

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 10 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24760195

研究課題名(和文) 手指機能再建のための随意・自律制御複合型装着ハンドシステムの開発

研究課題名(英文) Development of composite type wearable hand assistive system with voluntary and autonomous drive

研究代表者

河本 浩明 (Kawamoto, Hiroaki)

筑波大学・サイバニクス研究センター・助教

研究者番号：00400713

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、手指関節機能(掌屈・背屈運動)に障害をもつ方を対象に、人間と機械を複合融合させる装着型ハンドを活用し、効果的な治療のための脳の可塑性に基づいた運動機能再建支援システムの開発を行った。装着型ハンドは、近位指節間(PIP)関節、中手指節間(MP)関節を独立したアシストを可能にするアクティブジョイント機構を有しており、また、訓練中の脳活動を捉えるfMRI環境化での使用を可能としている。片麻痺患者に対する実証試験を実施した結果、運動機能回復における動作支援の実現可能性が示された。

研究成果の概要(英文)：In this research, we developed a wearable hand training system for the patients with hand paralysis. The wearable hand has active joints which independently provide motion support at the proximal interphalangeal joint and the metacarpophalangeal joint, and was developed to be used in MRI environment to monitor the wearer's brain activity. In verification tests, on a healthy volunteer we confirmed the accurate performance of the wearable hand training system in the MRI environment, and feasibility of the intervention for a person with hand paralysis.

研究分野：生体制御工学

キーワード：ウェアラブルロボット 機能回復

1. 研究開始当初の背景

脳血管障害、脊椎損傷等により運動中枢系が損傷してしまった場合、リハビリテーションにより運動麻痺を軽減し、運動機能を改善することが重要な課題となる。

近年、障害を持つ方の運動機能の再建を脳の運動学習として捉える考え方が注目され始めている。脳の運動学習は大まかに3つの段階で捉えることが出来る。第一段階：感覚器から運動中枢への入力（求心性入力）によって、【脳機能が再構成される段階】。患者自らの動作は要求せず他動的な動作で実施される。第二段階：運動中枢から筋へ運動指令が試みられる【運動指令の試行段階】。第三段階：フィードバック情報を基に運動指令が修正され運動が完成していく、【運動指令が形成される段階】。第二段階、第三段階は患者の自らの能動的な動作で実施される。

手指関節機能に障害を有する方に対する機能回復のための訓練方法として、まず作業的な療法に入る前に、作業療法士によって、他動的に掌屈・背屈運動等を実施する。この訓練方法は決まった運動パターン動作を提供するのみであり、上述した運動学習過程でいえば、第一段階である受動的動作のみで終わってしまっている。一方、手指関節機能を改善・向上させるリハビリテーションの研究では、受動的動作よりも、残存している機能を使って自らの力で動作する能動的動作の方が効果的に把持機能が高まるという報告がある (Lotze et al. 2003)。これは運動学習過程の第二段階、第三段階の能動的動作を利用した機能再建方法といえる。

我々は人間・機械を一体化させ人間の身体機能を強化・拡張・補助するロボットスーツ HAL の開発を行っている。HAL は人間の運動学・生理学特性を取り込み、人間・機械間の力・動作情報のインタラクションを実現することで、身体機能を向上させるものであり、医療福祉分野、重労働分野等へ広範な活用が期待される次世代人支援型ロボットである。HAL のコア技術として、二つの運動制御機構である「随意制御機構」と「自律制御機構」の開発を行っている。

「随意制御機構」とは、装着者が身体を動かす際、動かそうとする筋肉の皮膚表面上から検出される微弱な生体電位信号を信号処理し、パワーユニットの駆動指令とすることで、装着者は身体と同じように思い通りにロボットスーツを動かすことができる制御機構であり、装着者の運動指令に応じて能動的な動作を実現することが可能である。

「自律制御機構」とは、人間の複雑な一連の運動は基本的な運動単位から構成されているものと捉え、運動情報、生理情報による運動解析から一連の運動を Phase と呼ぶ基本運動単位に分解、それらをロボットスーツに組み込み、再合成することによって、人間の特性を反映した運動を生成することができる制御機構である。装着者にとっては受

