

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月1日現在

機関番号：51401
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2010～2012
 課題番号：22500522
 研究課題名（和文）機能的電気刺激を用いたパワーリハビリシステム利用時における
 バイオメカニクスの評価
 研究課題名（英文）Evaluation of power-rehabilitation system using FES
 研究代表者
 宮脇 和人（MIYAWAKI KAZUTO）
 秋田工業高等専門学校 機械工学科 教授
 研究者番号：00390906

研究成果の概要（和文）：

高齢化社会においては、高齢者の運動を補助する機器が重要である。我々は、高齢者用の運動補助機器を開発した。本報告では、ローイングマシンと機能的電気刺激（FES）により高齢者の全身運動を行う機器を提案する。このローイングマシンは下肢と上肢を同時に運動することができ、FESは表面電気刺激により下肢の運動をサポートしている。本装置を用い、人間動作の測定および、バイオメカニクスの評価を行った。

研究成果の概要（英文）：

Heading towards elderly society, the development of machines for assisting of human motion is getting more important. We developed the fitness apparatus for elderly people. In this study, we propose the apparatus which exercises every part of the body of elderly people by rowing machine and Functional Electrical Stimulation (FES). This rowing machine can exercise of the leg and the upper body. FES is supporting movement of the leg by surface electricity stimulus. We have evaluated biomechanics by using this machine.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2012年度	1,000,000	300,000	1,300,000
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション科学・福祉工学

キーワード：健康・福祉工学

1. 研究開始当初の背景

高齢者は加齢や運動不足により下肢機能が低下し、下肢の筋萎縮や血行障害などが起こる。そのため日常的にトレーニングを行い筋肉を維持し、運動不足を改善する必要があると考えられる。高齢者のリハビリトレーニングとしては、理学療法士の手により関節を動かすストレッチなどの運動療法や、上肢で平行棒を掴んで下肢を交互に引きずる他動的な歩行運動を行っている。しかし、これらの他動的な運動だけでは下肢の筋萎縮は防止できない。その理由として、他動的な運動だけでは速筋の強化が期待できないことが

挙げられる。筋の能動的な収縮運動がなければ血流ポンプとしての作用も小さく、末梢循環不全と内臓障害の十分な予防にもつながりにくい。高齢者における遅筋と速筋の筋萎縮の比較では速筋の方が優位に萎縮する。それゆえに、他動的な運動だけではなく、高齢者が自ら行う能動的な運動で、速筋も強化する機能的電気刺激を用いたパワーリハビリシステムの開発を行ってきた。本研究は、このパワーリハビリシステム利用時の人間動作の測定と、バイオメカニクスの評価手法を実施することである。

2. 研究の目的

高齢者、下肢麻痺者が、効率的かつ効果的な全身運動をおこなうために、総合的に取り込めるような機能的電気刺激を用いたパワーリハビリシステムの開発を行ってきた。本研究開発は、申請者が新しく開発したシステムの有効性を把握するために、従来は利用者へのアンケート調査など定性的な評価が行われていたリハビリテーション分野においてパワーリハビリ機器を用いてトレーニングを行っている時の高齢者や障害者の身体への効果を、座圧・足圧測定、三次元的な動作計測と、申請者が独自に研究を進めている筋骨格モデルを用いたモデルベースシミュレーションにより、定量的に評価する手法を確立する。

3. 研究の方法

本研究では、ローイングマシンと機能的電気刺激装置を利用した。また人間の動作測定には、座圧・足圧測定装置と三次元動作解析装置を用いた。

3. 1 ローイングマシンの構成

本研究で用いた高齢者のリハビリ用のローイングマシンは、下肢の屈伸運動を行う座面スライド部と腕の屈曲、伸展運動を行う負荷装置部から構成されている。このローイングマシン各部の構成と、使用例を図 1, 2 に示す。ローイングマシンの負荷装置部はハンドル、チェーン、フライホイールから構成されており、ハンドルを引くことによる負荷がチェーンを介してフライホイールに蓄積され、ローイング運動(ボートを漕ぐ動作)を行うことができる。



図 1 ローイングマシンの構成



図 2 ローイングマシンの使用例

3. 2 ローイングマシンの仕様

ローイングマシンはローイング運動時に座面スライド部が前後方向 680mm の範囲でスライドする。チェーンは最大 1300mm ある。背もたれは後方に倒すことができ、肘掛は起こすことができる仕様となっている。また、このローイングマシンの特徴として電動モータによるシートの昇降機能が挙げられる。これは、シートが昇降することで高齢者や車いすを使用している障害者の乗り降りを支援する機能である。シートの昇降は、最大上昇時で地上から 500mm、最小下降時で 300mm となり、最小下降地点から最大上昇地点までの時間は約 18sec である。

