

令和 4 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究(萌芽)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K22855

研究課題名(和文)慢性期脳卒中患者における麻痺肢の学習性不使用を制御するリハビリシステム創成

研究課題名(英文)Development of Rehabilitation System That Controls Learned Non-use of Paretic Arm in Chronic Patients with Stroke

研究代表者

大脇 大(Owaki, Dai)

東北大学・工学研究科・准教授

研究者番号：40551908

交付決定額(研究期間全体):(直接経費) 5,000,000円

研究成果の概要(和文):本研究の目的は、脳卒中患者に対するリハビリにおける最大の障壁「麻痺肢の学習性不使用」を克服するリハビリシステムを開発することにある。慢性期脳卒中片麻痺患者は、麻痺肢の機能低下、健側肢の過剰使用により、麻痺肢を使用しないことを学習し使用頻度が低下することが知られており、学習性不使用と呼ばれる。この学習性不使用は、脳に負の使用頻度依存可塑性を生じさせ、麻痺肢の運動制御に関わる脳領域が縮小する。この変化により、使用頻度がさらに低下することで、さらなる機能低下を助長する。本研究では、麻痺肢の使用頻度依存可塑性を制御するため、表面筋電位計による両肢の使用状況を計測するウェアラブルセンサを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脳卒中(脳血管疾患)は、日本人の死因第4位、年間死亡数は約12万人、総患者数111万5000人、年間29万人以上が発症すると試算されている。要介護になる要因の第2位(約20%)、国民医療費は約1兆8000億円となっている(2017年厚生労働省)。脳卒中は脳組織にダメージを与える疾患であるため、上下肢の運動麻痺が主症状としておこり、15-30%の患者が恒久的な機能障害を呈する。社会復帰のためにはリハビリが必要となる。本研究成果が発展することにより、QOL(Quality of Life)を向上させる上肢機能の回復をもたらす。多くの脳卒中患者の福音となり社会的意義も大きい。

研究成果の概要(英文):The purpose of this study is to develop a rehabilitation system to overcome the greatest barrier in rehabilitation for stroke patients, "learned non-use of the paretic arm". Chronic stroke patients with hemiplegia are known to learn not to use the paretic arm due to functional decline of the paretic arm and excessive use of the healthy arm, which is called "learned non-use". This learned non-use causes negative use-dependent plasticity in the brain, resulting in the shrinkage of brain regions involved in motor control of the paretic arm. This change further reduces the frequency of use of the paretic arm, which contributes to further functional decline. In this study, we developed a wearable sensor that measures the use of both arm by surface electromyography (EMG) in order to control use-dependent plasticity of the paretic arm.

研究分野：ニューロリハビリテーション

キーワード：慢性期脳卒中患者 学習性不使用 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

麻痺発症後にリハビリを妨げる要因の一つとして、学習性不使用が挙げられる [1]. 学習性不使用とは、麻痺側の機能低下による使用頻度の低下や健側の過剰な使用により、麻痺側を使用しないことを学習することを意味する. 学習性不使用は、脳に「負」の使用頻度依存可塑性 (Use-dependent plasticity) [2,3]を生じさせ、麻痺側の運動制御に関わる脳領域が縮小する. これにより更なる麻痺側の機能低下が発生し、麻痺からの回復がより困難なものになる.

学習性不使用に対するリハビリ治療法として Constraint-Induced (CI)療法 [4,5]が知られている. CI療法とは健側上肢を拘束し、強制的に麻痺側上肢の使用を促し、機能の改善を図る治療法である. CI療法により麻痺側の機能が有意に改善されたことが報告されている [6]. また麻痺した機能の回復のためにはリハビリ中の麻痺側の使用頻度を知ることが重要であるため、加速度計を用いた上肢の使用頻度を評価する研究が行われている [7]. これらの問題として、CI療法は不自然に健側を拘束しなければならないことや加速度計を用いた使用頻度評価では随意・不随意運動の区別がつかないことが挙げられる.

2. 研究の目的

本研究では、麻痺肢の学習性不使用を改善するリハビリシステムの構築を目指し、その初期段階として、日常生活動作における両上肢の使用頻度を筋電位計を用いて定量的に評価することを目的とした. この目的のため、日常生活においても両上肢の筋活動を計測可能なウェアラブル筋電位計を開発した. また得られた筋電位データから筋肉の使用頻度を定量的に評価する指標を考案した.

