

機関番号：32689

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21760208

研究課題名(和文) 麻痺側足底圧を対側にバイパス呈示する知覚支援RTの脳神経学的評価

研究課題名(英文) Neurological Assessment of Biofeedback Efficacy of PARTY that Enhances Perception of Paralytic-side Foot Contact States

研究代表者

岩田 浩康 (IWATA HIROYASU)

早稲田大学・高等研究所・准教授

研究者番号：30339692

研究成果の概要(和文)：

本研究課題では、まず、知覚支援 RT による麻痺側体性感覚(接地状態)への注意力向上効果を検証したところ、足圧遷移や接地・離地の改善だけでなく、病巣脳感覚野の足支配部が有意に賦活化したことから、提案する知覚支援 RT が麻痺側への注意の向けやすさを高める効果があることが示唆された。加えて、知覚支援 RT を用いて片麻痺者の病巣脳の賦活化を促進するべく、麻痺側足底圧を対側肢体にバイパス刺激する際の最適呈示部位として、脳梁交連性と両側神経支配の両性質を有する額を選出した。心理物理試験および fNIRS での血流計測によりバイパス刺激への注意の向けやすさを部位間比較し、その有用性を確認した。

研究成果の概要(英文)：

We propose a new locomotion rehabilitation RT device, PARTY(Perception Assisting Robotics TechnologY) that enables the paralyzed to get a perception-bypassed communication root via a non-paralyzed-part body for recognizing foot contact pressures of the paralyzed-side. This study indicates an optimal body part used for the bypassing from the viewpoint of neuron communication theory, especially focusing on the bilateral innervations and the commissural fiber where communications between both brain sides are reinforced. In addition, a remarkable rehabilitation outcome through validation with Functional Near-infrared Spectroscopy demonstrating reinforced attentiveness to the paralytic-side body was achieved thanks to a leg-PARTY.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
21年度	2,200,000	660,000	2,860,000
22年度	1,300,000	390,000	1,690,000
年度			
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学、知能機械学・機械システム

キーワード：脳卒中、片麻痺、感覚麻痺、知覚支援、ロボットテクノロジー、脳機能イメージング、fNIRS、認知神経リハビリテーション

1. 研究開始当初の背景

脳卒中や脳血栓に起因する片麻痺の真の欠損は脳神経機能不全にあるにもかかわらず、欠損のない健側の筋肉・関節を強化して患側を補う機能代行療法が長年適用されて

いる。一方、真の運動機能回復には、認知と運動を連動形成させる訓練、すなわち適切な感覚入力に注意を向けさせつつ、適切な運動パターンで反復動作させることが極めて重要となる。しかしながら、感覚障害者は表在

覚・深部感覚が鈍麻・脱失しているため、体性感覚情報への十分な集中が難しい。

この問題を解決するため、研究代表者は、バイオフィードバック技術を用いて使用者の身体感覚を覚醒させることで、麻痺患者に可塑性発現の起爆剤となる“気づき”(=身体感覚の変化を察知すること)を誘発する知覚支援RT(Robotics Technology)の開発を思い立つに至った。具体的には、脳卒中片麻痺者に対し、麻痺側の足底圧を非麻痺側肢体に触覚バイオフィードバックし、麻痺側への注意・気づきを喚起することで(Fig.1)、リハビリ効率を飛躍的に向上させる新しい歩行リハビリ支援装置を開発した(Fig.2)。患者の麻痺足が着床した瞬間に接地面圧が患者自身の非麻痺側肢体に情報帰還される触覚バイオフィードバック技術は、接地タイミングや接地偏在など、患者が発症に伴い失った環境からの知覚情報を擬似的に復活させ、目標とする床との接触状態(踵接地など)と現状(内反や外反状態)との違いを(非麻痺側肢体の)肌で感じさせることが可能である。そのため、これまで窺い知れなかった麻痺側の状態を理解した上で、患者自身が自発的に、目標の接地状態となるよう筋出力を調節できるようになると考えられる。

このように、提案する知覚支援RTは、脳神経科学とメカトロニクス技術を融合させた新研究領域を創出する高いポテンシャルを有していることに加え、HALなどの運動支援RTとの併用により、近い将来、画期的な歩行リハビリの“質”的革命を起こすことが期待される。

