慶應義塾大学学術情報リポジトリ
Keio Associated Repository of Academic resouces

Title	意識下学習を活用したロボティック・リハビリテーション手法の開発と検証
Sub Title	Development of robotic motor rehabilitation that facilitates implicit learning
Author	牛場, 潤一(Ushiba, Junichi)
Publisher	
Publication year	2016
Jtitle	科学研究費補助金研究成果報告書 (2015.)
JaLC DOI	
Abstract	外骨格ロボットの特長である「キネマティクス/ダイナミクスの精密制御性」と, ロボットによる基礎的運動学習研究の成果である「無意識的な運動学習」を活かした, リーチング動作に関する新しいリハビリテーション手法の概念実証研究をおこなった。具体的には, 上肢到達運動訓練時に自動的に運動負荷や介助を与えるロボティック・リハビリテーション法を開発し, 被験者に気づかれることなく発揮張力や使用手選択に関わる意思決定プロセスについて, 無意識的な運動学習を進めることが可能であることを示した。また, パイロット解析の結果から, その際に関わる脳領域を検出することが可能であることを示した。 The present study focused on the advantages of exoskeleton type robotic devices, i.e. precise controllability of kinematics/dynamics and possible accessibility to implicit motor learning process, and tested the feasibility of its application to arm motor rehabilitation to promote upper limb reaching movements. Gradual increment of force applied to one arm was first programmed, and tested its effects on decision making of arm choice and force exerted. The results showed implicit learning can be induced both in healthy and stroke patients with hemiplegia. The pilot study also showed feasibility that functional MRI and Volume based morphometry can detect associated cortical/sub-cortical areas that are used underlying such am implicit motor learning. These study shows the feasibility of implicit learning by exoskeleton robotic intervention in arm motor rehabilitation.
Notes	研究種目 : 若手研究(A) 研究期間 : 2013 ~ 2015 課題番号 : 25702034 研究分野 : リハビリテーション医学, 神経科学, 生体医工学
Genre	Research Paper
URL	https://koara.lib.keio.ac.jp/xoonips/modules/xoonips/detail.php?koara_id=KAKEN_25702034seika

慶應義塾大学学術情報リポジトリ(KOARA)に掲載されているコンテンツの著作権は、それぞれの著作者、学会または出版社/発行者に帰属し、その権利は著作権法によって保護されています。引用にあたっては、著作権法を遵守してご利用ください。

The copyrights of content available on the KeiO Associated Repository of Academic resources (KOARA) belong to the respective authors, academic societies, or publishers/issuers, and these rights are protected by the Japanese Copyright Act. When quoting the content, please follow the Japanese copyright act.

様　式　Ｃ－１９、Ｆ－１９、Ｚ－１９　（共通）

科学研究費助成事業　　研究成果報告書

平成 ２８ 年　 ５ 月 ２５ 日現在

機関番号：３２６１２
研究種目：若手研究(A)
研究期間：2013～2015
課題番号：２５７０２０３４

研究課題名（和文）意識下学習を活用したロボティック・リハビリテーション手法の開発と検証

研究課題名（英文）Development of robotic motor rehabilitation that facilitates implicit learning

研究代表者
牛場　潤一（Ushiba, Junichi）

慶應義塾大学・理工学部・准教授

研究者番号：００３８３９８５

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費）　　20,500,000円

研究成果の概要（和文）：外骨格ロボットの特長である「キネマティクス／ダイナミクスの精密制御性」と、ロボットによる基礎的運動学習研究の成果である「無意識的な運動学習」を活かした、リーチング動作に関する新しいリハビリテーション手法の概念実証研究をおこなった。具体的には、上肢到達運動訓練時に自動的に運動負荷や介助を与えるロボティック・リハビリテーション法を開発し、被験者に気づかれることなく発揮張力や使用手選択に関わる意思決定プロセスについて、無意識的な運動学習を進めることが可能であることを示した。また、パイロット解析の結果から、その際に関わる脳領域を検出することが可能であることを示した。

研究成果の概要（英文）：The present study focused on the advantages of exoskeleton type robotic devices, i.e. precise controllability of kinematics/dynamics and possible accessibility to implicit motor learning process, and tested the feasibility of its application to arm motor rehabilitation to promote upper limb reaching movements. Gradual increment of force applied to one arm was first programmed, and tested its effects on decision making of arm choice and force exerted. The results showed implicit learning can be induced both in healthy and stroke patients with hemiplegia. The pilot study also showed feasibility that functional MRI and Volume based morphometry can detect associated cortical/sub-cortical areas that are used underlying such am implicit motor learning.
These study shows the feasibility of implicit learning by exoskeleton robotic intervention in arm motor rehabilitation.