図 3 にローイングマシンの寸法と、図 4 にシートの昇降機能を示す。

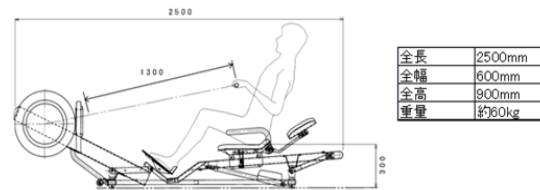
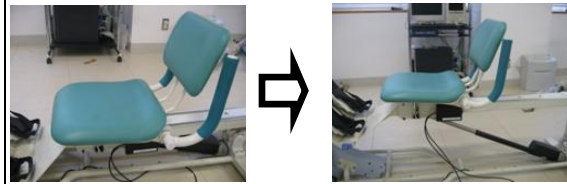


図 3 ローイングマシンの寸法



(a)シート下降時 (b)シート上昇時

図 4 シートの昇降機能

3. 3 ローイング運動

ローイングマシンはローイング運動を行うための装置である。このローイング運動とは、下肢部の屈伸運動と腕の屈曲、伸展運動を組み合わせたボートを漕ぐ動作のことである。図 5 にローイング運動の手順を示す。

・ローイング運動の手順

- ①スタート位置では、膝を屈曲させ、肘を伸展させる。
 - ②フットレストに両脚で力かけることで、スライド座面が後方に移動し、膝の伸展が開始する。
 - ③膝の伸展が終了するとスライド座面は停止し、肘の屈曲動作を開始する。
 - ④両腕でハンドルが胸部に付くように、しっかりと引き込む。
 - ⑤ハンドルの引き込みが終了すると、肘の伸展を開始させると同時に、膝の屈曲動作を開始しスライド座面を前方に移動する。
- ①'膝の屈曲が終了しスライド座面が前方で停止する。次のストロークを始めるスタート位置となる。この①から⑤の動作を繰り返す

ことでトレーニングを行う。

この①～⑩までの過程を1ストロークとし、これを繰り返すことでローイング運動を行う。

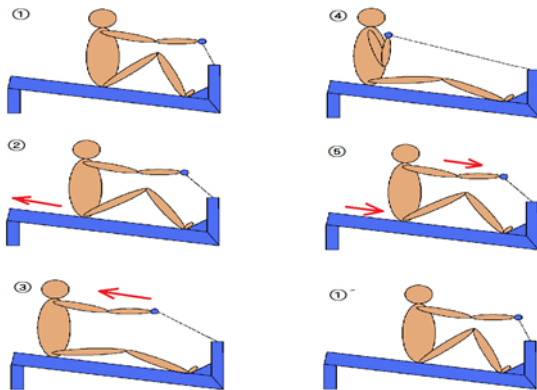


図5 ローイング運動の手順

3. 4 機能的電気刺激装置

従来の表面電極を用いた FES では矩形波(図 6)と呼ばれる長方形の電気信号を与えていた。しかし矩形波を搬送波として用いた場合、皮膚のインピーダンス(交流抵抗)の値が大きく、局所的に大きな痛みを伴うため、運動補助機器の使用対象者である高齢者に適用することは不可能であると考えられる。そこで、痛みの軽減のため搬送波に皮膚のインピーダンスの値が最も低くなる 2.5kHz 付近の正弦波を用いたバースト波(図 7)を出力する FES 刺激装置を用いる。FES を使用して発生する筋力は与える電圧の大きさだけでなく電気信号の周波数(刺激周波数)によっても変えることができ、通常は 20Hz から 100Hz の刺激周波数を用いる。

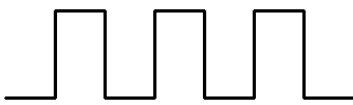


図6 矩形波

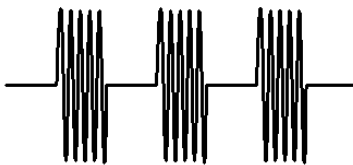


図7 バースト波

本研究で開発した表面電極を用いたバッテリー駆動の FES 刺激装置を図 8 に示す。この刺激装置は 4CH の出力で、出力電圧と周波数がボリュームにより調節可能となっている。また、刺激パターンである刺激の立ち上がり時間や刺激時間、休止時間などは RC232C を介して、コンピュータで任意に設定可能で