2. 研究の目的

これまでに、装着部位を限定した知覚支援RTを試作し、臨床適応したところ、片麻痺者特有の麻痺足の内反・尖足接地状態に患者自ら気づきやすくなる効果が認められている。この基盤となる知見をさらに発展させるべく、本研究課題では、片麻痺者への臨床応用を通じて、知覚支援効果により脳の可塑性を促し得る知覚支援RTが、麻痺肢への注意を向上させ、麻痺肢の運動機能の改善に寄与し得ることを理学療法学および脳神経生理学的な観点から実証することを目的とする。

具体的には、知覚支援RTにより麻痺肢への注意の向けやすさを高められることを脳機能イメージング装置で脳神経生理学的に検証することに加え、治療効能の向上には非麻痺側への呈示刺激の意味を認識させやすくすることが有効であるとの考えに基づき、心理物理的な観点から呈示部位(上腕・背中・額など)や刺激方式(押圧・振動・電気刺激など)の最適化を図る。

3. 研究の方法

以下の二つの課題を解決するためのアプ

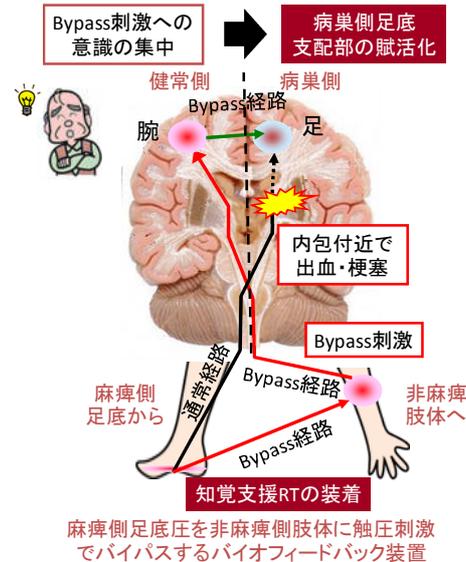


図1 知覚支援RTのバイパス効果による病巣側半球の賦活化



図2 触覚バイオフィードバックに基づく歩行リハビリ用知覚支援RT

ローチ方法に関して下記で詳述する。

(1) 知覚支援RTにより麻痺肢への注意の向けやすさを誘発する効果を脳機能イメージング装置で脳神経生理学的に検証する

(2) 麻痺側の足底圧を非麻痺側の肢体にバイパス呈示する場合、呈示する部位に応じて麻痺側足底圧のイメージのしやすさは異なることから、心理物理的な観点から識別能の高い呈示部位や刺激方式を導出する

(1) バイオフィードバック効能の脳神経生理学的検証

片麻痺者において、非麻痺側肢体に麻痺側足底圧をバイオフィードバックし意識を向けさせる訓練を続けることで、麻痺側制御半球への賦活転移が図られる(Fig.1)ことを脳機能画像で捕捉することを目指す。

従来研究(井口ら)によれば、感覚野は、対応する部位への注意量が大きくなるほど賦活が高まることが報告されている。例えば、示指と中指に同時に刺激を呈示しても、注意を向けている部位の感覚野の領野がより活性化される。このことから、知覚支援RTにより、減弱した麻痺側に注意を向かわせれば感

覚野の賦活化を促進できると考えられる。そこで、知覚支援 RT による麻痺側への注意力向上効果を脳神経学的に検証するため、磁性体下でも使用可能な光トポグラフィ(fNIRS)を用いて評価を行うこととした。

具体的には、麻痺側足底の接地パターン(4種：爪先接地、踵接地、内反接地、外反接地に相当)の刺激を以下の二つの条件下で呈示し、それに対する回答時における病巣脳感覚野の賦活状態を測定する：(A)麻痺側足底のみを刺激(バイオフィードバック Off (BF-Off))；(B)麻痺側足底と非麻痺側肢体(バイオフィードバック On (BF-On))を共に刺激。評価は以下の二つの観点から行う。