研究分野：リハビリテーション医学、神経科学、生体医工学

キーワード：ロボットリハビリテーション　運動学習　上肢到達運動

１．研究開始当初の背景

現在継続的に医療を受けている脳卒中患者は 147 万人と推定され、費やされる医療費は年間１兆９千億円を超えている。国民医療費の半分を占めている 65 歳以上では、脳卒中にその約 40%が割かれ、要介護者のうち約３分の 1 が脳卒中である。したがって脳卒中片麻痺をリハビリテーションすることは、日常生活における麻痺手の使用頻度を高め、本人の生活の質を改善することに貢献する上、脳卒中医療における社会医療的負担を軽減させることにもつながる。

障害された上肢運動を訓練する上で、ロボット技術を活用する考え方は 1989 年に始まる。ロボット技術の進展と神経系の機能回復に関する知見の蓄積が相まって、1999 年に米国電気電子学会（IEEE）の国際会議 International Conference of Rehabilitation Robotics（ICORR）が創始された。国内外におけるロボティック・リハビリテーションを大別すると、関節可動域の拡大が期待できる他動運動ロボット（TEM LX2）、腕を免荷して運動をしやすくさせるロボット（T-WREX）、理学療法や作業療法において経験的に構築された運動介助や運動負荷の考え方を模倣するロボット（MIT-MANUS, ReoGo）、ゲーム要素を加えることで継続的な運動訓練をうながすロボット（ARMin）がある。しかしこれらのアプローチはいずれも、既存のリハビリ医療で語られてきた方法をロボットに代行させる考え方に留まっており、従来法と比較して有意な機能回復効果を認めるに至っていない（J NeuroEng Rehab 6:20 (2009)）。このように、職能性の高い技術を療法士（ヒト）とロボットが同じ観点から競い合った場合、多くの経験に基づいて複雑な状況判断が行なえるヒトの方が優れたパフォーマンスを示すことが一般的である。

以上の理由により、現在のロボティック・リハビリテーション研究は、単に療法士（ヒト）の模倣をおこなう段階に留まっており、ロボットでしか実現し得ないリハビリ法の開発は不十分である。現状の動向のままでは、ロボットリハの存在価値は「リハビリ施設における人件費の削減」と「在宅でのリハビリ機会の提供」という観点に留まる上、それらは実際のところ、導入コストやメンテナンス等の面を鑑みると、実現性に依然大きな障壁があるものと思われる。このような研究動向を鑑みれば、これからのロボティック・リハビリテーション研究に求められる最大のポイントは、ロボットの特性を最大限活かした運動訓練方法を提唱し、ヒトが実践しにくい新しい機能回復手法を発見することにあるといえる。

２．研究の目的

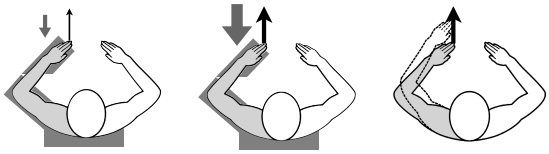
そこで応募者は、ロボットの特長である「キネマティクス／ダイナミクスの精密制御性」と、ロボットによる基礎的運動学習研究の成果である「無意識的な運動学習」を活かした、リーチング動作に関する新しいリハビリテーション手法を開発する。最近の運動学習研究では、反復的なリーチング動作中に、ロボットがトルク負荷あるいはトルク介助を極めて僅かずつ変化させると、被験者はその変化に気づかないまま、運動出力様態が変化することが知られている。応募者も追試のため、健常者 3 名において予備的実験をおこなった結果、最大収縮力の 1%分を漸次的に上乗せしていく負荷訓練では、被験者に気づれないまま 2 倍の筋発揮張力を出力させることに成功した。本研究では、この「無意識的な学習運動学習」を応用して、リーチング動作に困難が伴う軽度運動麻痺患者を対象とした新奇リハ手法を提案する。

