

機関番号：17701

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2010

課題番号：20500450

研究課題名(和文)

脳卒中片麻痺上肢の促通療法のための電磁石を用いた伸張反射誘発力覚提示装置の開発  
研究課題名(英文)Development of a Device to Evoke Stretch Reflexes by Use of Electromagnet  
for the Rehabilitation of Hemiplegic Upper Limb

研究代表者

林 良太 (HAYASHI RYOTA)

鹿児島大学・理工学研究科(工学系)・准教授

研究者番号：40288949

研究成果の概要(和文)：脳卒中片麻痺上肢の運動機能回復訓練において、上肢の筋肉が痙縮した際、計測技術を用いてその状態を検出し、電磁石を用いて痙縮した筋肉に安全な力の刺激を加えるシステムを開発した。そして、開発したシステムを適用して、肘の伸展屈曲運動訓練の際に痙縮した筋肉の伸張反射を促し、随意運動による訓練課題の達成を支援できることを確認した。また、電気刺激による筋の収縮を利用して随意運動を支援する方法を併用し、訓練時の患者の負担を軽減することに成功した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we focus on the method of rehabilitation with stretch reflexes for the hemiplegic upper limb in stroke patients. We propose a new device which utilizes electromagnetic force to evoke stretch reflexes. The device can exert an assisting force safely, because the electromagnetic force is noncontact force. We have developed a support system applying the proposed device for the functional recovery training of the hemiplegic upper limb. Furthermore we have added the function of electrical stimulation with threshold level to the support system in order to make voluntary motion of hemiplegic upper limbs. Then we have succeeded in supporting several stroke patients for the trainings.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度			
2007年度			
2008年度	1,200,000	360,000	1,560,000
2009年度	1,700,000	510,000	2,210,000
2010年度	600,000	180,000	780,000
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：リハビリテーション工学

科研費の分科・細目：人間医工学・リハビリテーション医学

キーワード：リハビリテーション、支援システム、促通療法、脳卒中片麻痺、伸張反射、電磁石、力覚提示、電気刺激

## 1. 研究開始当初の背景

脳卒中片麻痺の回復を促進するためには、発症後すみやかに麻痺肢の運動機能回復訓練を継続的に行うことが重要である。しかし、精神的にも肉体的にもダメージを受けた患

者にとって訓練を続けることは困難であり、回復の兆しが見られる前に訓練を諦めてしまう患者も少なくない。そのため、運動機能回復訓練を始めて間もない患者には、医師やセラピストの時間をかけた介助が必要とな

っている。特に訓練課題の達成には、医師やセラピストによる力の介助が効果的であることが分かっている。しかし、人的・時間的な制約から十分な訓練の量と質を確保できないことが大きな問題となっている。そこで、コンピュータ制御された介助力を用いて運動機能回復訓練を支援する機械システムを開発し、この問題の飛躍的な解決を図る。

## 2. 研究の目的

脳卒中片麻痺上肢の運動機能回復訓練の際に、電磁石を用いて安全で効果的な力刺激を加えることにより、痙縮した筋肉の伸張反射を促して訓練課題の達成を容易にするシステムを開発することを目的に、以下の目標をおく。

- (1) 肘の伸展屈曲運動訓練装置の開発
- (2) 電磁石を用いた力覚提示装置の開発
- (3) 伸張反射を促す力刺激による随意運動の誘発
- (4) 促通的運動療法の実現

## 3. 研究の方法

(1) 直線を与えた目標軌道に沿って手を動かすことで肘の伸展屈曲運動訓練が行える運動療法装置を製作する(図1)。その際、メカトロニクス機器を使用して、手(手部)の位置を計測するシステムを構築する。

