

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26350616

研究課題名(和文) 能動免荷・筋力補助と多種刺激を併用した促通機能付き麻痺上肢複合運動訓練装置の開発

研究課題名(英文) Development of Facilitated Functional Recovery Training Device for Hemiplegic Upper Limb Complex Motion with Active Arm Weight-Bearing, Forearms Rotation Muscle Assisting and Multiple Stimulus

研究代表者

余 永 (Yu, Yong)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号：20284903

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)：手前・前方・顔の手誘導目標を設定した片麻痺肩・肘・腕の複合運動機能回復訓練方法と装置を提案した。訓練補助用の電気刺激と振動刺激を加え、まず上肢自重能動免荷装置について、提案の機構で何処でも自重免荷を実現し、筋電位測定により効果を確認した。次に前腕自動運動誘発・補助装置について、提案の急加速回転手法から伸張反射を誘発し、高感度な力覚センシングから回転筋力補助を実現し、筋電位測定により各機能を確認した。また手指位置推定機構について、複数のエンコーダから実現し、訓練の評価と顔目標の設定を可能にし、LEDやディスプレイ、音と共に運動目標誘導機能を実現した。実証実験で上肢の複合運動訓練の実現を確認した。

研究成果の概要(英文)：This research proposes a functional recovery training device for hemiplegic shoulders, elbows and forearms complex motion. The functions necessary for the hemiplegic upper limb rehabilitation in the device are devised for active arm weight-bearing, forearm pronation/supination stretch reflex inducing, forearms rotation muscle assisting and multiple stimulus on sudden acceleration, shrinkable electricity, functional vibration, visual and hearing. The complex motions in training are guided by setting 3 exercise position targets of the lower, front and face. The proposed active arm weight-bearing device can do its work at any arm position and orientation. The forearm pronation/supination stretch reflex can be induced by the sudden acceleration of device. Furthermore, this training device estimate the position of forearms by using encoders and for evaluating the training results. Some verification experiments were performed to show the effectiveness of the proposed rehabilitation system.

研究分野：知能ロボティクス

キーワード：理学療法学 知能ロボット 感覚行動システム センシングデバイス・システム ヒューマンインターフェース 易収縮的筋電気刺激 機能的筋振動刺激 興奮収縮関連

1. 研究開始当初の背景

現在、脳の可塑性を利用したリハビリテーションが行われている。これは訓練を何回も繰り返すことにより新しい神経の再建・強化を行うが、片麻痺患者のリハビリには患者一人につき医師・療法士がつくことが多いため、医師・療法士の時間的・肉体的負担が大きい。そのためリハビリテーション装置が開発されている。片麻痺上肢を上げようとしても共同運動により目標としている動作ができなくなる。そこで片麻痺患者のリハビリテーションでは、共同運動を分離してから、諸種の別々の動作を一つにまとめた随意複合運動（協調運動）の訓練をする必要がある。

2. 研究の目的

片麻痺肩・肘・腕を能動自重免荷と回転アシストかつ促進的電気・振動刺激を加え、手前・前方・顔の誘導目標をもつ片麻痺上肢複合運動機能回復訓練装置開発を目的とする。

3. 研究の方法

(1) 片麻痺上肢複合運動機能回復訓練

リハビリテーションとは日常生活を送れるようにするのが目的である。日常生活の中で食事・歯磨き・洗顔などの動作は日常的に行われる。そして、日常動作において上肢は使用頻度が高く、肩・肘・腕の複合運動を頻繁に行う。そこで、片麻痺肩・肘・腕の複合運動機能回復訓練手順をFig. 1のように提案し、手順①から③まで訓練を繰り返す。

