USA)を用いて関節角度、関節モーメント、ペダル反力を計算した。ペダル反力測定システムと3次元動作解析システムのサンプリング周波数は100Hzとした。外部回路から同時にトリガ信号を入力することにより両システムの同期をとった。下肢モデルは、矢状面内の関節の回転を考慮した二次元の剛体リンクモデルを仮定したが、リンク質量比、慣性モーメント比の値は阿江らの1992年の研究を参考にした。データ解析は山崎らの1975年の研究による方法を用いた。

3.4 実験プロトコル

BB高さが下肢関節モーメントに及ぼす影響を調査する目的から、電気刺激を併用して被験者が4輪型、アップライト型、リカンベント型FES自転車をペダリングすることで調べた。それぞれの自転車を室内の固定ローラーに固定し、ワークロードをペダル型パワーセンサ(Look Keo power, Polar Electro, Finland)を用いて10Wに設定した。10WはSCI患者の極めて低下した筋力でペダリング可能なワークロードを仮定している。アップライト型、4輪型、リカンベント型のBB高さはそれぞれ、地上から260mm、500mm、580mmである。BBの水平位置は次のような方法によって行う。初めに、大転子(腰の位置の骨)からペダルまでの横たわった被験者の体に沿った距離Lは $L=GTH \times 100\%$ によって決定した(ここでGTHは立位で測定した被験者の大転子の高さ(cm)である)。被験者の背中と車いすのバックレストの隙間を少なくするため、種々

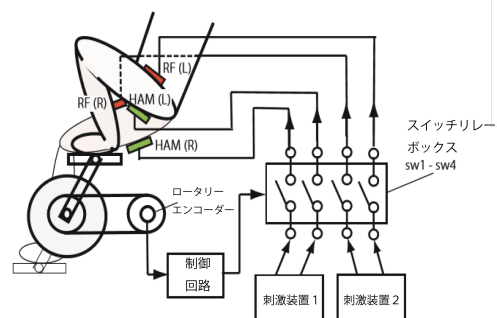


図5 FESサイクル駆動システム

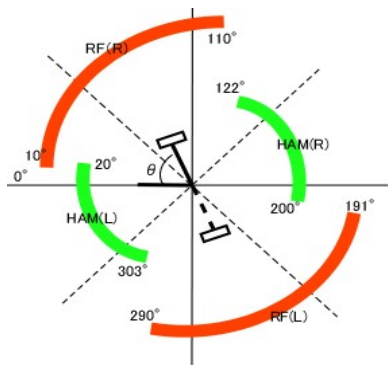


図 6 刺激タイミングの例

の厚さのスタイロフォームを設置して調整した。

図 5 は FES サイクルの駆動システムを示す。クランク角はアブソリュート型ロータリーエンコーダで取得した。刺激タイミングはマイコン (Arduino UNO, Arduino.cc) を用いた回路でスイッチングされた。

本研究では、ケイデンスとして 30rpm を選択した。刺激強度はパルスキュープロ KR-7(OG Wellness Technologies, JAPAN) を用いて 27mA 以下に設定された。

出力周波数は 20Hz を用いた。最大出力電流は 27mA である。安全性を考慮して、最大電流 (27mA) の 35% が刺激強度として採用された。

表面電極 (Techogel SR-5090; Sekisui Medical, Japan) は大腿直筋とハムストリングスのモータポイントを挟むように張られた。被験者は、実験の途中下肢を自発的に動かさないように指示された。また電気刺激での正味出力を引き出すために足の筋肉をリラックスさせるよう指示された。刺激タイミングの一例は図 6 に示される。調整後、30 秒のデータが収集された。

3.2 関節モーメントの傾向

本稿では割愛するが、4 秒間の比較的短時間での挙動の傾向を事前に確認し、3 種類の自転車を使用した時の、関節モーメントの傾向を把握した。次に、それぞれの FES サイクルのペダリング時の関節モーメントを詳しく比較するために、すべての被験者について 3 種類の自転車の関節モーメントの図を準備した (図 7) 5 秒から 25 秒までの股関節モーメント M_h 、膝関節モーメント M_k 、足関節モーメント M_a が調べられた。図 7 は被験者

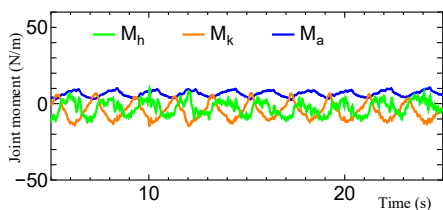


図 7 被験者 G の股関節、膝関節、足関節モーメント (4 輪型の場合)