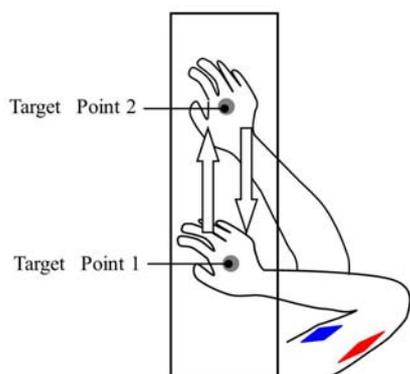


図1 肘の伸展屈曲運動

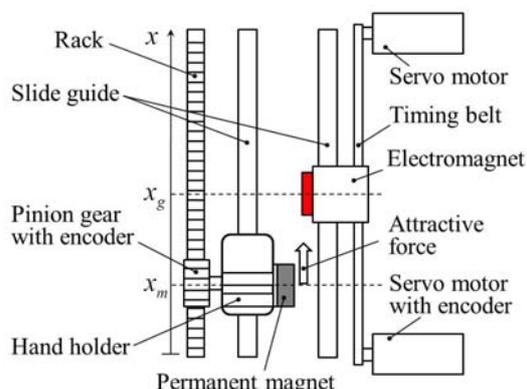


図2 電磁石を用いた力覚提示装置

(2) 電磁石をメカニカルに移動させて、その位置をコンピュータ制御することで、永久磁石を取り付けた手部に力覚を提示する装置を開発する(図2)。

(3) 運動する手部の位置を計測して、訓練中に筋肉が痙縮したと判断するときの条件を見出し、その内容を運動療法装置のソフトウェアに組み込む。

(4) 筋肉の痙縮を判断したときに、電磁石によって伸張反射を促す効果的な力刺激を加える運動療法システムを開発する。

(5) 健常者による機能試験を終えてから、鹿児島大学医学部付属霧島リハビリセンターにおいて、臨床応用を試みる。片麻痺を発症した直後の症状の重い患者を重点的に、本システムを適用した場合と適用しなかった場合に分けて、促通的運動療法の実現性について検討する。

(6) 上肢運動機能回復訓練では運動の実現を阻害する筋力の発生を抑制する必要がある。殊に前方に腕を伸ばす動作を行う際に、余分な力が入り肩の痛みを招くことが分かっている。そこで、機能的振動刺激法と機能的電気刺激法を併用して、適切な神経路の興奮水準を高めることで前述の問題を避け、随意的な運動を効果的に促す方法を検討する。

(7) 電気・電子回路を構成して、コンピュータ制御による機能的振動刺激と機能的電気刺激を片麻痺上肢の筋肉に与えるシステムを構築する。

(8) 改良を重ねながら、鹿児島大学医学部付属霧島リハビリセンターにおいて、臨床応用を試み、比較的重度の患者でも上肢伸展屈曲運動訓練が継続して行えるかどうか検討して、促通的運動療法の適用範囲の拡大を目指す。

## 4. 研究成果

(1) 手部の運動を直線上に拘束した図3に示す訓練装置を製作した。構造は図2に示しているとおりであり、左右平行に2本のスライドガイド(長さ520[mm])を配置している。左側のスライドガイド上を直線運動するように手の装具(手部ホルダー)が取り付けられている。ただし、ベアリングを用いて手部ホルダーはヨー軸まわりには自由に回転できるようにしている。そして、手部ホルダーの下部に永久磁石(円盤型ネオジウム磁石、直径40[mm]、厚さ5[mm])を装着している。また、手部ホルダーの下部にはピニオンギアを取り付けたエンコーダが固定されている。ス

ライドガイドに平行に設置したラックとこのピニオンギアを噛み合わせることで、手部ホルダーが直線運動したときの位置をエンコーダから検出することができる。一方、右側のライドガイド上を直線運動するように電磁石が取り付けられている。手部ホルダーの下部に装着している永久磁石とこの電磁石とがつくる磁界の相互作用により、互いが接近した際に接触することなく、引力や斥力を発生することができる。電磁石の位置は、タイミングベルトとプーリを介してエンコーダで検出し、サーボモータ（マクソン製：Re35、90 [W]）で制御する。電磁石がつくる磁界の強さは、電磁石コントローラ（フジタ製：MAX 3 [A] / 24 [V]）によって、制御することができる。なお、訓練中に肘が機構に接触しないように、木製の板で装置の一部を覆っている。また、目標位置と手部の位置の情報を視覚的に与えるため、患者の正面にディスプレイを設置する。訓練時の様子を図4に示す。