☆STEP 1： BF-Off 時の刺激パターン回答時より BF-On 時の刺激パターン回答時の方が病巣脳の感覚野が賦活するか

☆STEP 2： 安静時と比較し、麻痺側足底と非麻痺側肢体(部位は上記試験結果に依拠)に刺激を呈示した BF-On 時の刺激パターン回答時の方が、病巣脳の感覚野が賦活するか(有意水準 95%以上)

知覚支援 RT を用いて麻痺側足底への注意力を高める臨床訓練(足底接地圧の遷移、脚間体重心移動、接地・離地)を3ヶ月間実施した上で、訓練前後における運動機能の変化ならびに、感覚野賦活量の時間経過の計測を行う。対象は、軽度感覚麻痺患者2名とした。

(2) 呈示部位・刺激方式の最適条件の導出

刺激方式や呈示部位に応じた認知のしやすさの違いを評価するため、比較検証を試みる。まず、呈示刺激方式に応じた刺激パターンの識別しやすさに関する比較試験を行う。その上で、選出された呈示刺激方式を用いて、部位間で同様の比較を行うこととする。なお、比較対象部位として、身体を頭部、末端、体幹、四肢に分けた上で、それぞれから脳梁交連性と両側神経支配の両性質を有する「額」、舌先を除き2点弁別閾が最も優れる「指」、脳梁交連性のみを有する「背中」、旧呈示 Unit 装着部位である「前腕」に着目することとした。

心理物理試験に基づき、注意を向けやすい刺激方式(押圧、縦振動、横振動、電気刺激)の選定ならびに、呈示部位(額、指、背中、前前腕)の導出を試みる。評価基準は、4つのピン(ソレノイドによる皮膚法線方向並進駆動)を正形状に並べ、9通りのピン刺激パターンを順不同に呈示した際の正答率(1回20問、5セット)とする(Fig.5)。対象は健常者・片麻痺患者を合わせて10名とした。

まず、部位を前前腕に仮設定した上で、刺激方式に応じて刺激呈示条件(呈示ピンの設置分解能、呈示部接触面積、刺激強度)を替えて試験を行い、正答率が高くなる刺激方式と

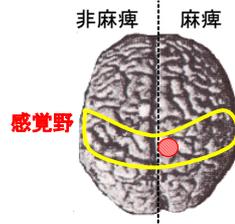


図3 麻痺側感覚野足支配部の脳活動計測



図4 fNIRS 試験風景

条件を導出する。

その上で、当該条件と刺激方式

を用いて、各部位への刺激呈示を行い、正答率が最大となる部位(患者が注意を向けやすい非麻痺側肢体)を導出する。試験に先立ち、額・指先・背中・前前腕部に装着できる呈示 Unit を個別に開発した。

① 呈示刺激方式の選定

(i) 手順概要

以下の手順で選定を進めた。

- (a) 刺激方式を選定するための呈示部位の決定
- (b) 刺激候補の設定
- (c) 刺激方式ごとの条件パラメータの設定
- (d) 刺激方式に応じた刺激の様相の識別しやすさの比較

(a)では、2点弁別閾値に着目することとした。指末節中央掌面 4[mm]、額 22[mm]、前前腕 39[mm]、背中 67[mm]であり、最も平均(33[mm])に近い「前腕」を刺激方式選定用呈示部位に設定した。(b)に関しては、1.5[m/s]の歩行で求められる反応速度 50[m/s]と実装性を踏まえた上で、押圧・縦振動・横振動・電気刺激を選出した。

(c)・(d)の選定に関しては2種類の刺激パターン識別試験を実施し、正答率を用いて比較を行う：(a)10種の刺激をランダムで呈示し回答させる静的刺激テスト；(b)12種の連続した刺激をランダムに呈示し回答させる動的刺激テスト(Fig.5)。

(ii) 刺激方式ごとの条件パラ

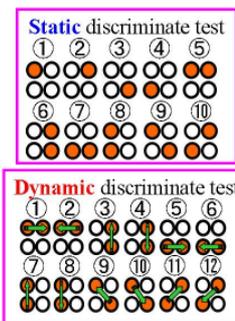


図5 パターン識別試験で用いる刺激パターン (arranged in square)