- ① 机の手前に手を置く。
- ② 机の奥に置いた棒の上端に手を置く。
- ③ 前腕を回転させ、手のひらを顔に接触させる。

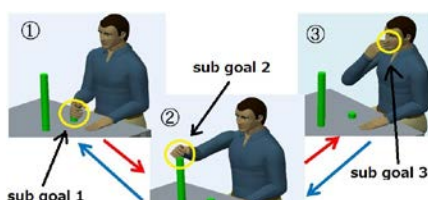


Fig.1 Flow of the recovery training

(2) 装置への要求仕様

分離運動ができる片麻痺患者の上肢挙上能力の回復が十分でない状態で訓練を行うと、上肢自重を受ける肩に負担がかかり十分な量と質の訓練が行えなくなるので、上肢の自重能動免荷をする装置が必要になる。また、最終目標「手のひらを顔に接触させる」に対し、片麻痺前腕の筋力も低下している場合、最終目標が達成できない可能性があるため、前腕の回転筋力を誘発・補助する装置も必要である。装置に対する要求仕様を示す。

1. 上肢自重能動免荷が行える。
2. 前腕の回転筋力の誘発、補助ができる。
3. 前腕の姿勢に適応することが出来る。
4. リハビリと同時に評価もできる。
5. 安全にリハビリが行える。

4. 研究成果

(1) 上肢自重能動免荷装置

免荷ユニットはワイヤの巻き取り・送り出しをして重さを能動免荷できる。重さ免荷を行うには、ワイヤにかかる張力からワイヤの巻き取り・送り出し速度を生成する。ワイヤにかかる張力は免荷ユニットに設けた力覚センサによって測定して、ワイヤの現在位置の巻き取り・送り出し速度を算出して、能動免荷を行う (Fig.2)。

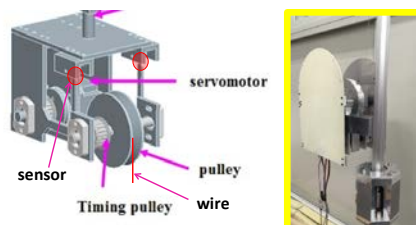


Fig.2 Weight-bearing unit

免荷ユニットを利用して、Fig.3 (a) のように複数のプーリと閉じたワイヤを用いて、垂直方向にのみ上肢が上下移動・免荷できる上肢自重免荷ユニットを考案した。そこでは免荷ユニットのワイヤの巻き取り・送り出しを前腕まで伝え、上肢自重免荷を行う。

(2) 水平方向の上肢自重能動免荷機能

要求仕様より回復訓練では上下方向以外に水平方向の免荷が必要になってくる。そこで2つの構造を利用して水平方向の追従を行うようにする。1つ目は縦円柱の垂直軸回転である。2つ目は縦円柱に直交に固定した水平スライダを用いて水平運動である。Fig.3 (b) のように前腕と関連してスライダがついており、前腕の水平移動に追従してスライダが水平移動するようになっている。

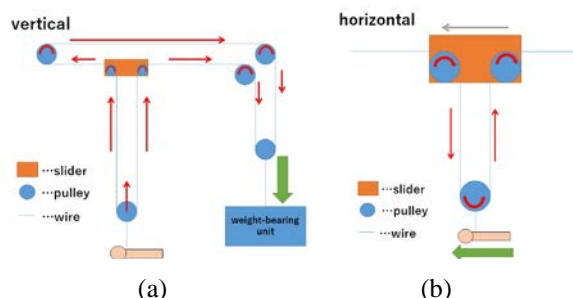


Fig.3 Principle of arm weight-bearing unit

(3) 前腕回転筋力誘発・補助装置

① 装置の機構

前腕回転筋力誘発・補助装置には回転3自由度がついており、前腕の任意姿勢に適応できるようにしている。前腕の固定方法は、Fig.4の右図のように固定する。左右についているローレットナットを回転させることによりねじを前後方向に送り出すようになっている。さらに、そのねじに対して平行にねじを1本追加することにより、前腕固定板が回転しないようになっている。前腕の回転方

法については、装置の下部に固定してあるモータを回転させて、前腕固定部に回転を伝達する。なお、複数のベアリングを用いることにより前腕固定部のみ回転するようになっている。