動的な動作として支援することになる。

運動学習の観点から、上記の二つの制御機構の適用を考えると、第一段階として、装着型ハンドの自律制御機構による受動的動作パターンを繰り返すことにより、装着者の筋、靭帯、関節の受容器の刺激から、運動中枢系へ求心性入力を継続的に送り続けることで脳神経系の機能的再構成を促進させていく。第二段階では、受動的動作の中で、装着者は随意的な運動を意識して動作を試みることで、運動中枢から手指関節動作に必要な運動指令の試行が期待される。第三段階では、自律制御機構と随意制御機構を混在して適用し、試行された運動指令を基に、随意制御機構による能動的動作の割合を徐々に増やしていくことで運動指令の形成が期待される。

2. 研究の目的

本研究では、手指関節機能（掌屈・背屈運動）に障害をもつ方を対象に、人間と機械を複合融合させる装着型ハンドを活用し、効果的な運動機能回復のための脳の可塑性に基づいた運動機能再建支援システムを開発することを目的とする。

3. 研究の方法

(1) 装着型ハンドの開発

脳卒中による片麻痺症状の手指には屈曲方向への筋緊張が亢進しているため、麻痺患者が指を自発的に伸展することは困難であり、指を握り込んだままの状態となる。これは、握力は残存しているが、指を自らの力で開くことができない状態であると言える。そこで、装着型ハンドの動作として、拇指以外の四指の MP, PIP 関節の動作を同時にアシストすることによって四指の開閉動作を選択した。

開発した装着型ハンドを図1に示す。ハンドの機構の設計として、示指、中指、環指、小指それぞれの PIP, MP 関節の回転中心が一致するものと見なし、示指側に回転軸を持つ外骨格フレームを配置した。外骨格フレームを各指の背側にあるカフ部分とベルトによって固定し、外骨格フレームから加えられる外力をブリッジとベルトへ伝達することに

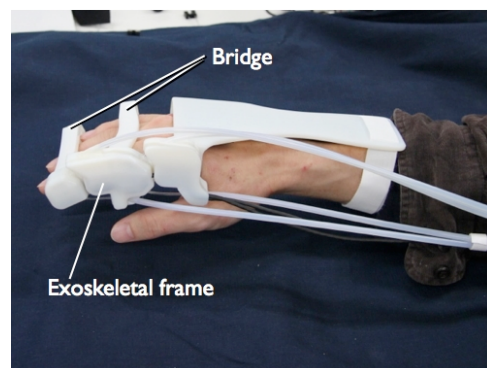


図1 装着型ハンド

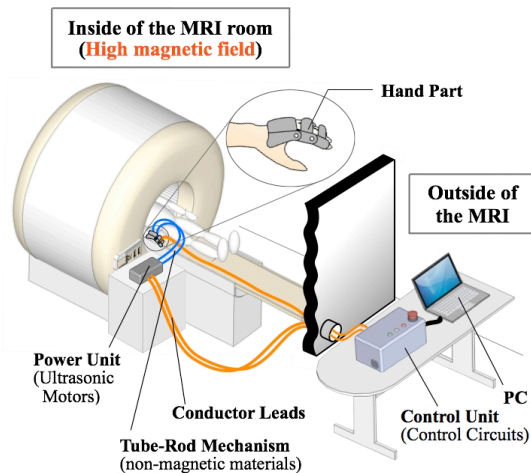


図 2 MRI 対応手指関節機能再建支援システムの外観

より四指の屈曲-伸展動作のアシストを行う。本装着型ハンドは、MP 関節と PIP 関節の 2 関節を独立して駆動させることが可能である。各関節には、角度センサ (ポテンシオメータ) が付属しており、屈伸動作時の関節角度を検出することが可能である。さらに、微小な関節角度の動きを検出することから、運動開始時の運動意思を捉えることも可能である。

(2) MRI 対応手指関節機能再建支援システムの開発

運動学習による運動機能の改善は、脳の可塑性に基づく脳神経活動の変化と捉えることができる。脳神経活動を推定する手法として、機能的核磁気共鳴画像法 (functional magnetic resonance imaging: fMRI) が広く利用されている。fMRI は、脳血流を計測する装置であり、脳血流と脳神経活動の対応関係から、どの脳部位にどの程度の血流があるのかを計測することによって、脳の活動部位と活動程度を推定することができる。