ある。機能的電気刺激の出力波形の一例を図 9 に示す。



図8 表面電極 FES 刺激装置

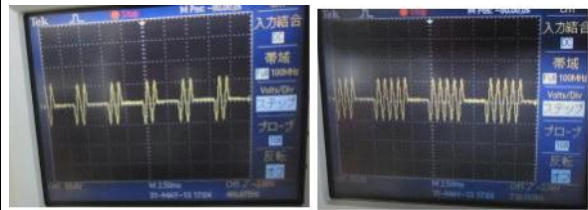


図9 機能的電気刺激の出力波形

4. 研究成果

4. 1 座圧・足圧の測定

座圧と足圧の装置を組み合わせた実験装置を構築し、計測を行った。まず、座圧を計測するために、ニッタ株式会社製の BIG-MAT(厚さ: 0.1mm, センサー部サイズ: 440mm × 480mm)を使用した。センサシートは、1枚のフィルムに4層からなる感圧導電性インクを印刷しているシートで、内側の各1枚ずつに行方向の印刷、列方向の印刷がされている。行と列の交わっている部分が感圧部分であり、この感圧部分に圧力が加わると、圧力の量に応じて、この感圧導電性インクの抵抗値が変化する。この抵抗値の変化はセンサコネクタに伝えられ、ソフトウェア上に圧力の分布として表示される。F-SCAN はセンサシートが足の形をしており、被験者の足のサイズに合わせるために切断できる以外は、BIG-MAT と同様の計測原理である。

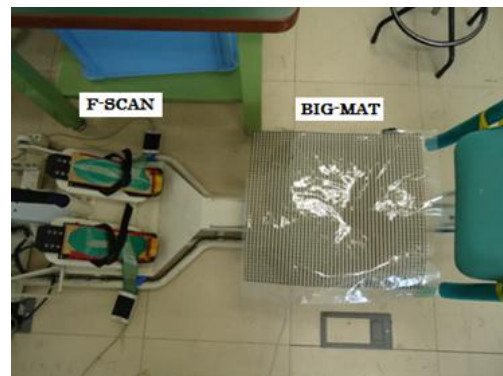


図10 座圧・足圧計測装置(BIG-MAT, F-SCAN)を取り付けたローイングマシン

実験はローイングマシンの「ハンドルの有無におけるローイング運動」と「ストローク速度変化におけるローイング運動」の実験をおこない座圧と足圧の影響を検討した。

・ハンドルの有無におけるローイング運動

ローイング運動は前述した図5における①～①'の過程を1ストロークとし、これを1分間に繰り返し行う回数で速度を表す。これをストローク速度と言い、単位を[st/min]で表す。そしてこのストローク速度を20st/minに固定し、ハンドルを握ってチェーンを引きながら足を伸ばし、また元に戻るといふ正しいローイング運動(以下、ハンドル有り)と表記する)のやり方で行うパターンと、ハンドルは握らず、足の動作だけのローイング運動(以下、ハンドル無し)と表記する)を行う2パターンで座圧と足圧、心拍数の計測を行なった。被験者の人数はいずれも健康な成人男性が7名、ローイング運動時間は5分間とする。図11にハンドル有りとハンドル無しの2パターンのローイングマシン使用図(左がハンドル無し、右がハンドル有り)を示す。



図11 ハンドル無しと、ハンドル有りのローイング運動時の姿勢

・ストローク速度変化におけるローイング運動

ローイング運動のストローク速度を10st/min, 30st/minにした時の2パターンで計測を行う。計測するのは座圧と足圧のみ。被験者は前述の実験と同様の健康な成人男性が7名、ローイング運動時間は1分間とする。

4.2 座圧測定の結果

座面の圧力分布の測定結果は、代表1名の圧力分布を図12に示す。図12は、色の寒暖の変化で圧力分布が示されている。色が暖色になるほど圧力が高く、寒色になるほど圧力は低くなっている。灰色で塗られている部分が上半身の重心位置の軌跡である。図では右方向が被験者にとっての前、左が後ろ、上が左、下が右方向となっている。この圧力分布から上半身の重心の位置を求め、その重心の軌跡を図に示した。左上が、ストローク速度10st/min, 右上がストローク速度30st/min, 左下がストローク速度20st/min, 右下がストローク速度20st/minのハンドルを使用しなかった場合(ハンドル無し)を表す。