以上の開発した装置を用いることで、運動する手部の位置を計測しながら肘の伸展屈曲運動訓練を行うことが可能になった。

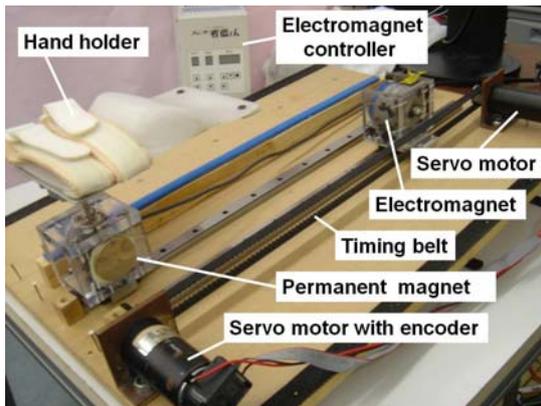


図3 訓練装置

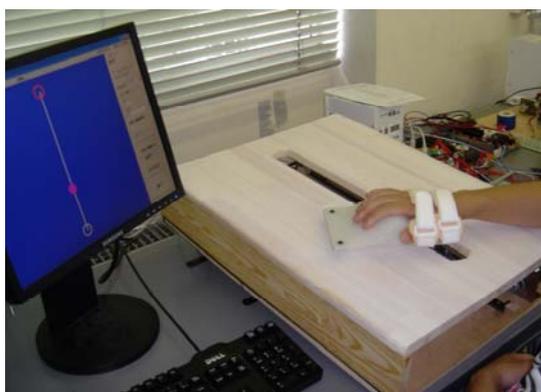
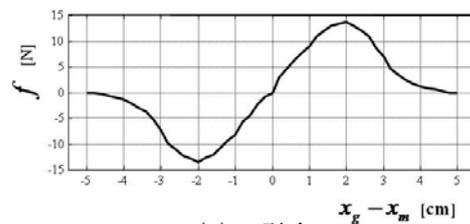


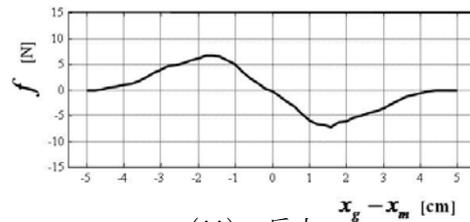
図4 訓練の様子

(2) 作成した電磁石の断面は、直径 50 [mm] の円形をしており、中心に直径 20 [mm] の鉄心が入っている。この鉄心のまわりに、太さ 0.8 [mm] のエナメル線が 1500 回巻いてあり、

電磁石の高さは 40 [mm] になっている。電磁石コントローラの出力を最大 (24 [V]) に固定したとき、この支援装置で手部に作用させることのできる力の大きさをデジタルフォースゲージ（日本電産シンボ製）を用いて測定した。その結果を図5に示す。このグラフの横軸は、電磁石の位置と手部の位置の差（距離）を示している。吸引力で最大 13 [N] 程度、斥力で最大 7 [N] 程度の力を発生できている。また、電磁石と永久磁石の距離が 5 [cm] 程度離れると、作用する力がほとんど消滅していることがわかる。以上の開発した装置を用いることによって、手部に力覚を提示することが可能になった。