これまでのリハビリテーションにおける fMRI 研究では、ニューロリハビリテーション前後の脳活動を計測するところで留まっており、リハビリテーション最中の脳活動を計測することは不可能であった。運動機能改善を目的とした装着型ハンドによる運動支援中に、fMRI によって脳活動を推定することができれば、リハビリテーション時の脳内の神経ネットワークの再構築の瞬間の神経の可塑性が捉えられるようになり、運動機能改善プロセスがわかり、効果的な運動学習方法の提示や運動機能の回復の診断が見込まれる。

そこで本研究では、上記の開発した装着型ハンドに対して MRI 検査室内での使用を可能にした手指関節機能再建支援システムを開発した。図 2 に MRI 対応手指関節機能再建支援システムの外観を示す。

MRI 検査室内は高磁場環境下であるため、

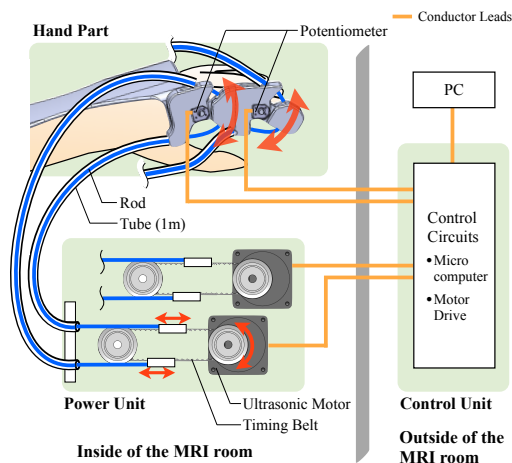


図 3 MRI 対応装着型ハンド

金属材料や磁性体を含んだ機器類の使用は厳しく制限されていることから、装着型ハンドのアクチュエータは非磁性体で構成される超音波モータを用いた。アクチュエータから装着型ハンドへの動力伝達には、蛇管ロッド機構を用いる。蛇管ロッド機構は、チューブ内に柔軟性のある非磁性ロッドを通し、そのロッドを押し引きすることにより動力伝達を行う機構である。これにより、装着型ハンドによる屈曲-伸展動作のアシストを行う。アクチュエータを制御するドライバ (コントロールユニット) は、磁性体や導体であるため、高磁場環境でない MRI 検査室外に設置して使用される。コントロールユニットの制御に必要なパラメータは、マイクロコンピュータとシリアル通信でつながったパーソナルコンピュータ (Personal Computer: PC) から送信されている。図 3 に MRI 対応装着型ハンドの詳細を示す。

4. 研究成果

(1) 健常者による脳活動計測試験

開発したシステムを健常者に適用し、Active 動作と Passive 動作時の脳活動計測実験を行った。

各タスクは 25 秒のレストののち 25 秒の運動を行い、これを 4 回繰り返した。実験協力者は、左手に開発したシステムを装着し、実験中は MRI 検査室内のスクリーンを通して、指の屈曲・伸展のタイミングの合図を受ける。

Passive 試験では、実験協力者には指を脱力状態にしてもらい、ハンドシステムがスクリーンの合図にあわせて屈曲、伸展運動を指に提示する。Active 試験では、実験協力者はスクリーンの合図に合わせて自ら運動し、ハンドシステムは、運動初期の関節角度の微小な変化を検出し、それをトリガーとして実験協力者の運動を支援するように動作する。

実験中は、被験者の頭部を MRI 付属のヘッドフォンとスポンジを用いて固定する。体位は仰臥位、右手に刺激装置を装着し、上腕から前腕の下にクッションを敷くことで上肢