上半身の重心位置の軌跡をみると、各測定結果全てにおいて、左右方向には大きく振れていないことが分かる。また、ストローク速度が早くなるにつれて、前後方向への振れが大きくなっていることが分かる。

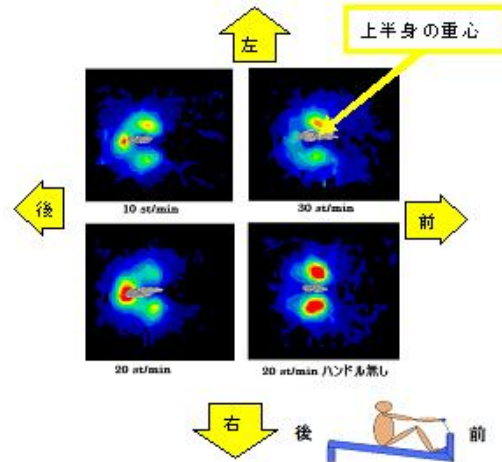


図12 測定した圧力分布の各結果

4.3 足圧測定の結果

足裏の圧力分布の測定結果は、図13に代表1名を示す。上を正面方向、下を後ろ方向とし、右が右足、左が左足となる。座面の圧力分布と同様に、圧力の大きさを色の寒暖色の变化で圧力分布は表されている。灰色で塗られている部分が足圧の圧力中心位置の軌跡である。また、全ての圧力分布は1分間のローイング運動における結果である。

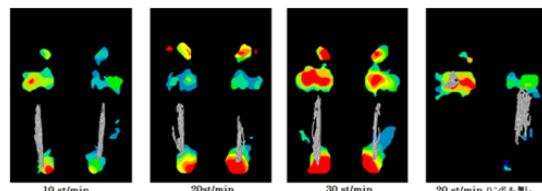


図13 足裏の圧力分布の測定結果

ストローク速度変化における圧力中心位置の軌跡の変化は見られない。どのストローク速度でも、踵を起点に圧力中心位置が前後に動いており、つま先までは及んでいない。また、ストローク速度20st/minでハンドル無しでは、圧力中心位置の軌跡が左右で大きく違っており、どちらもつま先よりの圧力中心位置の軌跡となっている。

4.4 下肢解析モデル

本研究では、ローイング運動時の動作を計測してその運動学的データを用いたモデル計算により解析を行う為、生態運動系である人体のモデリングを行う。今回はリンクモデルを用いて各関節に働く関節間力及び関節モーメントを求める。使用する力学モデルは、図14に示すような2次元の4リンクモデル

(足部, 下腿部, 大腿部, 上部)とする. 単純化の為に以下のような仮定を設ける.

- ①各リンクは剛体リンクで表せる.
- ②各関節は1軸の回転関節とする.
- ③各リンクの重心は関節間軸上に位置する.
- ④上部は適当な集中した質量として扱える.

重力や加速度を考慮して各関節に作用する水平方向の力と鉛直方向の力とモーメントの釣り合いから動学的に足関節, 膝関節, 股関節の関節モーメントを求める.

筋骨格モデルでは下肢の関節を駆動する筋として運動に支配的な9つの筋だけに着目した図15に示すモデルを用いた. 9つの筋は①大腿直筋, ②大殿筋, ③ハムストリング, ④広筋, ⑤大腿二頭筋短頭, ⑥腓腹筋, ⑦ヒラメ筋, ⑧前脛骨筋, ⑨腸腰筋である.