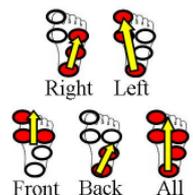


図6 足底接地遷移パターン(arranged in foot-shape)

メータの設定

(c)では、各呈示刺激に共通して選定すべきパラメータと固有のパラメータが存在することから、心理物理的試験を通じて各々を抽出する：

- ◇ 共通パラメータ：呈示ピン間隔、呈示ピン先端直径
- ◇ 固有パラメータ：ストローク、発生応力(押圧)、周波数(押圧以外)

② 部位間比較試験

①の結果を踏まえ、呈示刺激方式を選定した上で、以下の手順に基づき、部位ごとの識別しやすさを比較する。

- (i) 心理物理試験(麻痺患者 3 名(健常側)+健常者 10 名)
 - (i)-a 各呈示部位に対し 5 種類の接地遷移パターンをランダムに 20 問呈示
 - (i)-b 正答率の偏差値で比較
- (ii) 病巣脳賦活量の測定(片麻痺者 1 名)
 - (ii)-a 麻痺足底と各呈示部位に 5 種類の接地遷移パターンを同時に 10 問呈示
 - (ii)-b 脳機能画像検査装置(fNIRS)を用いて麻痺足相当部の病巣脳の安静時とタスク時における賦活変化量を比較

4. 研究成果

(1) バイオフィードバック効能の脳神経

生理学的検証

① 運動機能の改善効果

(i) 麻痺側足圧遷移訓練(座位)

異常歩行により接地が困難となっている足部のポイント(例：内反患者・拇指球)に足圧を移動させる訓練を行い、当該部位の最大圧/全足圧を計測した。その結果、いずれの患者でも知覚支援 RT を装着することで母指球に加重できるようになった(前 30%=>後 55%)。

(ii) 接地・離地訓練(座位)

次に、麻痺側足底を接地・離地させる訓練を 3 ヶ月行った。Fig.7 に 2 名のうち 1 名(内反患者)の最大小指球圧を示す。いずれの患者でも訓練前後で健常歩容に近づく傾向が見られ、内反患者で最大小指球圧が顕著に減少する効果が認められた(前 60%=>後 20%)。

② 脳機能イメージングによる注意向上性検証

まず、知覚支援 RT を用いた訓練を始める前に、脳機能検査装置 fNIRS (functional Near-Infrared Spectroscopy、島津製作所製)を用いて、注意力測定を行った。軽度麻痺患者において、BF-Off 時と比べ、BF-On 時に病巣脳の足感覚野の活性量が増加していた(有意ではないが、STEP1 のクリアを示唆)。これは、Bypass 刺激を入れた方が麻痺側足底への注意力が増加する可能性を示唆する。

次に、知覚支援 RT を用いた訓練を始めてから一ヵ月後に同様の測定を行った(Fig.5)。

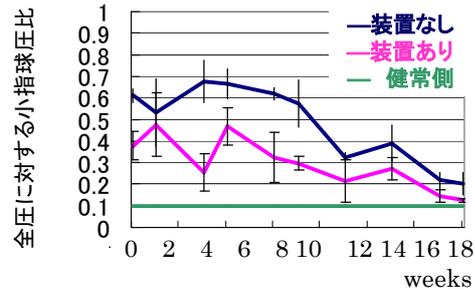


図 7 座位における踵接地訓練における小趾側足圧の変化(3ヶ月間)

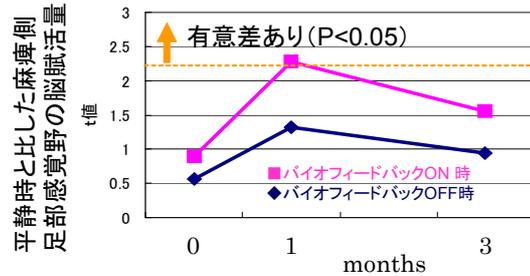


図 8 麻痺側一次感覚野における足支配部の賦活量の t 値(安静時との比較)

