

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：12102

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K19303

研究課題名（和文）腕神経叢損傷に対する新開発上肢装着型ロボットを用いた筋再教育訓練の筋電図学的研究

研究課題名（英文）EMG muscle re-educational training using upper limb robotics for BPI

研究代表者

久保田 茂希 (Kubota, Shigeki)

筑波大学・医学医療系・准教授

研究者番号：90763798

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：腕神経叢損傷を受傷し肘屈曲再建術（肋間神経移行術）が施行された6症例に対して、術後肘屈曲筋である上腕二頭筋が筋力[1]に達した時点から、上肢HALを用いたバイオフィードバック訓練を実施した。6症例に対して、上肢HAL訓練中の上腕二頭筋MMT1、2時の筋活動を、無線筋電図計測機器を用いて計測しHAL装着時・非装着時で比較した。HAL装着時、非装着時での上腕二頭筋筋活動は、最大収縮時に対して各々 $75.1 \pm 22.8\%$ 、 $60.3 \pm 16.8\%$ であり、HAL装着時が有意に高値を示した。腕神経叢損傷に対して、上肢HALを用いた肘屈曲訓練は筋電図学的に良質なバイオフィードバック訓練となりうる可能性が示唆された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

肘屈曲再建術が行われた腕神経叢損傷者に対して、上肢HALを用いたバイオフィードバック訓練は、非装着時に比べて上肢HAL装着時が有意に高値を示したため、筋電図学的に良質なバイオフィードバック訓練となり、従来のバイオフィードバック療法よりも、上肢HALを用いた訓練が筋電図学的に優れる訓練手法である可能性が示唆された。今後、本研究は、被検者数をさらに増加し、またより高い訓練効果が見込める訓練手法の探索や、回復メカニズムに関する解析研究を予定している。本研究の成果を国内・外学会・国際ジャーナルに対して投稿・公表し、社会的意義を果たす予定である。

研究成果の概要（英文）：The cases of six patients in whom elbow flexor reconstruction (intercostal nerve transfer) for brachial plexus injury (BPI) was started the upper limb single-joint Hybrid Assistive Limb (upper limb HAL-SJ) training postoperatively. All patients could implement elbow training using the upper limb HAL-SJ even in MMT grade 1 of their elbow flexion power. Furthermore, in six patients, we measured muscle activity of the biceps at the times of MMT grade 1 and 2. Elbow flexion was measured using a wireless surface EMG system, and results with and without HAL were compared. Mean amplitude of biceps with/without HAL during elbow flexion were $75.1 \pm 22.8\%$ and $60.3 \pm 16.8\%$, respectively. The biceps mean amplitude measurements with HAL was significantly higher than without HAL. Our results suggest that biofeedback training with upper limb HAL is a potential electromyographic effective robotic training method after BPI.

研究分野：リハビリテーション医学

キーワード：ロボットリハビリテーション

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

腕神経叢損傷は、上肢機能の廃絶をきたす著しい片側上肢機能障害を残す重篤な外傷である。腕神経叢損傷における、代表的な肘屈曲機能再建術である肋間神経移行術による肘屈曲機能再建の成績は、およそ 60-80%で肘関節屈曲動作が可能となる。しかしながら、その一方で回復不良例も存在し、肘屈曲力が十分でない症例や、肘屈曲動作が可能であっても筋収縮の持続時間が短く日常生活の補助手にさえ至らない症例が散見され、新しい技術による機能回復が望まれる。肋間神経移行術後、肋間神経により再神経支配された上腕二頭筋の運動調節機構において最も重要となるのは呼吸運動と肘関節随意運動との分離である。肋間神経移行術後のリハビリテーションにおいて問題となるのは、上位型麻痺患者においては上腕二頭筋と上腕三頭筋の同時収縮(共収縮)が発生すること、呼吸性運動と随意性運動の分離に時間を要することが挙げられる。肋間神経移行術後 6-8 ヶ月で上腕二頭筋に筋収縮が認められた時点(再神経支配後)で従来の筋電図バイオフィードバック療法(従来療法)が実施される。本従来療法は、肋間神経支配である呼吸運動と分離独立し随意的な肘関節屈曲運動を再獲得することを目的とする。再神経支配筋に電極を貼付し筋収縮波形をモニターに映し出すのみであり、実際の肘関節運動は起こらず従来療法の欠点である。この従来療法を改良し、新たなバイオフィードバック療法を構築すれば、より効果的な肘屈曲力が得られると予測できる。