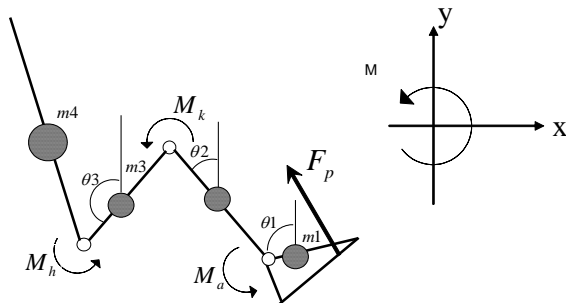


図14 下肢リンクモデル

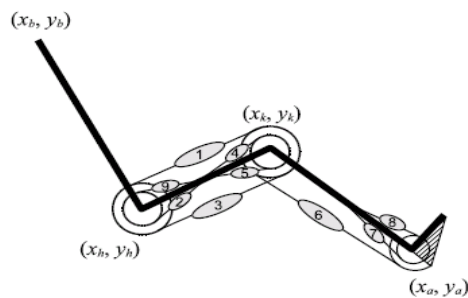


図15 筋骨格モデル

4.5 三次元動作解析測定システム

実験評価のため被験者の動作測定は計測システムを図16に示すように, 足部とハンドル部に荷重を計測する力センサーを取り付けたローイングマシンと, 標点の空間座標を計測する動作測定装置(Vicon140 OXFORD METRICS Limited)を組み合わせたシステムを利用した. 空間座標の測定精度は±1.5mm以内でCCDカメラの画像より標点の空間座標を追跡する画像処理装置を用いた. 10m×8mのフロアーに4台の赤外線カメラを設置し, 人体にどのような負荷がかかるのかを検証した. 反射マーカは頭頂点と左右の肩峰点, 上腕骨外側上顆, 橈骨茎状突起, 大転子点, 膝外側点, 外踝点, 第5中足骨頭点に合計15カ所貼り付けた(図17).

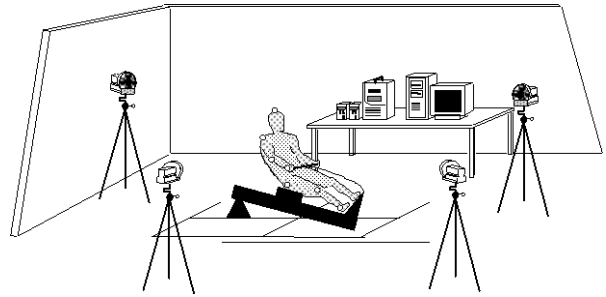


図16 計測システム

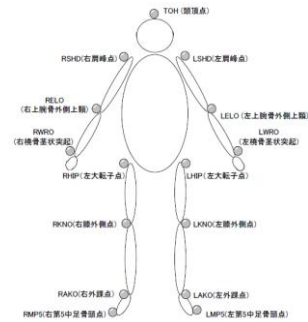
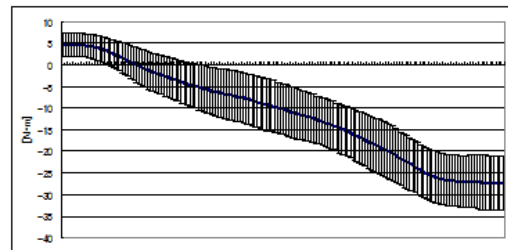
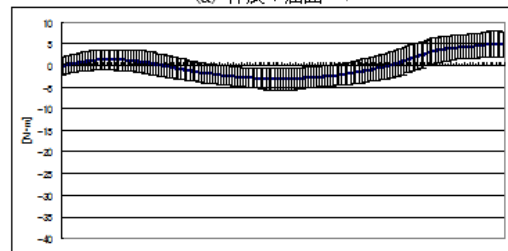


図17 マーカー貼り付け箇所

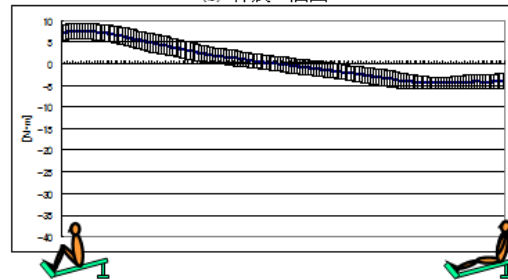
図18は健康者によるFES使用でローイング時の股関節, 膝関節, 足関節の関節モーメントの結果であり, それぞれ太線は平均値, 細線は標準偏差である.



(a) 伸展+屈曲- ψ



(b) 伸展+屈曲- ψ



(c) 底屈+背屈- ψ

図18 関節モーメント(FES使用時)
(a) 股関節, (b) 膝関節, (c) 足関節

図 19 は健常者による下肢のみのローイングマシンによる下肢伸屈運動時の図 15 に示す下肢筋の筋張力を示す。図中 (a) 大腿直筋, (b) 大殿筋, (c) ハムストリングの結果で, 太線は平均値, 細線は標準偏差である。