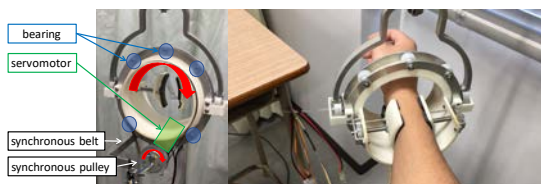


Fig.4 Forearms rotation muscle assisting unit

② 前腕自動回転誘発機能

本装置では前腕の回転が行われるために、伸張反射を用いて自動回転を誘発させることにより回復訓練の効果を高める。伸張反射を用いることで麻痺肢を自動的に動かすことができる。回内自動運動を誘発する際は、途中で急速に他動的に回外方向へ回転させることで回内への伸張反射を引き起こす。回外自動運動を誘発する際は、途中で急速に他動的に回内方向へ回転させることで回外への伸張反射を引き起こす。モータを制御することでこのような動作を実現させる。

③ 前腕回転筋力補助機能

前腕回転筋力の補助は抵抗付随型協動制御を行う。抵抗付随型協動制御とは前腕回転の力を検出し、装置の駆動部がその力に対してある一定のインピーダンス特性を持つようにして、他動で生成した筋緊張を維持するために前腕回転に少し抵抗を与え続けて自動運動を補助するように、前腕回転時における力情報から目標速度を生成する制御である。ここでは、システムの仮想慣性モーメント、仮想粘性係数と仮想弾性係数のパラメータを調整することでインピーダンス特性を変化できる。本システムで用いる仮想コンプライアンス制御の基礎式を示す。

$$w_{n+1} = w_n + \Delta w_n$$

$$\Delta w_n = (\tau_n - Cw_n - K\theta_n) \Delta t / I$$

これは、連続時間 t を離散時間 n に変換したもので、 $n = t/\Delta t$ となる。さらに、 w_n は時刻 n の時の前腕回転角速度、 Δt はサンプリングタイム、 I は仮想慣性モーメント、 C は仮想粘性係数、 K は仮想弾性係数、 τ_n は時刻 n の時の前腕回転トルクとなる。これらの式より、回転トルク τ_n に対して、任意の仮想係数を満足する目標角速度 w_{n+1} を決定することができる。

④ 高感度な力覚センサ

抵抗付随型協動制御を行うために麻痺前腕回転の微小な力を検知するために、歪拡大メカニズムを用いた力覚センサを考案した。センサ上部に回転と上下方向への遊びを持たせたセンサ弾性体のくびれ部をして、右図の矢印の方向に力を加えるとくびれ部が変形する。そして、前腕の微小な回転力をくびれ部により拡大して測定できる (Fig.5)。

以上にして片麻痺肩・肘・腕の複合運動機能回復訓練装置の提案・製作を行った (Fig.6)。

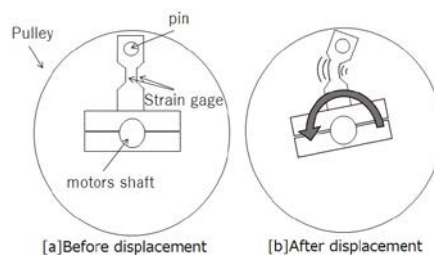


Fig.5 Sensor unit



Fig.6 Functional recovery training device for hemiplegia arm complex motion

(4) 手指位置推定機能

片麻痺肩・肘・腕の複合運動の訓練を行う際、手指位置が訓練の目標位置へ移動したか判定すること、また肩・肘・腕の各部位の麻痺の程度の確認や回復訓練を評価するために手指位置推定機能が必要である。そこで、手指位置推定機能の提案を行う。手指の位置の推定を行うためには位置センサを取り付ける必要がある。ここで、訓練では提案した装置に前腕を固定しており手指と前腕の装置の位置は一定であるので、本研究では前腕装置の位置を推定し手指位置の推定を行う。前腕の運動情報は四つあり、それらのパラメータを次のように置く (Fig.7)。