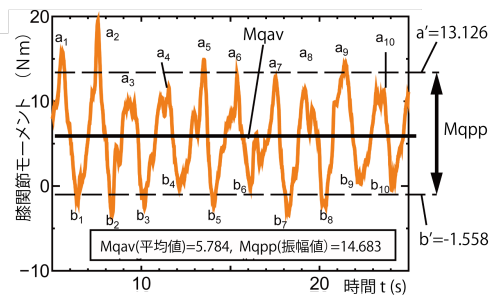


図 8 膝関節モーメントの時間履歴 (被験者 G: 4 輪型)

G が 4 輪型サイクルをペダリングした時の膝関節モーメント M_k の時間履歴の一例である。1 周期ごとの膝関節モーメントの最大値 a_i および最小値 b_i が選択された (もし瞬間的に振幅が連続する場合には、2 つのピークの中でより高いピーク値が採用された)。次にモーメントの平均値 a' 、 b' が計算された。次にモーメントの平均値 M_{qav} (図中の太実線)、モーメントの振幅値 M_{qpp} (図中の両矢印) が計算された。この M_{qav} 、 M_{qpp} を用いて、4 輪型、アップライト型、リカンベント型について、箱ひげ図を描き、(1) M_{qav} (平均関節モーメント)、(2) M_{qpp} (関節モーメントの振幅値) の傾向を調べた (図 9)。

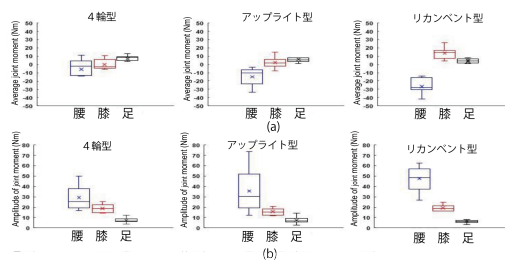


図 9 (a) M_{qav} (平均値) および (b) M_{qpp} (振幅値) の箱ひげ図比較。青：股関節，赤：膝関節，黒：足関節

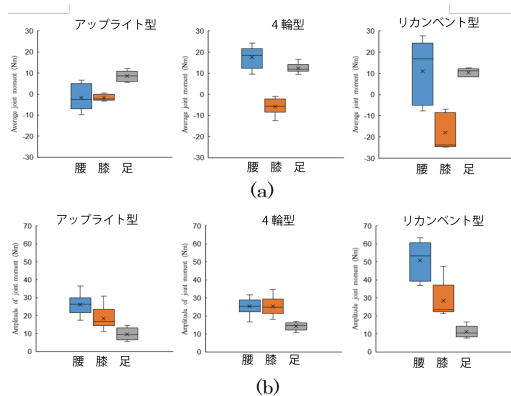


図 10 随意運動における (a) M_{qav} (平均値) および (b) M_{qpp} (振幅値) の箱ひげ図比較。青：股関節，オレンジ：膝関節，グレイ：足関節

4. 研究成果

定常状態(実験開始を0秒としたときの5秒から25秒までの20秒間のデータ)の一般的な挙動を確かめた。

箱ひげ図の結果から、関節モーメントの平均値(a)($M_{qav}(q=h,k,a)$)と示す)を見ると、足関節モーメントの傾向は3つのサイクルどれもほとんど同じである。対照的に、膝関節モーメントと股関節モーメントは、正方向(伸展方向)および負方向(屈曲方向)にシフトしている。4輪型、アップライト型、リカンベント型の順に徐々に大きくなっている。特に、股関節モーメントのシフト割合が極めて大きい。図9(a)において4輪型のすべてのモーメントは0に漸近している。

関節モーメントの振幅値(b)($M_{qpp}(q=h,k,a)$)について見ると、3種類の自転車について膝関節モーメントと足関節モーメントはほとんど同じであるといえる。しかしながらこの場合、股関節モーメントは4輪型、アップライト型、リカンベント型の順に徐々に極めて大きくなっている。これらの値は、股関節モーメントの変動の度合いを示している。以上の結果より、FESによる電気刺激サイクリングでは、4輪型やアップライト型を使用すれば下肢の関節や筋肉に負担をかけない状態でリハビリテーションや、トレーニングを行いやすく、一方、リカンベント型を使用すれば、特に股関節や関連した筋肉を積極的に動かすようなリハビリテーションが容易であることが示唆された。