(i) 引力



(ii) 斥力  
図5 電磁力

(3) 提案する訓練装置を用いた上肢運動機能回復訓練では、患者は、手を手部ホルダーにマジックテープで固定して、伸展運動の目標位置と屈曲運動の目標位置を交互に目指して手を動かす。まず、肘を屈曲させた位置から訓練を開始する。その際ディスプレイ上には、伸展屈曲運動の目標位置が赤い二重円で、手部の位置を示すマーカーが黄色の円で示されている。患者は、赤い二重円を目指してマーカーを動かすことで肘の伸展屈曲運動を行う。肘を伸展させてから屈曲させるまでを1回の訓練と数える。力の介助が不要な患者に対しては、50回～100回程度を1セットとして、休憩を挟んで1日に数セットの訓練を行うと運動機能回復に効果的であることがわかっている。しかし症状の重い患者は、1回の訓練を行うのでさえ大きな負担になる場合がある。したがって、症状に応じて訓練回数を設定する必要がある。痙性が見られる上肢の訓練では、伸展運動の途中で筋が痙縮してマーカーを目標位置に到達させることができないときがある。その際、以下のようにして電磁石を用いて伸張反射を誘発する。訓練中は、以下のモードのいずれかにある。

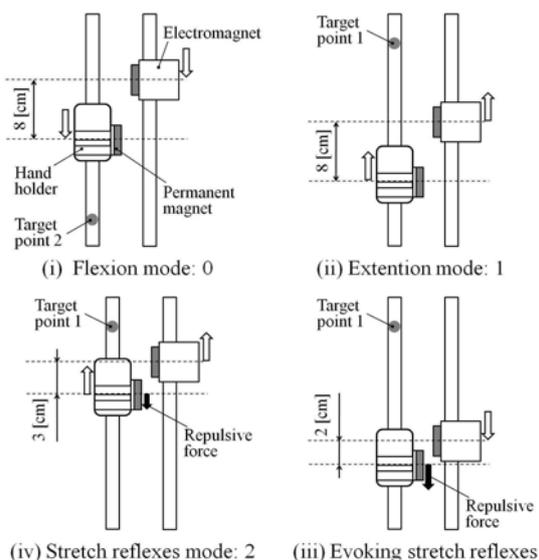


図6 電磁石の位置制御

① 屈曲モード：0

電磁石の位置は、図6-(i)に示すように、永久磁石を装着している手部の位置から伸展方向へ8 [cm]の位置にあるように、位置制御 (PID制御) されている。したがって、手部が屈曲方向へ移動するのに合わせて、電磁石も同じ方向に移動する。このとき、手部に力は作用していない。また、筋が痙縮したかどうかの判断は行わない。手部が屈曲運動の目標位置に到達すると、伸展モード：1へ移る。

② 伸展モード：1

電磁石の位置は、図6-(ii)に示すように、永久磁石を装着している手部の位置から伸展方向へ8 [cm]の位置にあるように位置制御 (PID制御) されている。したがって、手部が伸展方向へ移動するのに合わせて電磁石も同じ方向に移動する。このとき手部には力は作用していない。手部が伸展運動の目標位置に到達すると、屈曲モード：0へ移る。ただし、手部の位置が1秒間に0.5 [cm]以上伸展方向に進まなかった場合は筋が痙縮したと判断して、伸張反射モード：2へ移る。

③ 伸張反射モード：2

伸張反射を誘発するため、電磁石の磁界を手部に斥力が作用するように設定して、図6-(iii)に示すように、手部から2 [cm]の位置まで電磁石を移動させる。よって手部には、伸展方向とは逆向きに力が作用する。このとき、斥力の大きさが約2.5 [N]程度になるように電磁石の磁界を調整している。さらにその0.5秒後に、手部の位置から伸展方向へ3 [cm]の位置にあるように電磁石を位置制御する。そして、図6-(iv)に示すように、手部が目標位置に到達するまで斥力を約2.0 [N]与えつづける。ただし、作用する力に