- r = 地面に垂直な回転軸との水平距離
- θ = 地面に垂直な回転軸の回転角度
- z = 前腕の上下方向の移動距離
- α = 前腕の回転角度

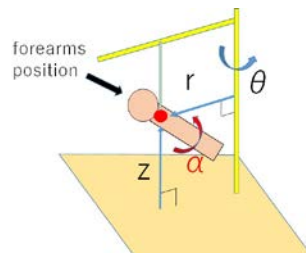


Fig.7 Four parameters of forearm

前腕位置三次元座標の推定は、垂直な移動と回転及び水平移動に分ける。まず、垂直移動の座標 z の推定は、上肢自重電動免荷装置の垂直回転軸に固定している重さ免荷ユニ

ットのモータ制御用のエンコーダを用いて行える。次に、垂直回転と水平移動との座標の推定は、二つのエンコーダを用いることにする。一つ目は、上肢自重免荷装置の垂直回転軸の回転量 θ を測定するために回転軸の上部に取り付ける。二つ目は、上肢自重免荷装置の前腕部についているスライダの移動距離 $r (=R\phi)$ を測定するために上肢自重免荷装置と前腕回転筋力誘発・補助装置を接続しているプーリにエンコーダを取り付ける。Fig.2を見ると、エンコーダで読み取るプーリは上肢が上下移動しても回転せず、上肢が前後方向に移動したときのみ回転するようになっている。ここで、プーリのピッチ円半径を R [mm]、プーリの回転角を ϕ [rad] とする。移動距離 r を測定するためにエンコーダをFig.8のように取り付けた。

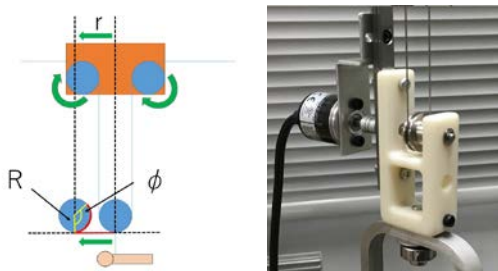


Fig.8 horizontal displacing distance and sensor

提案する訓練の最終目標は「手のひらを顔に接触させる」ことであるため、手のひらが顔に向いているか確認をするために前腕の回転角度 α も測定しなければならない。これは、前述した前腕回転筋力誘発・補助装置のモータのエンコーダを利用して計測できる。

(5) 開発した装置の検証実験

① 手指位置推定機能の検証実験

提案した手指位置推定機能の動作確認を行うにあたって、訓練時の動作である次のような動作を行った (Fig.9)。

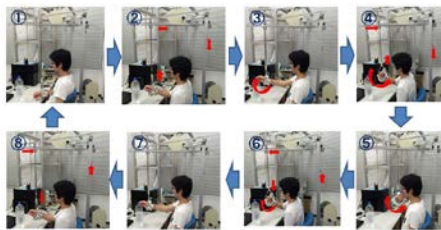


Fig.9 Device motions with forearm

そして、得られたエンコーダから得られたデータより、手指の現在位置の推定を行った。得られたデータをグラフにしたのが次のものである (Fig.10)。また、MATLAB を用いて手指の現在位置を三次元座標にプロットした (Fig.11)。