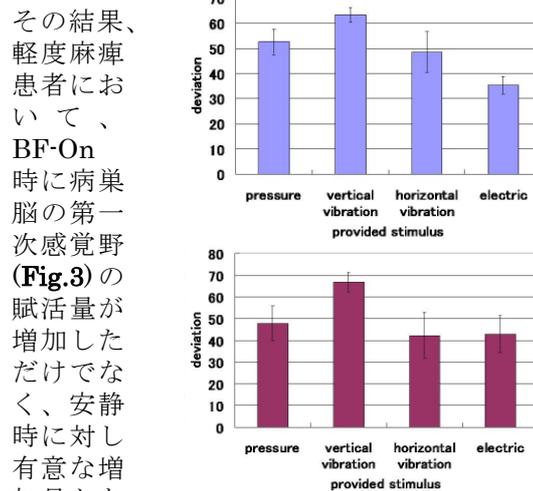


図 9 四つの刺激方式ごとのパターン正答率(偏差値)(上:動的刺激、下:静的刺激)

その結果、軽度麻痺患者において、BF-On 時に病巣脳の第一次感覚野(Fig.3)の賦活量が増加しただけでなく、安静時に対し有意な増加量となり(Fig.8)、訓練一ヵ月後に

STEP2 を達成する結果が得られた。三ヶ月後の低下は、麻痺足に特に注意を向けずに訓練可能となったことによるものと考えられる。このことから、バイオフィードバック刺激を利用した訓練を行うことで、麻痺側足底への注意力が強化されることが示唆された。

(2) 呈示部位・刺激方式の最適条件の導出

① 刺激方式ごとの条件パラメータの設定と比較試験

初めに固有パラメータを選定するために、20代の健常者5名を対象に心理物理試験を行った。押圧に関しては比例制御ソレノイドを用いて発生応力・ストロークを可変にして行った。その結果、正答率は応力 2.8[N/cm²、

ストローク 6.5[mm]の条件下で最大となった。縦振動・横振動の周波数に関しては、刺激テストを1~250[Hz]の周波数で行い正答率を得たところ、1[Hz]近傍では低い一方で、5~250[Hz]まででは有意な差は見られなかった。そこで、5~250[Hz]の範囲で任意に設定することとした(今回はアクチュエータの定格周波数 110 [Hz]を採用)。電気刺激の周波数に関しては、痛点を刺激しづらく圧覚を刺激しやすい 300 [Hz]を採用し、電流量は被験者に合わせて痛みを感じない程度に設定した。

一方、共通パラメータに関しては、前腕の2点弁別閾値 39[mm]を考慮し、Table1 に示す値を設定した。縦振動は連続した押圧刺激と見なせるため、押圧と同じパラメータを用いている。これらの条件のもと総当りで試験を行い、各刺激方式における最適パラメータを導出した。その結果、押圧・横振動では間隔 60[mm]・先端直径 5[mm]、電気刺激では間隔 60[mm]・先端直径 18[mm]において最大正答率が得られた。

最後に上記で導出されたパラメータを用いて、健常者 11 名対象に、刺激の識別しやすさを比較する試験を実施した。その結果、縦振動方式において、静的・動的刺激テストの双方で有意に正答率が高くなることがわかった。この結果に基づき、刺激方式として縦振動を採用することとした(Fig.9)。

② 部位間比較試験

連続的に変化してゆく動的刺激には、足底の接地遷移パターンを用いることとした(Fig.6)。試験の結果、額は正答率(偏差値 58.2)では指とほぼ同等であり、脳賦活変化量では t 値 2.08 で唯一有意となり(95%有意水準 $t=2.02$)、刺激への注意の向けやすさが最も高い部位であることが確認された (Fig.10、 11)。

③ 短期臨床

下肢ブルンストロームⅢ~Ⅳの片麻痺患者 1 名を対象に 1 日 1 時間、5 日間の短期臨床訓練を行った。訓練内容としては開発システムを用いた座位・立位・歩行訓練を行い、麻痺足接地圧遷移の改善を目指した。評価のため、訓練前後の麻痺足接地圧パターン遷移と fNIRS を用いた脳画像機能診断における麻痺足相当部の賦活量(t 検定)を実施した。その結果、訓練前には接地時に拇指球・小指球・踵がつく尖足に近い状態だったが、訓練後には踵のみの接地ができるようになり、接地パターンの改善が確認された(Fig.12(a))。脳賦活量に関しても、訓練前後で t 値が増加しており(安静時と比較)、麻痺側足底部の支配脳の賦活量が増大したことがわかる(Fig.12(b))。以上より、開発した額装着型呈示 Unit が病巣脳の脳賦活量の増加に寄与することが示唆されたといえる。