負けて手部がそのまま屈曲方向に後退してしまうことがある。そこで、筋が痙縮したと判断した位置から手部が5 [cm]以上屈曲方向に後退した場合は、電磁石の設定を引力に変えて手部の位置に2 [cm]まで近づき、約13 [N]の引力で筋が痙縮したと判断した位置まで手部を伸展方向に引っ張る。手部が伸展運動の目標位置に到達すると、屈曲モード：0へ移る。なお、患者の症状に応じて伸展時の目標位置と屈曲時の目標位置を適応変化させるように工夫する。

以上のアルゴリズムを訓練装置のソフトウェアに組み込むことによって、上肢の痙縮を検知したときに伸張反射を誘発する力刺激を加えることのできる運動療法システムを構築することができた。ただし、条件にある数値は、複数の患者の協力を得て試験を繰り返し、医師との相談のもとで調整したものである。

(4) 試作した上肢運動機能回復訓練支援装置を用いて、鹿児島大学病院霧島リハビリテーションセンターにて臨床試験を行った。臨床試験の主な目的はつぎの2点を検証することである。1点目は、提案する装置によって痙縮した筋に伸張反射が誘発され、肘の伸展運動を促すことができるかどうかである。2点目は、従来の支援装置では訓練を諦めていた症状の重い患者に対しても、提案する装置によって訓練を継続することができるかどうかである。麻痺の症状が異なる7名の患者の協力を得て、臨床試験を行った。訓練対象者を表1に載せておく。臨床試験の内容は、肘の伸展屈曲運動訓練10回を1セットとして、1分の休憩を挟んで6セット行った。最初の3セットは比較のため従来の支援装置で訓練を行った場合として、電磁石を用いて伸張反射を誘発することはせず、また訓練中の目標位置の変更も行わなかった。つづいて、残りの3セットは提案する方法を適用した。訓練1セット終了ごとの可動域(目標位置の間隔)の推移を表2に示す。

表1 訓練対象者

Patient	Sex	Level	Arm
A	Male	Light	Left
B	Male	Light	Right
C	Female	Light	Right
D	Male	Moderate	Right
E	Female	Moderate	Right
F	Male	Heavy	Right
G	Male	Heavy	Left

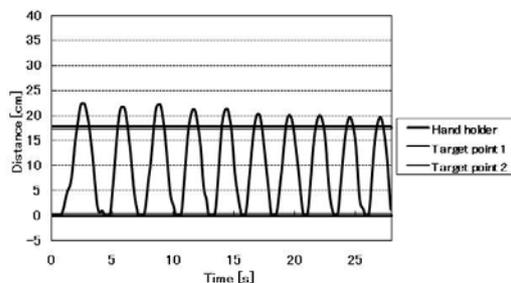
① 比較的症状の軽い患者

脳卒中患者A、B、Cは、被験者の中で比較的症状が軽い。従来法としている初めの3

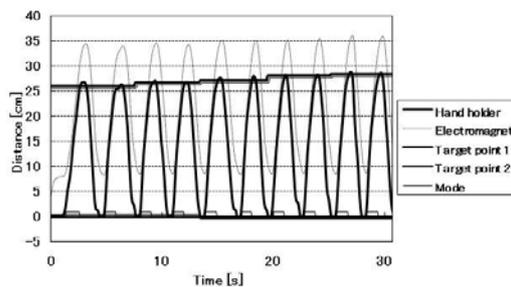
セットおよび、提案手法を適用した3セットのいずれの場合も訓練中に筋が痙縮する場面はみられなかった。従来法では可動域が一定のもとで訓練を行っているが、提案手法では2回の訓練ごとに変化している。特に、脳卒中患者Cは次第に可動域が大きくなっており、訓練の効果が認められる。脳卒中患者Cの訓練データの一部を図7に示す。図の(i)は従来法による訓練の3セット目のデータであり、(ii)は提案手法による訓練の3セット目のデータである。図中に示す‘Hand holder’は手部の位置を、‘Electromagnet’は電磁石の位置を、‘Target point 1’は伸展運動の目標位置を、‘Target point 2’は屈曲運動の目標位置を示す。また、‘Mode’は屈曲モード：0、伸展モード：1、伸張反射モード：2のいずれかを示している。この図から、提案手法の訓練では可動域が変化している様子がわかる。