よって、手指の現在位置推定が行えることが確認できた。そして、現在位置の情報を微分することによって移動速度も推定することも確認できた (Fig.12)。

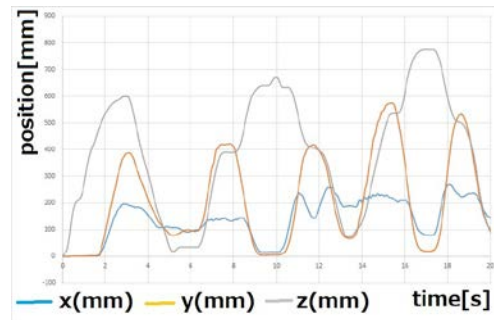


Fig.10 Sensed position of forearm

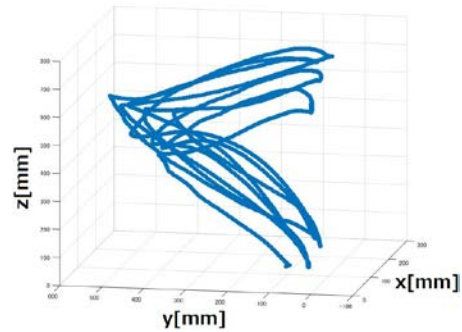


Fig.11 Sensed forearm position in 3D coordinate

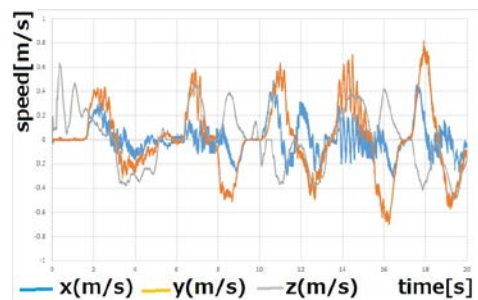


Fig.12 Sensed speed of forearm

次に、得られエンコーダのデータより動作時の前腕の回転角度 α を推定できた (Fig.13)。

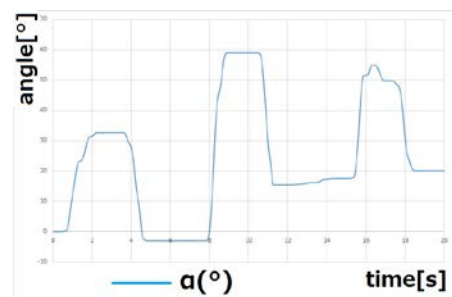


Fig.13 Rotation angle of forearm

② 前腕回転筋伸張反射の確認実験

装置を用いて、一定他動回転速度から急加速して、前腕回転筋に伸張反射を引き起こしているか確認した。伸張反射の確認実験を行うにあたって、右手の回外運動を行う。そして筋電位測定のために、前腕回外筋に電極を貼付した。筋電位計はEMG マスターを使用し

た。実験方法を以下に示す。

・前腕回転筋力誘発・補助装置により前腕を急加速せずに一定の速度で回内方向へ回転させる。

・回転途中で回内方向へ急加速的に回転させ伸張反射を誘発し、その後回外筋力の補助を行う。

測定結果を Fig.14 に結果を示す。縦軸が測定した筋電位であり、横軸が時間である。青で示すのが急加速なしの際の筋電位であり、赤で示すのが急加速ありの際の筋電位である。グラフを見ると、それぞれ筋電位が高くなっているところがある。それが、他動的に急加速を行った後の回外筋の筋電位である。よって、急加速なしに比べ急加速ありの方がより筋電位が高いことから、伸張反射が誘発されていることが確認できた。

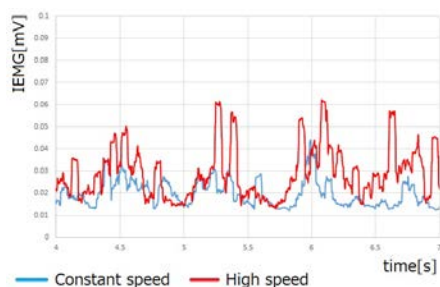


Fig.14 Confirmation of stretch reflex

③ 回転筋力能動補助の確認実験

装置を用いた際に前腕回転筋力の補助が行えているか確認を行う。実験を行うにあたって、右手の回外運動を行う。実験方法を以下に示す。

・前腕回転筋力誘発・補助装置を使用せず、筋力補助なしで自らの力で回内方向へ回転させ、その後、回外方向へ回転させる。

・前腕回転筋力誘発・補助装置を使用するが、急加速せずに一定の速度で回内方向へ回転させ、その後、回外筋力の補助を行う。

測定結果を Fig.15 に結果を示す。縦軸が測定した筋電位であり、横軸が時間である。青で示すのが装置を使用しない場合の筋電位であり、赤で示すのが装置を使用するが急加速をしない場合の筋電位である。装置なしの場合の方が筋電位が高いことから装置を用いることにより前腕回転筋力の補助が行えていたことが確認できた。