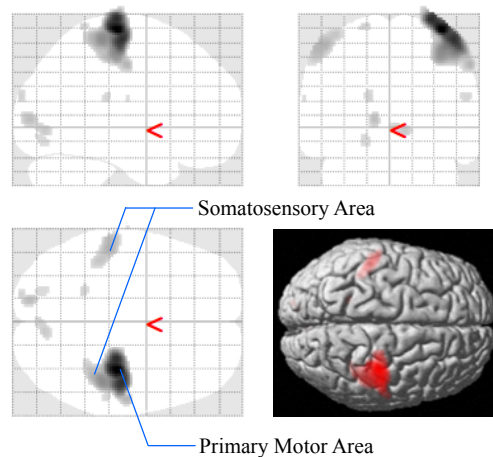
図 5 MRI 計測下での動作支援試験

に無理のない体勢とする。本試験の様子を図 4 に、示す。撮影時の使用コイルは 32 チャンネル SENSE Head coil である。撮影方法は全脳に対して機能画像として軸位断 Single Shot Echo Planner Imaging 法 (FOV: 240 mm, Scan matrix: 96, Recon matrix: 128, TR: 3000 ms, TE: 35 ms, FA: 90°, Slice thickness: 4 mm, Number of slice: 40, SENSE factor: 2) を用い、解剖画像として矢状断 T1-3D Turbo Field Echo 法 (FOV: 250 mm, Scan matrix: 228, Recon matrix: 240, TR: 7.4 ms, TE: 3.4 ms, FA: 8°, Slice thickness: 0.6 mm, Number of slice: 301, SENSE factor: 2) を用いる。実験で得られた MRI 撮影画像の解析には、SPM8(11)を用いる。

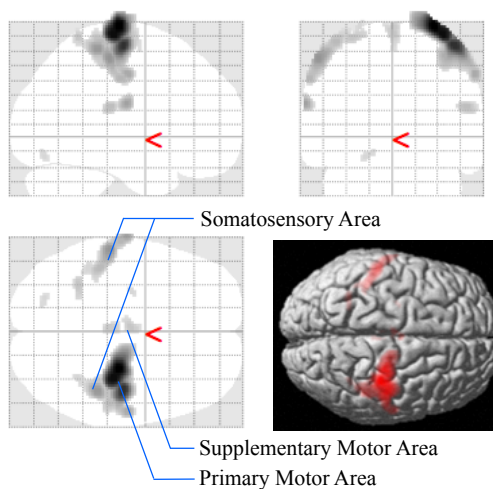
開発したシステムを用いて健常者の左手の指に Passive 動作と Active 動作を提示した際の脳活動の結果を図 5 に示す。Passive 動作の場合は、両側の体性感覚野、および、対側の一次運動野に賦活が見られた。Active 動作の場合は、両側の体性感覚野、対側の一次運動野、および、補足運動野の賦活が見られた。補足運動野の賦活は Active 動作の場合のみに見られた。これは、肘や指の Passive 動作 Active 動作時の脳活動を調べた過去の研究の結果と同様であった。補足運動野は、随意運動の制御の役割を果たしていると考えられており、本研究においても、新たに開発した MRI 対応手指関節機能再建支援システムを用いて、理論通りの結果を得ることができた。

(2) 臨床試験

対象患者に対して、装着型ハンドによる手指関節機能再建支援システムのフィジビリティスタディを実施した。本実証試験では、脳卒中による片麻痺によって、四指の伸展動作が全く困難な方を被験者とした。実験環境を図 6 に示す。試験プロトコルとして、装着型ハンドの屈曲-伸展の繰り返し動作によって被験者は運動意図を持たず直接装着ハンドによって動かされる Passive 動作支援と、装着型ハンドの屈曲-伸展の繰り返し動作時の伸展動作時にのみ被験者に伸展動作を意識する Active 動作支援を実施した。また、