筑波大学で開発されたロボットスーツ HAL (Hybrid Assistive Limb) はコンピュータ制御下にヒトの動作についてのセンシング機能とモーターによるアシスト機能を合わせ持ち、装具同様にバッテリーを含めて身体の外に装着し、必要に応じた動作の補助をおこなうことができる外骨格装着型動作支援ロボットである。肘関節に装着するタイプである上肢動作支援ロボット(上肢 HAL) は、肘屈曲・伸展運動といった単関節の動作支援を可能にした構造である。この上肢 HAL の特徴は、上腕二頭筋と上腕三頭筋に貼付された各々の表面電極から筋活動電位を検出し、肘関節屈曲・伸展の随意的関節運動をリアルタイムにアシストできることである。本機能により、上肢 HAL を用いた新しいバイオフィードバック訓練は、上述した肋間神経移行術後リハビリテーションの課題 両者を克服できる可能性がある。

2. 研究の目的

腕神経叢損傷は上肢機能の廃絶をきたす重篤な外傷である。これまでに様々な手術法が考案され、上肢機能再建術が行われているが、再建できる機能には限界がある。また機能再建後、良好な成績が得られたとしても、健手の補助手レベルに留まり、より良好な機能回復を実現する新しい技術開発が望まれる。本研究は、腕神経叢損傷における肘屈曲再建術である肋間神経移行術に対して、ロボットを用いた新たなバイオフィードバック技術を用い、その筋電図学的有効性を明らかにすることである。

3. 研究の方法

本研究では、腕神経叢損傷後、肋間神経移行術を含む肘屈曲機能再建術が施行された外来患者 10 例に対して、肘屈曲再建術後 6-8 ヶ月に外来診察において、肘関節屈曲力が筋力 MMT 1 となった時点で、上肢 HAL と従来の通常装置によるバイオフィードバック訓練を実施し、その筋電図学的比較を行う。訓練方法：上腕二頭筋と上腕三頭筋の筋腹に上肢 HAL 表面電極を貼付し、上肢 HAL を作動させ、座位にて、体幹、患側上肢近位部が安定する姿勢下で実施する。訓練頻度：週 1 回から 2 週 1 回の頻度で、外来通院にて上肢 HAL 訓練を、筋力 3 に到達するまで実施する。筋電図学的評価：再神経支配された肘屈曲筋(上腕二頭筋)について、上肢 HAL 装着肘屈曲中の筋活動電位を、無線筋電図センサーを用いて評価する。同様に従来の通常装置を用いたバイオフィードバック訓練中の筋活動電位を評価し、両者を比較する。

4. 研究成果

我々は、研究目的を達成するべく、2015 年から受傷から長期が経過した慢性期症例や肘屈曲再建術が施行され再神経支配が得られた直後の腕神経叢損傷患者に対して、上肢 HAL®を用いた上肢ロボットリハビリテーションを実施してきた。これまでに、受傷から平均 52.7 カ月(4 カ月~23 年)が経過した腕神経叢損傷患者 13 例(平均年齢 35.8 歳)に対して、上肢 HAL®を用いたロボットリハビリテーションを実施した。損傷型は C5-6 型(上位型) 4 例、C5-7 型 1 例、C5-8 型 1 例、全型 7 例、手術は肘屈曲再建術 12 例(肋間神経 筋皮神経移行術 7 例、肋間神経 胸背神経移行術 1 例、尺骨神経部分移行術 2 例、遊離神経移植術 2 例)、保存治療は 1 例であった。