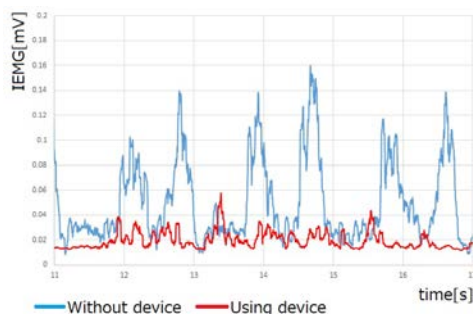


Fig.15 Confirmation of rotation muscle assisting

(6) まとめ

本研究では、片麻痺肩・肘・腕の複合運動機能回復訓練をするための手前・前方・顔の誘導目標訓練法の提案を行い、訓練に必要な上肢自重能動免荷装置と前腕回転筋力誘発・補助装置の製作を行った。上肢自重能動免荷装置の機構については、どの位置に移動しても自重免荷を行う機能を実現できた。前腕回転筋力誘発・補助装置は、急加速を用いて伸張反射を誘発し、高感度な力覚センシングから筋力補助を行うことで前腕の回復訓練を行うことが確認できた。そして、装置に取り付けたエンコーダを用いて手指位置推定機能を装着し、訓練の評価を可能にした。検証実験を行い有効性を確認できた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 5件)

①余永、兒玉瑞希、松脇広和、松元秀次、谷口康太郎、山中弘子、福田勇、下堂蘭恵、川平和美、促通反復療法に基づく片麻痺膝関節屈曲機能回復訓練装置の開発、日本ロボット学会誌、査読有、Vol.35, No.3, 2017, pp.239-248

②余永、森本隆志、川平和美、下堂蘭恵、上肢自重能動免荷と前腕回転筋力補助を有する片麻痺肩・肘・前腕の複合機能回復訓練装置の研究、第22回ロボティクスシンポジウム論文集、査読有、2017, pp.7-8

③Koutaro Taniguchi, Yong Yu, Tomokazu Noma, Hiroko Yamanaka, Isamu Fukuda, Shuji Matsumoto, Megumi Shimodozono, Kazumi Kawahira, Clinical Research of Selected DOF Constrainable Mechanism with Shrinkable Electrical and Vibratory Stimulations Timing and Duration Control System for Hemiplegic Upper Limb Rehabilitation, Proc. of 2016 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 査読有, 2016, pp. 45-50

④ Yong Yu, Yosuke Nakanishi, Kazumi Kawahira, Megumi Shimodozono, Ryota Hayashi, Production of Effective Stretch Reflex by a Pronation and Supination Function Recovery Training Device for Hemiplegic Forearms, Proc. of 2015 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, 査読有, 2015, pp. 150-157, < T. J. Tarn Best Paper in Robotics Finalist 受賞 >

⑤ Koutaro Taniguchi, Yong Yu, Tomokazu Noma, Ryota Hayashi, Shuji Matsumoto, Megumi Shimodozono, Kazumi Kawahira, Research of Rehabilitation Aid System by DOF Constraintable Mechanism and NMES for Hemiplegic Upper Limbs, Proc. of 2015 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, 査読有, 2015, pp.139-144

〔学会発表〕(計 8件)

①余永, 森本隆志, 川平和美, 下堂藺恵, 片麻痺肩・肘・前腕の複合機能回復訓練装置における運動情報システムの確立, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2016年12月15日, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)

②余永, 松脇広和, 山中弘子, 福田勇, 川平和美, 下堂藺恵, 多種促進刺激付き前腕回内・回外訓練装置の片麻痺陳旧例に対する長期訓練効果, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2016年12月15日, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市)

③余永, 城寿成, 川平和美, 下堂藺恵, 促進機能付き簡易型片麻痺指運動機能回復訓練装置の研究, 第17回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2016年12月15日, 札幌コンベンションセンター(北海道札幌市) <SI2017 優秀講演賞>