さらに、SCI患者ではなく、筋力の低下した高齢者のトレーニングを想定して、FESによる電気刺激を行わない場合(以下、随意運動の場合)の関節モーメントとBB高さの影響についても調べた。ワークロードは10W、ペダル回転数であるケイデンスは50rpmとした。また、図7および図8に対応する図は、5秒から15秒までの10秒間のデータを作成し、平均関節モーメント M_{qav} と関節モーメントの振幅値 M_{qpp} を計算した。

箱ひげ図を用いて、下肢関節モーメントの平均値(a)と振幅値(b)の傾向が図10に示される。下肢関節モーメントの平均値(a)を見ると、足関節モーメントの傾向はすべての自転車タイプについてほぼ同じである。4輪型とリカンベント型の結果にアップライト型の結果を参照して考えると、股関節モーメントは正の伸展方向に、膝関節モーメントは負の屈曲方向に移動していることが明らかである。さらに両移動(伸展と屈曲)の大きさはアップライト型、4輪型、リカンベント型の順に徐々に大きくなっている。対照的に、振幅値(b)についてみてみると、アップライトと4輪型を比較すると、ほとんど同じである。膝関節モーメントについてみてみると、(アップライトから4輪型では、)わずかに増加している。リカンベント型を使用する場合には、膝関節モーメントは4輪型の場合よりも大きくなる。しかしながら、股関節モーメント値は

リカンベント型ではかなり大きくなる。

以上の結果より、図10(a)と(b)の箱ひげ図の結果は次のように考えることができる:アップライト型を用いると、 M_{qav} と M_{qpp} はとも小さくなる。なぜなら、比較的低い負荷で運動できるため、筋力が低下した高齢者の初期のトレーニングやリハビリテーションに適していると考えられる。さらに4輪型やリカンベント型を用いれば、股関節伸筋のトレーニング(たとえば殿筋)や膝関節屈筋(例えばハムストリングス)のトレーニングに適していると考えられる。よって、筋肉を積極的に増加させる高負荷の運動すなわち中・後期のトレーニングに適していると考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 齊藤亜由子, 宮脇和人, 木澤 悟, 小林義和, 歩行動作におけるモーションセンサを用いた膝関節角度の推定に関する研究, (遠心加速度と接線加速度の影響に着目して), 査読あり, 日本機械学会論文集, Vol. 84,2018,No. 857,17-00488.
- ② 巖見武裕, 小松瞭, 大高稿兵, 三浦弘樹, 島山和利, 島田洋一, 小林義和, CT/MRI画像に基づく3次元体幹筋骨格モデルの製作と評価, 査読あり, 日本機械学会論文集 Vol. 83,2017,No. 849,16-00318.

[学会発表] (計18件)

- ① 武田裕大, 小林義和, FESサイクルの乗車姿勢がペダリング特性に及ぼす効果 (健常被験者: 随意運動およびFES運動の場合), 第51回日本生体医工学学会東北支部大会講演論文集, 秋田, 2017,ME2-4(2017.12)
- ② 村岡拓, 小松瞭, 巖見武裕, 小林義和, 木澤悟, 松永俊樹, 島田洋一, ニューラルネットワークを用いたFESサイクリングの電気刺激タイミング推定, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017, 金沢, B-27.(2017.11)
- ③ 水澤駿介, 児嶋良太, 武田裕大, 小林義和, 小松瞭, 巖見武裕, 島田洋一, クランク軸高さの異なる3種類のFESサイクルの下肢関節モーメントと筋電値の比較, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017, 金沢, B-26.(2017.11)
- ④ 児嶋良太, 水澤駿介, 武田裕大, 小松瞭, 小林義和, 巖見武裕, 各種自転車の乗車姿勢による下肢関節モーメントと筋電値の比較調査, 日本機械学会シンポジウム: スポ

ーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017, 金沢,D-23.(2017.11)