また、「無意識的な学習」の座を神経科学的に明らかにし、脳卒中の病態や損傷部位との関連性を検討することは、提案手法の信頼性を担保する上で欠かせないほか、訓練効果を最適化する上での重要な知見になる。応募者はこれまでに、脳卒中片麻痺の機能回復には障害半球の一次運動野（J Rehabil Med 2011）および補足運動野（Brain Topogr 2015）が関与していることを見いだした。また脳波筋電図解析により、運動学習にともなって皮質脊髄路の神経活動同期性が変化することを明らかにした（J Appl Physiol 2011）。これらの研究成果から考えると、無意識的な学習運動が進む過程においても同様に、運動関連領域全般に著明な脳活動変化が生じると予想される。したがって本研究では、皮質、基底核、小脳を網羅的に評価することが可能な脳機能イメージング法を用いて、リハ効果を神経科学的側面から定量的に評価する。

３．研究の方法

【平成 24 年度】反復リーチング運動に対して、平行あるいは反平行な力場をロボットに生成させる。力場は、被験者に気づかれないように、僅かずつ増加させる（図１a,b）（Scott et al., Nature 2011）。40～100 回程度の反復動作後に力場を無くすと、被験者はアフターエフェクトによってリーチング動作が円滑におこなえていることに気づく（図１c）。この段階で、被験者の運動指令の生成に関わる脳内の内部モデルは、無意識のうちにロボットによって書き換えが起きている（Kawato et al., Curr Opin Neurobiol 2011）と予想される。慢性期脳卒中患者は、運動麻痺が定着し、誤学習された運動パターンをフィードフォワード的に実施している状態にある上（Lin et al., Clin Rehabil 2007）、その誤りを意識的に訂正し、新たな運動パターンを習得することは、心理的要因によって阻害されることが多い（Han et al., PLoS Comp Biol 2011）。本提案手法では、被験者が気づかぬまま、内部モデルの誤りが修正されるため、運動学習の阻害要因となる心理的障壁が無い状態で円滑にリハ訓練を実施できると思われる。一連のプロ

トコルは、上肢運動制御ロボット KINARM（b.kin 製）を購入し、リアルタイム制御に実績のあるソフトウェア Simulink を用いて実装する。



(a)弱い負荷　(b)微小量負荷を増加 (c)負荷無しで動作改善

図 1 ロボットによるリーチング動作訓練

本研究では動作確認を兼ねてまず、健常成人 10 名で実証実験を実施する。この際、無意識下での学習幅が最大になるパラメータ（力場変化率、運動反復回数）を同定する。得られた知見を基に脳卒中片麻痺患者での実験に移り、同程度の運動麻痺患者計 5 名のデータを得る。運動出力パターンについては、ロボットが測定できる関節トルクに加え、表面筋電図（両側上肢の近位遠位の伸筋群・屈筋群、および体幹筋）を計測して定量的に評価する。

【平成 25 年度】年度前半では、最も効率よく「無意識的な運動学習」が進むための、ロボット側の負荷／介助量の変更幅、および反復回数を探索的に同定した。被験者数は健常成人、脳卒中片麻痺患者ともに 10 名を目標とした。また年度後半では、脳機能イメージング装置内でリーチング動作を可能とする非磁性装置の設計を開始した。非動力源以外の部分を完成させ、イメージング装置内での動作確認を実施。試作品がイメージングのノイズ源となり得ないか検証した。

【平成 26 年度】脳機能イメージング装置内でリーチング動作を可能とする非磁性装置を一次試作した。また、これを用いて「無意識的な運動学習」中の脳血流動態を計測し、学習の座を特定する。被験者数は健常成人 10 名、慢性期脳卒中片麻痺者 5 名を目標とした。