全 13 例に対して上肢 HAL を用いた肘屈曲訓練を外来通院にて週 1 回～月 1 回の頻度で実施し、有害事象の有無を調査した。HAL 開始時は、受傷から平均 49.5 カ月(4 カ月～23 年)が経過していた。肘間神経 筋皮神経移行術 7 例について、本研究開始から現在までに、術後再神経支配が得られ上腕二頭筋筋力[1]に到達した時点から上肢 HAL 訓練を開始した症例は 5 例であり、HAL 訓練開始前・終了後・最終観察時(平均 23 カ月)での肘屈曲力、上腕二頭筋筋力[3]までの到達期間を調査した。また 5 例に対して、上肢 HAL 訓練中の上腕二頭筋 MMT1、2 時の筋活動(平均振幅)を、無線筋電図計測機器を用いて計測し HAL 装着時・非装着時で比較した。全例で重篤な有害事象なく上肢 HAL を用いた訓練が可能だった。HAL 実施回数は、平均 21.2 回であった(7～52 回)。筋力[1]から HAL を開始した 5 例について、肘屈曲力(MMT)は HAL 開始前 1 から 3 へ改善し、最終観察時(平均 23 カ月)は MMT4 が 3 例、3 が 2 例であった。筋力[3]までの到達期間は 14.2 カ月であった。5 例中 1 症例における症例詳細と筋電図学的解析結果を以下に示す。20 歳代男性、バイク事故にて左腕神経叢引き抜き損傷を受傷し、受傷後 3 カ月で肘間神経移行による肘屈曲再建術が行われた。術後 9 カ月で上腕二頭筋に再神経支配が得られ、筋力[1]まで回復した状態で、上肢 HAL を用いた肘屈曲訓練が開始された。表面筋電図評価では、上腕二頭筋筋力[1]～[2]の時期に、ノラクソン社製無線式筋電図計測装置を用い、肘屈曲を命じた状態の HAL 装着時、非装着時、HAL 装着 5 秒間肘屈曲時、通常バイオフィードバック療法施行時の上腕二頭筋筋活動(平均振幅)を、最大随意収縮法(%MVC 法)にて正規化し解析した(図 1)。結果、上肢 HAL 訓練を 40 回実施した。肘屈曲を命じた状態での HAL 装着時、非装着時での上腕二頭筋筋活動は、MVC と比較し各々 $76.1 \pm 28.9\%$ 、 $62.1 \pm 31.5\%$ であり、HAL 装着時が有意に高値を示した(図 2)。また、HAL 装着 5 秒間肘屈曲時、通常バイオフィードバック療法施行時は、各々 $69.3 \pm 22.7\%$ 、 $63.3 \pm 27.0\%$ であり、両者間に有意差はなく同等であった(図 2)。HAL 装着肘屈曲時の上腕二頭筋筋活動は、非装着での肘屈曲時に比し、有意に高値を示したため、腕神経叢損傷後肘間神経移行術による肘屈曲再建術後患者において、上肢 HAL を用いたバイオフィードバック訓練は、筋電図学的に良質かつ有効的な訓練ツールとなりえる可能性が示唆された。本筋電図学的解析結果では、HAL 装着肘屈曲時(肘屈曲可、求心性収縮)の上腕二頭筋筋活動は、非装着での肘屈曲施行時(肘屈曲不能、等尺性収縮)に比し、有意に高値を示した。このことは上肢 HAL を用いた BF 訓練が筋電図学的に質の高い有効的な BF 訓練であることを示唆する。再神経支配後超早期から実際に肘関節運動が発現することで、脳運動中枢と四肢運動のシンクロナイズが容易となり(筋収縮のコツがつかみ易いなど)、中枢神経の可塑性を良好に引き出した可能性が考えられる。HAL 装着 5 秒間肘屈曲時(求心性収縮)の上腕二頭筋筋活動は、通常 BF 施行時(等尺性収縮)に比べやや高値を示したが、有意差はなく同等であった。このことは、HAL 装着時は求心性収縮であり 5 秒間の前半で収縮が完了し後半は収縮が減衰したことがその原因と考えられるが、症例数増加が必須であり、更なる検討が必要である。今後も症例数を重ね、またヒストリカルコントロール群との比較が必要と考えている。従来のバイオフィードバック療法よりも、上肢 HAL を用いた訓練が有効的な訓練手法であること証明したい。