- ④ 村岡拓, 小松瞭, 巖見武裕, 小林義和, 島田洋一, 三次元筋骨格モデルを用いた FES サイクルのクランク位置評価, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2017, 金沢, D-16.(2017.11)
- ⑤ Yoshikazu Kobayashi, Takehiro Iwami, Akira Komatsu, Kazutoshi hatakeyama, Toshiki Matsunaga and Yoichi Shaimada, "Effects of riding position of bicycle for disabilities on lower limb joint moments and EMG values of able-bodied subjects: Experiment in voluntary and FES cycling motion", REHAB WEEK 2017, IFESS July 2017, 17th-20th, London.
- ⑦ 村岡拓, 桧森江靖, 小松瞭, 巖見武裕, 小林義和, 島田洋一, サイクリング運動における代謝効率と生体内力評価, 日本機械学会東北学生会第 47 回卒業研究発表講演会講演論文集, 宮城, 2017, 1013(2017.3)
- ⑧ 草階彬, 小玉翔太, 小林義和, 巖見武裕, 畠山和利, 島田洋一, 障害者用自転車のクランク高さが下肢関節モーメントと筋電に及ぼす影響, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2016, 山形, C-7.(2016.11)
- ⑨ 小松瞭, 八木宏矢, 巖見武裕, 小林義和, 齊藤公男, 畠山和利, 齊藤英知, 松永俊樹, 島田洋一, IMU を用いた膝関節動作計測に関する研究, 日本機械学会東北支部第 52 期秋季講演会講演論文集 USB, 秋田, 2016, 409.(2016.9)
- ⑩ 桧森江靖, 村岡拓, 巖見武裕, 小林義和, 岩本陽輔, 畠山和利, 高橋裕介, 松永俊樹, 島田洋一, 機能的電気刺激による電気刺激運動を誘発する刺激タイミング装置の開発と代謝効率評価, 日本機械学会東北支部第 5 2 期秋季講演会講演論文集 USB, 秋田, 2016, 408.(2016.9)
- ⑪ 水澤駿介, 小玉翔太, 草階彬, Sam Moukoka, 小林義和, 巖見武裕, 島田洋一, FES サイクリングの乗車姿勢が下肢関節モーメントに及ぼす影響, 日本機械学会東北支部第 5 2 期秋季講演会講演論文集 USB, 秋田, 2016, 407.(2016.9)
- ⑫ 桧森江靖, 村岡拓, 巖見武裕, 小林義和, 岩本陽輔, 畠山和利, 高橋裕介, 松永俊樹, 島田洋一, FES サイクリングによる運動時における代謝効率の比較実験, 日本リハビリテーション工学協会第 3 1 回リハビリ工学カンファレンス in こうち抄録集, 高知, 2016, 27-6-2.(2016.8)
- ⑬ 小玉翔太, 小林義和, 桧森江靖, 巖見武裕, 島田洋一, 3 種類の車いす取り付け型自転車の比較 (健常被験者による比較と屋外走行実験), 日本リハビリテーション工学協会

第 3 1 回リハビリ工学カンファレンス in こうち抄録集, 高知, 2016, 26-6-1.(2016.8)

- ⑭ 草階彬, 赤田慎幸, 小松瞭, 小林義和, 6 軸型自転車用ペダルセンサの性能評価, 日本機械学会東北学生会第 46 回卒業研究発表講演会講演論文集, 福島, 2016, pp98-99.(2016.3)
- ⑮ 小玉翔太, 白幡勇氣, 水澤駿介, 桧森江靖, 小林義和, 巖見武裕, 島田洋一, 障害者用自転車のペダル高さが下肢関節モーメントに及ぼす影響 (健常者による検討), 日本機械学会東北学生会第 46 回卒業研究発表講演会講演論文集, 福島, 2016, pp102-103.(2016.3)
- ⑯ 桧森江靖, 巖見武裕, 小林義和, 畠山和利, 高橋裕介, 松永俊樹, 島田洋一, 機能的電気刺激を使用したサイクリング運動による代謝効率の評価, 日本機械学会第 28 回バイオエンジニアリング講演会, 2016, 東京, 1F23.(2016.1)
- ⑰ 草階彬, 赤田慎幸, Pezzsetta Samuele, 小林義和, 三浦裕介, 巖見武裕, 自転車用 6 軸型ペダルセンサの開発と評価実験, 日本機械学会シンポジウム: スポーツ工学・ヒューマンダイナミクス 2015, 草津 (滋賀), C-13.(2015.10)
- ⑱ Yoshikazu Kobayashi, Shigekazu Suzuki, Yuichi Tanaka, Ryoichi Chiba and Shigeru Nagasawa, "Joint research by NUT and NIT to create regional premium brands through Tri - institutional cooperation", The 4th international GIGAKU conference in Nagaoka(IGCN2015), Jun. 19-21, 2015, Nagaoka, IO-10, pp.90(2015.6)

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

- 出願状況 (計 0 件)
- 取得状況 (計 0 件)

[その他]

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

小林義和(KOBAYASHI Yoshikazu)
秋田工業高等専門学校
創造システム工学科・機械系・准教授
研究者番号: 50331971