４．研究成果

実験計画に基づき、平成 24 年度には反復リーチング運動に対して、平行ならびに反平行な力場をロボットに生成させるプログラムを作成した。まず、上肢到達運動制御ロボット KINARM（b.kin 製）を学内予算によって購入し、リアルタイム制御に実績のあるソフトウェア Simulink、StateFlow、ならびに RealTime Workshop を用いて一連のタスクを組み込んだ。被験者に与えられる力場は、被験者に気づかれないように僅かずつ増加させるもの（Scott et al., Nature 2011）と、そのコントロール課題として、平均力場は同じものの、試行間分散があるランダム力場を設定した。以上の 2 条件に基づいてターゲットへの到達運動を繰り返し行わせ、被験者が気づかないまま内部モデルの誤りが訂正されるかどうか、健常成人による実験的検証をおこなった。当初計画では健常成人 10 名程度での実験を想定していたが、統計学的検出力を再検討した結果、全 18 名での実験実施となった。実験では、無意識下での学習幅が最大になるパラメータ（力場変化率、運動反復回数）を同定するために、さまざまな条件検討を実施した。最終的には、水平面のリーチング運動に関して、前方 8cm の地点にターゲットを表示し、左右方向には最大 5cm 幅で座標変動するものが適切であることが実験的に示された。

次に平成 25 年度には、脳卒中片麻痺患者での臨床研究に移行するにあたって、POC 取得（Proof-of-Concept、概念実証）をおこなった。介入パラメータによっては肩関節周りの痙性麻痺が一過性に増悪するケースが認められ、被験者取り込み基準の修正、肩関節挙上角の低減などを通じて、対策を施した。被験者 10 名での検討の結果、到達運動方向に対して慣性軸まわりの試行間分散（precision）が体系だって大きく、試行間分散は健常成人の 1.5 倍程度であることを見出した。ロボットによる微弱力場を与えて、被験者の意識下で脳内の運動制御内部モデルを更新するためには、今回得られた Precision 値を基準として、その半分程度の変動を与える力場強度であれば、被験者に気づかれない課題を設定可能であると考えられた。

平成 26 年度には、このようにして決定した力場強度範囲において、力場負荷が試行間でランダムに変化する系を施行すると、平均力場負荷が同一の一定力場系での場合と比較して、経時的に当該肢の不使用状態が漸増することを明らかにした。このことは、被験者がおこなう誤差予測精度が乱され、運動肢としての選択を阻害するものと考えられた。一方、増加分が一定となる漸増負荷課題を施行した結果では、被験者がそうした負荷状況を知覚することなく、発揮張力が増加していくことを見出した。1.5 テスラ機能的脳機能イメージングを利用した測定では、機材によるノイズ混入の影響が完全に除去しきれず、オフライン解析の改善がまだ必要ではあるものの、学習性の不使用が進む過程では報酬系に関わる規定核の一部の活動が低下傾向にあり、意識に上らない運動肢の選択においても、こうした脳領域の活動が関与している可能性が示唆された。

以上本研究は、3 年間の研究期間を通じて、上肢到達運動訓練時に自動的に運動負荷や介助を与えるロボティック・リハビリテーション法を開発し、被験者に気づかれることなく無意識的な運動学習を進めることが可能であることを示した。また、パイロット解析の結果から、その際に関わる脳領域を検出することが可能であることを示した。今後は、機能的脳機能イメージングによる検討結果に関して統計学的信頼性を高めるため、被験

者数を増加させて効果量の判定をおこなうほか、脳機能イメージングによって計測された脳血流変化量と行動変化の関係を数理モデリングするなど、神経科学とリハビリテーション医学をつなぐためのさらなる応用展開を図る。

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 Otaka E, Otaka Y, Kasuga S, Nishimoto A, Yamazaki K, Kawakami M, Ushiba J, Liu M, Clinical Usefulness and Vallidity of robotic measures of reaching movement in hemiparetic stroke patients, J NeuroEngineering and Rehabilitation, 査読有, 12, 2015, 66
DOI:10.1186/s12984-015-0059-8

② Habagishi C, Kasuga S, Otaka Y, Liu M, Ushiba J, Different Strategy of hand choice after learning of constant and incremental dynamical perturbation in arm reaching, Frontiers in Human Neuroscience, 査読有, 8, 2014, 92
DOI:10.3389/fnhum.2014.0092

〔学会発表〕（計　0 件）

〔図書〕（計　0 件）

〔産業財産権〕
○出願状況（計　0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況（計　0 件）

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等

６．研究組織
(1)研究代表者
牛場　潤一（USHIBA, Junichi）
慶應義塾大学・理工学部・准教授
研究者番号：００３８３９８５

(2)研究分担者
無し（　　）
研究者番号：

(3)連携研究者
無し（　　）
研究者番号：