表 1 各刺激呈示方式の最適条件となるパラメータ設定

	共通パラメータ	固有パラメータ
押圧	間隔(40,50,60mm) 先端5,16mm)	ストローク6.5mm) 発生応力2.8N/cm ²)
縦振動	押圧と同様	周波数(230Hz)
横振動	間隔(40,50,60mm) 先端5,18,30mm)	周波数(230Hz)
電気刺激	間隔(40,50,60mm) 先端5,18,30mm)	周波数(300Hz)

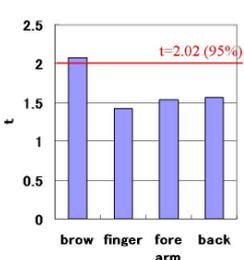
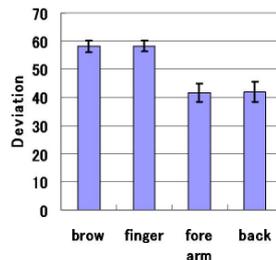
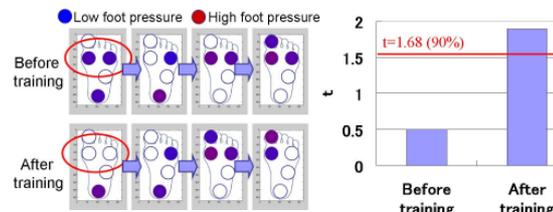


図 10 パターン識別試験 図 11 識別中の部位別正答率 (偏差値) 部位別の脳賦活値の t 値



(a) 足圧の遷移 (b) 脳活動量の t 値
図 12 訓練前後の比較

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 1 件)

- ① 岩田浩康、早稲田の倫理審査から工学系研究者が学んだこと、日本ロボット学会誌、査読無し、vol.29、no.3、pp259-260、2011 年 4 月(掲載決定)

[学会発表] (計 13 件)

- ① 岩田浩康ほか、片麻痺リハにおける誤学習抑制のための誤差覚知 RT の効能検証、第 31 回バイオメカニズム学術講演会、静岡大学(浜松)、2010 年 11 月 7 日
- ② 岩田浩康、BF 型知覚支援 RT を用いた認知神経リハ ～第 1 報：麻痺側足底圧の対側肢体へのバイパス呈示とその効能検証～、第 37 回日本バイオフィードバック学会学術講演会、岩手大学、2010 年 7 月 18 日
- ③ 岩田浩康、— ～第 2 報：BF による麻痺側加重時の不安解消手法～、第 37 回日本バイオフィードバック学会学術講演会、岩手大学、2010 年 7 月 18 日
- ④ 岩田浩康ほか、バイオフィードバックを用いた自己受容感覚リハビリ支援システム～第 2 報：体勢感覚回復訓練における視覚依存回避手法の提案～、日本機械学会ロボティクス・