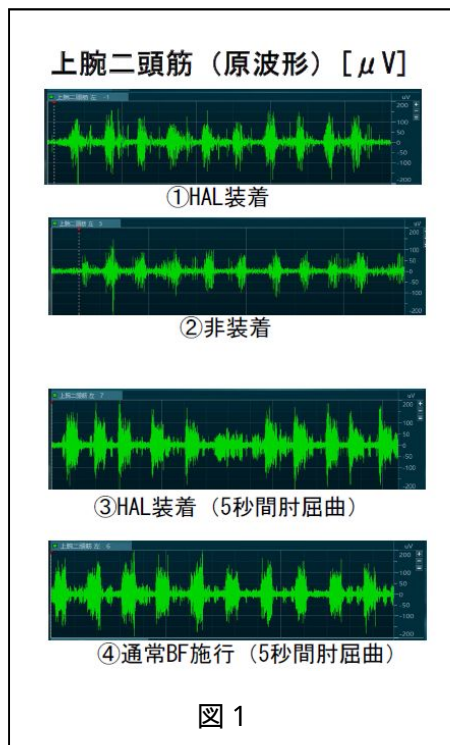


図 1

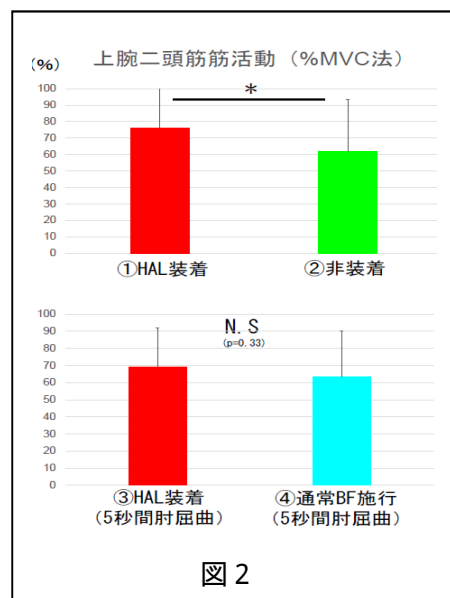


図 2

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Margaux Lafitte, Kadone H, Kubota S, Shimizu Y, Chun Kwang Tan, Koda M, Hada Y, Sankai Y, Suzuki K, Yamazaki M. | 4. 巻 9 |
| 2. 論文標題 Alteration of muscle activity during Voluntary Rehabilitation training with single-joint Hybrid Assistive Limb (HAL) in patients with shoulder elevation dysfunction from cervical origin | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Front Neurosci | 6. 最初と最後の頁 16:817659. |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3389/fnins.2022.817659 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|--|--------------------------|
| 1. 著者名 Soma Y, Mutsuzaki H, Yoshioka T, Kubota S, Shimizu Y, Kanamori A, Yamazaki M. | 4. 巻 21 |
| 2. 論文標題 Single-joint type hybrid assistive limb in knee rehabilitation after ACL reconstruction: an open-1 label feasibility and safety trial | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Prog Rehabil Med. | 6. 最初と最後の頁 7:20220036 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2490/prm.20220036 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

| | |
|---|-------------------|
| 1. 著者名 Kubota S, Kadone H, Shimizu Y, Koda M, Noguchi H, Takahashi H, Watanabe H, Hada Y, Sankai Y, Yamazaki M | 4. 巻 58(3) |
| 2. 論文標題 Development of a new ankle joint hybrid assistive limb | 5. 発行年 2022年 |
| 3. 雑誌名 Medicina (Kaunas) | 6. 最初と最後の頁 395 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/medicina58030395 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難 | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件／うち国際学会 1件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 久保田茂希, 久保匡史, 清水如代, 門根秀樹, 山崎正志 |
| 2. 発表標題 肘屈曲再建術が施行された腕神経叢損傷全型麻痺1症例に対する上肢HALの筋電図学的検討 |
| 3. 学会等名 第55回日本作業療法学会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 久保田茂希, 門根秀樹, 清水如代, 原友紀, 久保匡史, 菅谷久, 吉岡友和, 羽田康司, 山海嘉之, 山崎正志 |
| 2. 発表標題 腕神経叢損傷に対する上肢単関節HALを用いた機能回復治療の訓練実行可能性 |
| 3. 学会等名 第93回日本整形外科学会学術総会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 久保田茂希, 門根秀樹, 清水如代, 原友紀, 羽田康司, 山崎正志. |
| 2. 発表標題 腕神経叢損傷患者に対する上肢Hybrid assistive limb (HAL)を用いたバイオフィードバック訓練 |
| 3. 学会等名 第37回日本整形外科学会基礎学術集会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 久保田茂希, 門根秀樹, 清水如代, 山崎正志. 腕神経叢損傷患者に対する上肢HALを用いた筋再教育バイオフィードバック訓練 |
| 2. 発表標題 腕神経叢損傷患者に対する上肢HALを用いた筋再教育バイオフィードバック訓練 |
| 3. 学会等名 第11回日本脳神経HAL研究会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 久保田茂希, 門根秀樹, 清水如代, 原友紀, 羽田康司, 山崎正志 |
| 2. 発表標題 腕神経叢損傷患者における上肢HALバイオフィードバック訓練に対する筋電図学的検討. |
| 3. 学会等名 第59回日本リハビリテーション医学会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Kubota S, Kadone H, Shimizu Y, Kubo T, Matsumoto Y, Yamazaki M |
| 2. 発表標題 A new biofeedback rehabilitation technique using upper limb Hybrid Assistive Limb robot technology in patients with brachial plexus injury |
| 3. 学会等名 2023ORS : Orthopaedic Research Sociaety Annual meeting (国際学会) |
| 4. 発表年 2023年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |
|---------------------------|-----------------------|----|
|---------------------------|-----------------------|----|

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|
|---------|---------|