④余永, 兒玉瑞希, 松脇広和, 松元秀次, 谷口康太郎, 鮫島淳一, 林良太, 下堂藺恵, 川平和美, 促進反復療法に基づく片麻痺膝屈曲・足背屈機能回復訓練装置の研究, 第16回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2015年12月14日, 名古屋国際会議場(愛知県名古屋市)

⑤余永, 松脇広和, 下堂藺恵, 林良太, 川平和美, 片麻痺運動機能回復訓練に振動刺激の脳神経再建効果検証を目的としたfMRI対応エアタービン式振動装置の開発, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 2015年9月3日, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都足立区)

⑥余永, 森本隆志, 川平和美, 下堂藺恵, 林良太, 上肢自重免荷機能と前腕回転筋力補助機能を有する片麻痺上肢複合運動機能回復訓練装置の研究, 第33回日本ロボット学会学術講演会, 2015年9月3日, 東京電機大学東京千住キャンパス(東京都足立区)

⑦余永, 藤川貴広, 下堂藺恵, 川平和美, 林良太, 片麻痺患者の非麻痺側に関する立脚能力の評価・訓練装置の研究, 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2014年12月15日, 東京ビッグサイト(東京都江東区)

⑧余永, 富山大輔, 下堂藺恵, 大恵克俊, 林良太, 川平和美, 片麻痺指への促進反復療法における効果的伸張反射を促す易収縮的電気刺激と特性解析, 第15回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2014年12月15日, 東京ビッグサイト(東京都江東区)

〔産業財産権〕

○出願状況(計 4件)

①名称: 麻痺機能回復訓練装置及び麻痺機能回復訓練方法
発明者: 余永, 富山 大輔, 川平和美, 下堂藺恵
権利者: 国立大学法人鹿児島大学

種類: 特許

番号: 特願 2015-238370

出願年月日: 27年12月7日

国内外の別: 国内

②名称: 振動装置

発明者: 余永, 松脇 広和, 下堂藺恵, 川平和美

権利者: 国立大学法人鹿児島大学

種類: 特許

番号: 特願 2015- 170444

出願年月日: 27年8月31日

国内外の別: 国内

③名称: 片麻痺運動機能回復訓練装置およびプログラム

発明者: 余永, 兒玉瑞希, 松元秀次, 下堂藺恵, 川平和美

権利者: 国立大学法人鹿児島大学

種類: 特許

番号: 特願 2015- 132802

出願年月日: 27年7月1日

国内外の別: 国内

④名称: 無水平負荷式上肢自重免荷訓練装置

発明者: 余永, 川平和美, 森本隆志

権利者: 国立大学法人鹿児島大学

種類: 特許

番号: 特願 2014- 232842

出願年月日: 26年11月17日

国内外の別: 国内

○取得状況(計 1件)

①名称: 片麻痺運動機能回復訓練装置を用いた訓練効果評価方法、および訓練効果評価演算装置、ならびにプログラム

発明者: 余永, 川平和美, 前田克也, 仲西洋介, 下堂藺恵

権利者: 国立大学法人鹿児島大学

種類: 特許

番号: 特許第 6061300 号

取得年月日: 28年12月22日登録

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1) 研究代表者

余 永 (YU, Yong)

鹿児島大学・理工学域工学系・教授

研究者番号: 20284903

(2) 研究分担者

川平 和美 (KAWAHIRA, Kazumi)

鹿児島大学・歯学総合研究科・客員研究員

研究者番号: 20117493

下堂藺 恵 (SHIMODOZONO, Megumi)

鹿児島大学・歯学域医学系・教授

研究者番号: 30325782

林 良太 (HAYASHI, Ryota)

岡山理科大学・工学部・教授

研究者番号: 40288949

衛藤 誠二 (EITO, Seiji)

鹿児島大学・歯学域医学系・講師

研究者番号: 70295244