メカトロニクス講演会講演(Robomec'10)、旭川大雪アリーナ、2010年6月14日

- ⑤ 岩田浩康ほか、— ～第1報：異種運動速度を取り入れた知覚・運動モデル再構築手法～、Robomec'10、旭川大雪アリーナ、2010年6月14日
- ⑥ 岩田浩康ほか、脳卒中片麻痺リハビリにおける両肢角度誤差 BF システムの試作と評価、計測自動制御学会システムインテグレーション部門学術講演会 SI2009 芝浦工業大学(豊洲)、2009年12月24日
- ⑦ 岩田浩康ほか、麻痺手の自己受容感覚を健側へバイパス呈示する知覚支援 RT の手指リハへの応用、SI2009、芝浦工業大学(豊洲)、2009年12月24日
- ⑧ 岩田浩康ほか、片麻痺リハビリにおける両肢角度誤差 BF リハビリ支援システムの試作と評価、日本機械学会福祉工学シンポジウム 2009、高知工科大学、2009年9月26日
- ⑨ 岩田浩康ほか、身体感覚への注意を促す BF 型知覚支援 RT の片麻痺リハ応用、計測自動制御学会 第24回生体・生理工学シンポジウム、東北大学、2009年9月24日
- ⑩ 岩田浩康ほか、体性感覚バイオフィードバックに基づく手指リハビリ支援システム～第2報：運動感覚 BF システムによる麻痺指可動限界向上の検証～、Robomec'09、福岡国際会議場、2009年5月25日
- ⑪ 岩田浩康ほか、触覚バイオフィードバックに基づく歩行リハビリ支援システム～第9報：誤学習抑制のための運動イメージ・知覚誤差 BF システムの試作と評価～、Robomec'09、福岡国際会議場、2009年5月25日
- ⑫ 岩田浩康ほか、— ～第8報：麻痺側加重余裕の BF に基づく筋活動調整手法の提案～、Robomec'09、福岡国際会議場、2009年5月25日

【その他】(計12件)

【ホームページ情報】(計2件)

- ① 早稲田大学 高等研究所
 研究員／岩田浩康
 http://www.waseda.jp/wias/tenure_jp/researches/tnr_h_iwata.html
- ② 早稲田大学 研究者データベース
 教員氏名／岩田浩康
 https://www.wnp7.waseda.jp/Rdb/app/ip/ipi0211.html?lang_kbn=0&kensaku_no=3422

【アウトリーチ活動情報】(計7件)

- ① 講演、岩田浩康、家事・介助を支援する人間共存ロボットのデザイン、「ロボット技術最前線」—家庭生活から産業現場まで—、第286回塑性加工シンポジウム、電気通信大学、日本塑性加工学会、2010

年12月22日

- ② ブース展示、岩田浩康、錯覚体験 あんびりーばぼー！～今日あなたの脳はだまされる～、大学進学フェスタ2010、神奈川新聞社・中萬学院、2010年9月26日
- ③ 講演、岩田浩康、“新しい手”が未来医療を変える！～ロボットテクノロジーの大いなる可能性～、大学進学フェスタ2010、中萬学院・神奈川新聞社、パシフィコ横浜、2010年9月26日
- ④ Lecture、Hiroyasu IWATA、Human Centered Robotics II、Research Seminar in Mechatronics and Robotics in Department, School of Innovation Design, E-JUST(Egypt-Japan University of Science and Technology)、Alexandria (Egypt)、Apr 6th 2010
- ⑤ 講演、岩田浩康、人の役に立つ RT の創り方 ～救命支援から生活援助まで～、第2回【環境と人間】サイエンスフェア、早稲田高等学院 SSH、早稲田大学 早稲田キャンパス 8号館、2010年3月22日
- ⑥ 講演、岩田浩康、人の自立を支援する次世代 RT ～TWENDY-ONEと知覚支援 RT：パルティ～、「ロボット技術～ヒューマンアシスト、ロボットセンサ技術～」、第76回研究開発セミナー(主催：電気通信大学産学官連携センター)、電気通信大学、2009年11月17日
- ⑦ Lecture、Hiroyasu IWATA、Research on Robotics-Assistive Rehabilitation in Waseda University、Workshop on Medical, Welfare and Humanoid Robotics in EU Commission and Waseda University、EU Commission, Brussels (Belgium)、Jun 8th 2009

【新聞・Web 報道情報】(計3件)

- ① インターネット動画ニュース、『ライフイノベーション・介護ロボットの可能性』、科学技術政策ニュースコーナー、JSTサイエンスニュース、JST、2010年10月22日より配信 <http://sc-smn.jst.go.jp/sciencenews/policy.html>
- ② 新聞報道、『大学進学フェスタ2010 in Yokohama 大好評にて閉幕！来場者数4,825名！』、14面(全面記事)、神奈川新聞、2010年10月4日(岩田の講演中の写真が掲載)
- ③ 新聞報道、『将来の進路 熱心に相談 横浜で進学フェスタ』、21面、神奈川新聞、2010年9月27日(岩田の展示ブースが紹介)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岩田 浩康 (IWATA HIROYASU)
早稲田大学・高等研究所・准教授
研究者番号：30339692