表2 訓練結果

Patient	1st-3rd sets [cm]	4th set [cm]	5th set [cm]	6th set [cm]
A	21.2	30.0	29.4	29.5
B	14.6	18.6	18.5	18.8
C	17.5	24.0	25.4	28.3
D	6.4	7.2	6.7	6.6
E	18.0	19.5	20.1	20.2
F	6.2	8.1	8.1	7.6
G	—	0.9	0.8	3.5



(i) 3rd set with the ordinary method



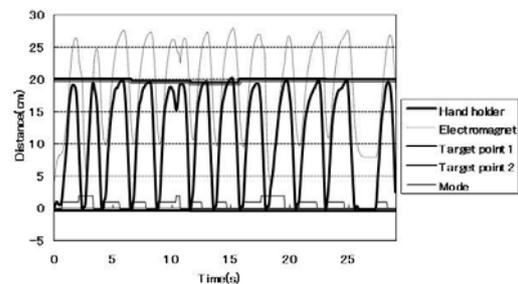
(ii) 6th set with the proposed method

図7 患者Cの訓練データ

## ② 比較的症狀が中程度の患者

脳卒中患者DとEは、被験者の中で比較的症狀は中程度である。脳卒中患者Dの訓練で

は、従来法で2セット目に1回、提案手法では1セット目に1回の筋の痙縮がみられた。いずれの場合も、その後すぐに目標位置に到達することができている。特に提案手法の場合は、電磁石の力が作用して刺激を受けた直後に肘が伸展している場面がみられた。脳卒中患者Eの訓練では、従来法で2セット目と3セット目にそれぞれ1回ずつの筋の痙縮がみられた。また、提案手法では3セット目に3回の筋の痙縮がみられた。いずれの場合も、訓練を継続することはできている。ただし提案手法の場合、電磁石の力が作用して刺激を受けた3回のうち2回において、手部が屈曲方向に後退してしまい伸張反射は効果的に誘発できていない場面がみられた。脳卒中患者Eの訓練で、提案手法を適用した場合の3セット目のデータを図8に示す。図中の‘Mode’の値をみると、訓練開始から2秒後および17秒後に伸張反射モードになっていることがわかる。伸展運動の目標位置に到達する前に手部が屈曲方向に戻っているため、途中で筋が痙縮したと判断されたためである。そしてさらに、その位置から手部が5 [cm]以上屈曲方向に後退しているため、電磁石の作用する力が引力に変わり、手部を伸展方向に引っ張っている様子がわかる。一方、訓練開始から10秒後にも伸張反射モードになっていることがわかる。このときは、電磁石の力が作用して刺激を受けながら肘が伸展している様子がわかる。