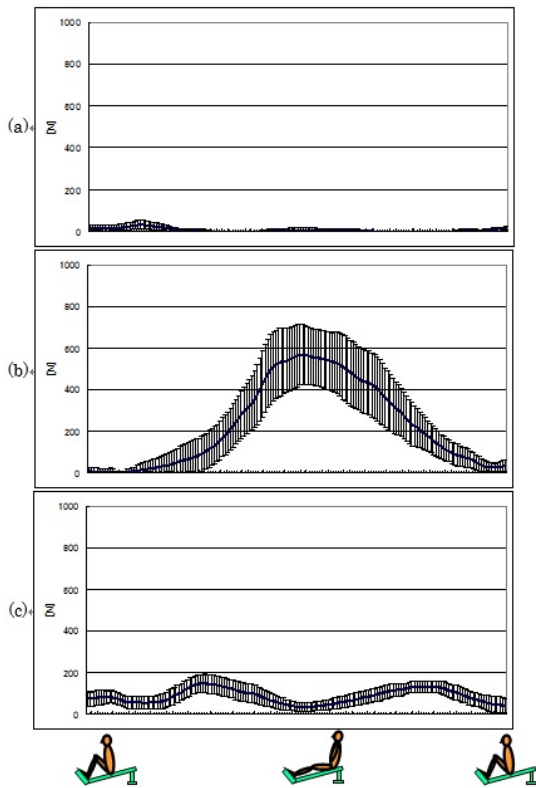


図 19 筋張力 (a) 大腿直筋, (b) 大殿筋, (c) ハムストリング

本研究開発では, 車いす利用者が容易に利用できる機能的電気刺激とローイングタイプの運動補助器具を組み合わせた, ハイブリッドタイプのリハビリ機器を開発しパワーリハビリシステム利用時の人間動作の測定とバイオメカニクス的評価手法を提案した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 (計 4 件)

- ① 渡辺勇真, 宮脇和人, 座圧・足圧に着目したローイングマシンの評価, 秋田工業高等専門学校研究紀要, 48 巻, 査読なし, 2013, 1-7
- ② 巖見武裕, 平元和彦, 宮脇和人, 島田洋二, 松永俊樹, 筋電データを考慮した筋張力推定と身体負荷の評価, 運動・物理療法, 査読なし, 22(1), 2012, 24-32
- ③ 小西恭平, 宮脇和人, 木澤悟, 三軸加速度センサーを用いた人間動作の測定, 秋田工業高等専門学校研究紀要, 46 巻, 査読なし, 2011, 31-37
- ④ T. Iwami, K. Miyawaki, K. Hiramoto, M. Takeshima, T. Matsunaga, Y. Shimada and G. Obinata, Biomechanical Analysis and

Muscle Tension Estimation of the Lower Extremities using EMG Data, IEEE International Symposium, MHS2010, 査読あり, 2010, 175-180

〔学会発表〕 (計 6 件)

- ① 渡辺勇真, 宮脇和人, 佐藤淳, 巖見武裕, 島田洋一, 座圧・足圧に着目したローイングマシンの開発と評価, 日本機械学会技術と社会部門講演会, 秋田市, 2012
- ② 坂本良作, 宮脇和人, 木澤悟, 佐藤敏美, ジャイロ・加速度センサーを利用した腕動作支援装置の評価, 日本機械学会技術と社会部門講演会, 秋田市, 2012
- ③ 渡辺勇真, 宮脇和人, 巖見武裕, 島田洋二, リハビリテーション機器の評価に関する研究, 日本機械学会 東北支部第 47 期秋季講演会, 米沢市, 2011
- ④ 渡辺勇真, 宮脇和人, 座圧, 足圧に着目したローイングマシンの評価に関する研究, 東北地区高等専門学校専攻科研究交流会, 仙台市, 2011
- ⑤ 巖見武裕, 平元和彦, 宮脇和人, 島田洋二, 松永俊樹, 筋電データを考慮した筋張力推定と身体負荷の評価, 第 22 回日本運動器リハビリテーション学会, 仙台市, 2010
- ⑥ 渡辺勇真, 宮脇和人, 北崎光晃, 眼球計測装置を用いたリハビリ機器の評価, 平成 21 年度高専連携研究プロジェクト成果発表会, 豊橋市, 2010

〔図書〕 (計 1 件)

- ① 宮脇和人 他, コロナ社 ISBN978-4-339-02458-6, シミュレーション辞典 「ローイング動作を用いたリハビリテーション」, 2011, 414

〔産業財産権〕

なし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮脇 和人 (MIYAWAKI KAZUTO)

秋田工業高等専門学校・機械工学科・教授
研究者番号: 00390906

(2) 研究分担者

巖見 武裕 (IWAMI TAKEHIRO)

秋田大学・大学院工学資源学研究所・准教授

研究者番号: 10259806

小笠原 雄二 (OGASAWARA YUJI)

秋田県産業技術センター 部長

研究者番号: 20390908

島田 洋一 (SHIMADA YOICHI)

秋田大学・大学院医学系研究科・教授

研究者番号: 90162685