(a) Passive movement



(b) Active movement

図 5 装着型ハンドによる四指の屈曲-伸展補助時の脳活動 (a)passive 動作, (b)active 動作

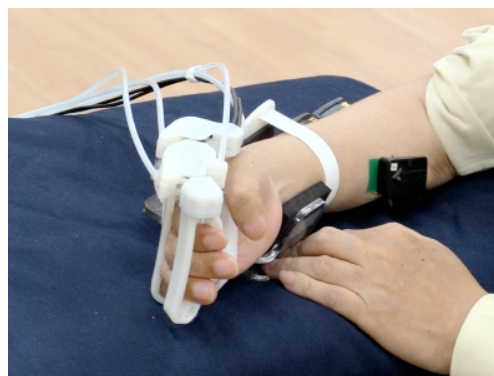
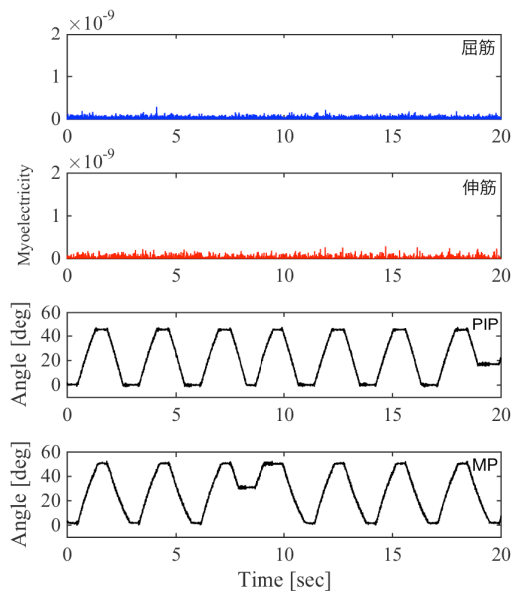


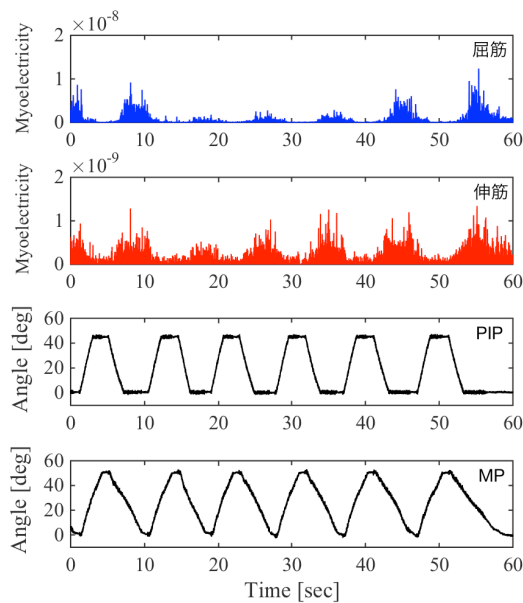
図 6 装着型ハンドによる四指の屈曲-伸展支援

本システムの評価項目として、各動作支援時の四指の屈筋及び伸筋の活動電位を評価した。

図 7 に passive 動作支援, active 動作支援



(a) Passive movement



(b) Active movement

図 7 脳卒中片麻痺患者に対する装着型ハンドによる四指の屈曲-伸展補助時の筋活動 (a) passive 動作支援, (b) active 動作支援

中の四指の屈筋, 及び伸筋の筋活動と装着型ハンドの関節角度を示す. PIP 関節, MP 関節は伸展位を 0 [deg]として, 屈曲位を正の値とする. これらの結果, passive 動作支援では, 四指の屈筋, 伸筋の活動は検出されていないことから, passive 動作に反射活動が見られず, 無理の無いスムーズな動作支援が実施されていることがわかる. 一方, active 動作支援では, 装着型ハンドの伸展動作に合わせ, 伸筋が大きく活動していることがわかる. ただし, 伸展動作時に屈筋の活動も見られており, これは麻痺による同時収縮が発生して

いると思われる. 今後は, 屈筋の活動を抑えながら伸展動作支援に沿って伸展運動意図に基づく伸展動作を繰り返すことで, 麻痺(共同運動)の改善が期待される. 以上, 当該臨床試験により, 本システムによる運動機能回復における動作支援の実現可能性が示された.

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)

- ① K. Murata, A. Matsushita, K. Saotome, H. Kawamoto, and Y. Sankai, Development of an MR-compatible Configurable Brush Stimulation Device, Proceedings of 36th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society, 2014, pp. 2101-2106, 査読有

[図書] (計 1 件)

- ① H. Kawamoto, Chapter 2 Wearable Robot Technology, pp.21-39. In: Cybernetics Fusion of Human, Machine and Information Systems (editor Y. Sankai, K. Suzuki, and Y. Hasegawa), Springer, Tokyo, Japan, February 2014.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

河本 浩明 (KAWAMOTO HIROAKI)

筑波大学・サイバニクス研究センター

研究者番号: 00400713