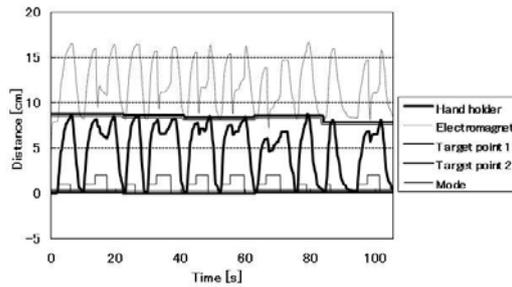
6th set with the proposed method

図8 患者Eの訓練データ

## ③ 比較的症狀の重い患者

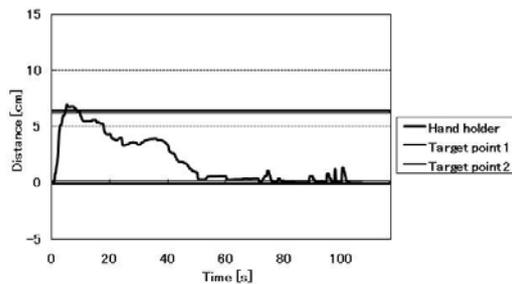
脳卒中患者FとGは、被験者の中で比較的症狀は重い。脳卒中患者Fの訓練では、従来法で1セット目3回、2セット目に1回、3セット目に2回の筋の痙縮がみられた。時間はかかっているが、目標位置に到達して訓練を継続できている。提案手法では、1セット目に5回、2セット目に3回、3セット目に7回の筋の痙縮がみられた。訓練回数が増えるにしたがって筋の痙性が強くなってしまったためだと考えられる。電磁石の力が作用して刺激を受けた直後に肘が伸展している場面が多数みられた。しかし、一部では電磁石の力が作用して、手部が屈曲方向に後退し

てしまっている場面もあった。脳卒中患者Fの訓練で、提案手法を適用した場合の3セット目のデータを図9に示す。

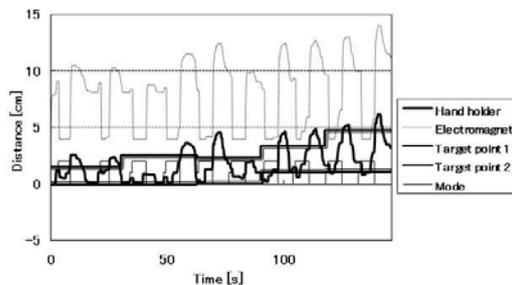


6th set with the proposed method  
図9 患者Fの訓練データ

脳卒中患者Gの訓練では、従来法で1セットの訓練を終えることはできなかった。訓練の開始当初から筋に強い痙性が認められた。従来法の1セット目の訓練データを図10-(i)に示す。1回の訓練を行うのがやっとで、その後時間をかけても訓練を継続することはできなかった。つぎに、提案手法での訓練を行ったところ、可動域が極端に小さい状態ではあるが、訓練を継続することができた。筋が痙縮したと判断した回数は、1セット目に9回、2セット目に9回、3セット目には10回あり、ほぼ毎回到電磁石の力が作用している。脳卒中患者Gの訓練で、提案手法を適用した場合の3セット目の訓練データを図10-(ii)に示す。訓練を継続することができており、次第に可動域が大きくなっている様子がわかる。



(i) 1st set with the ordinary method



(ii) 6th set with the proposed method  
図10 患者Gの訓練データ

(5) 前方に腕を伸ばす動作を行う際に、余分な力が入り肩の痛みを招く症状を防ぐため、機能的振動刺激法と機能的電気刺激法を併用して、適切な神経路の興奮水準を高める装置を導入した。訓練時の患者の感想から、患者の負担が軽減されていることを確認した。

(6) 以上の研究成果から、比較的重度の患者でも上肢伸展屈曲運動訓練が継続して行える運動療法装置の実現可能性が示された。促進的運動療法の適用範囲のさらなる拡大が期待できる。

## 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1件)

林良太、石嶺友康、川平和美、余永、辻尾昇三、脳卒中片麻痺上肢の運動機能回復訓練を支援するための電磁石を用いた伸張反射誘発装置の開発、計測自動制御学会論文集、査読有、Vo1. 45、NO. 12、2009、pp. 630-637

〔学会発表〕(計2件)

① 林良太、電磁石を用いて伸張反射を誘発する上肢運動療法装置の開発、日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会、2009年5月25日、福岡市

② 林良太、伸張反射を誘発するための電磁石を用いた力覚提示装置の提案、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、2008年12月7日、岐阜市

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

林 良太 (HAYASHI RYOTA)  
鹿兒島大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号：40288949

### (2) 研究分担者

川平 和美 (KAWAHIRA KAZUMI)  
鹿兒島大学・医歯学総合研究科・教授  
研究者番号：20117493

余 永 (YO EI)  
鹿兒島大学・理工学研究科・准教授  
研究者番号：20284903

下堂 蘭 恵 (SHIMODOZONO MEGUMI)  
鹿兒島大学・医歯学総合研究科・准教授  
研究者番号：30325782