3. 研究の方法

(1) ウェアラブル筋電位計測システム

筋電位の測定には SparkFun 社の MyoWare 筋電センサを用いた. 筋電位信号は M5Stack 製のマイコン M5Stack gray でデジタル信号に変換して、PC に UDP 通信により送信し保存した. サンプリング周波数は 500[Hz]で計測した. 信号処理を施し閾値処理によりスパイク数を算出して筋活動を評価した. 図 1 に筋電位計システムと筋電位計の装着例を示す.

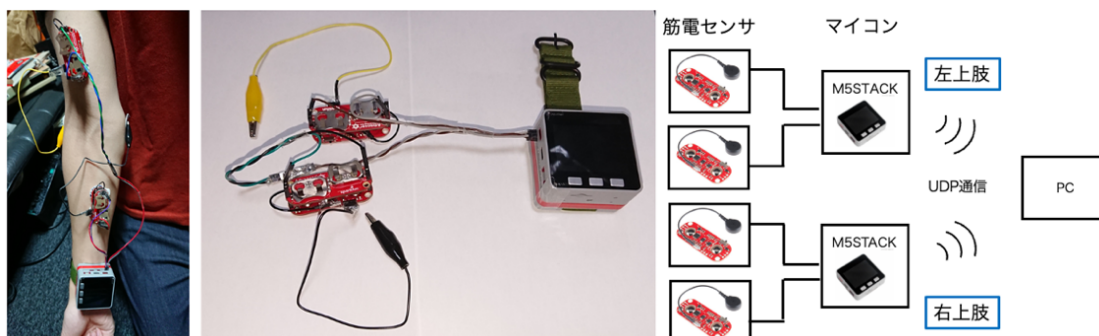


図 1: 開発したウェアラブル筋電位センサと計測システム

(2) 筋電位信号処理

本実験では筋電位信号に対して閾値を決定し、その閾値を超えた信号をスパイクとして検出する. 最初に、信号から移動平均を減算し平坦化処理を施した. スパイク判定の閾値(V_{th})は、特定の動作における計測データの全振幅の平均値を \bar{V} 求め、 \bar{V} から定数値 σ を加減したものとした(式 (1)). 定数値は経験的に $\sigma=20[\text{mv}]$ と設定した.

$$V_{th} = \bar{V} \pm \sigma \quad (1)$$

振幅が閾値をこえた振幅データの時間を時間列として保存する．スパイク列導出例を図 2 に示す．上段が平坦化処理を施した筋電位信号と閾値を示しており，下段は検出されたスパイク列である．

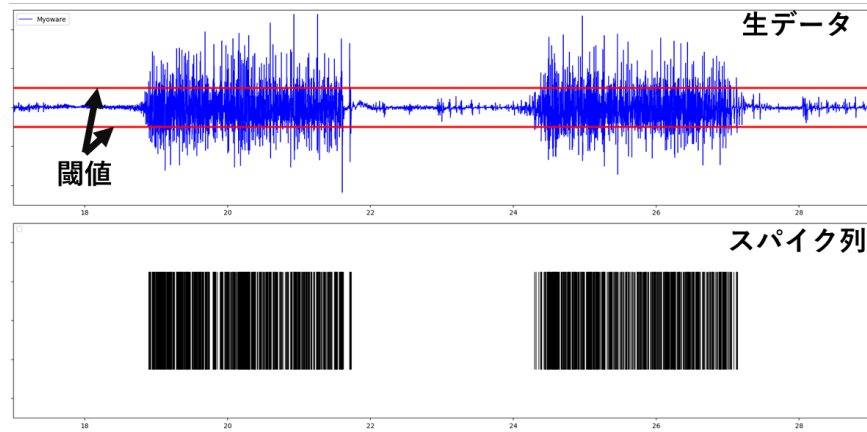


図 2: 筋電位スパイク列の一例

(3) 使用頻度評価

従来の筋活動評価法として $iEMG$ と $\%iEMG$ が用いられている [8]. 計測された筋電信号に対して絶対値処理を行った後, 整流化を行い, 移動平均により平滑化した信号 $ers(t)$ を求める. $iEMG$ は $ers(t)$ を動作を行った時間内で積分することで求められる(式 (2)):

$$iEMG = \int_{t_a}^{t_b} ers(\tau) d\tau \quad (2)$$

筋電信号は筋肉量, センサの貼付位置により変化する. そのため $iEMG$ では異なる筋肉や異なる被験者間での比較はできない. $\%iEMG$ は $iEMG$ を各筋肉の最大随意筋力(MVC)で除することで正規化したものであり, これにより筋肉間や被験者間での比較が可能となる(式 (3)):

$$\%iEMG = \frac{iEMG}{MVC} \quad (3)$$

この手法は計測の度に MVC の測定が不可欠であり, 被験者に身体的・時間的コストを強いる. 加えて日常生活で使用するシステムにおいてはより簡易な計算法が求められる. この問題の解決のため以下のような筋活動評価法を提案した:

(2) において算出したスパイク数は筋電図の振幅や発火頻度に依存すると考えられる. したがってスパイク数から動員された運動単位の程度を推測できる. 特定の動作間のスパイク数の時間平均を計算して平均発火率 (Average Firing Rate: AFR) を求める (式 (4)). 本研究では AFR を筋活動の指標として用いた.

$$AFR = \frac{N_{sp}}{T} \quad (4)$$

ただし, T は特定の動作の継続時間である. N_{sp} は特定の動作間のスパイクの数である.

(4) 日常生活での検査項目

検査項目は日常生活動作(ADL)の評価に用いられる BI(Barthel Index)と上肢の ADL 評価に用いられる THE DASH(Disabilities of Arm, Shoulder and Hand) をもとに決定した. 主に上肢の筋活動評価のために洗顔, 食事, 食器洗浄, 歯 磨き, 整髪, 荷物運搬の 6 つの試験動作を計測した. 調査筋肉は両腕の橈側手根屈筋および上腕二頭筋の計 4ch で行った. 加えて MVC の測定も実施した.

4. 研究成果

5 名の被験者で試験動作の筋電位を計測し, 閾値処理により各動作におけるスパイク数を導出した. 式(4)より AFR を計算して各筋肉の筋活動を比較した.

(1) 既存手法との比較

3 名の計測データから被験者の各動作における iEMG と%iEMG を計算した. 全被験者の全動作間に検出されたスパイク数と iEMG の関係を図 3(a)に示す. またスパイク数と%iEMG の関係を図 3(b)に示す.

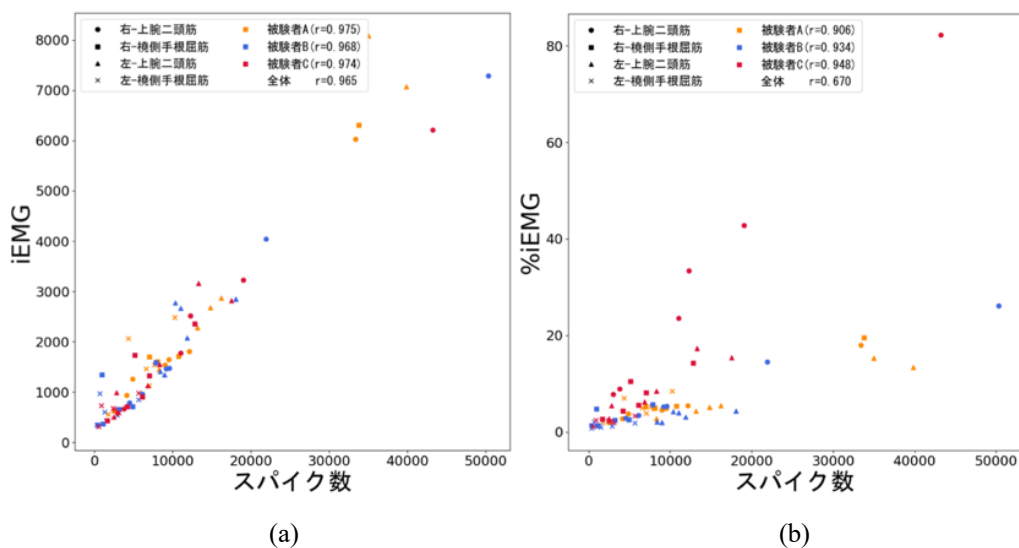


図 3: iEMG, %iEMG とスパイクトレインの関係

色により被験者を区分しており, マーカーの形状により筋肉の部位を区分している. 全被験者のスパイク数と iEMG の相関係数は 0.965 であり, スパイク数と%iEMG の相関係数は 0.670 である. 正規化の結果正の相関が弱くなったことが分かる. 一方, 個人ごとのスパイク数と%iEMG の相関係数は, 被験者 A で 0.906, 被験者 B で 0.934, 被験者 C で 0.948 と強い相関がある. この結果より同一の被験者の筋肉間での使用頻度の比較が十分に可能であることが確認できた.

しかし, 図 3(b)のように全被験者での正の相関が弱くなっていることから異なる被験者間での比較はできないと考えられる. この原因として閾値処理の際に式(1)のように定数値を用いていることが考えられる. 実験時の筋肉や皮膚表面の状態, 皮膚下の脂肪の量によって振幅が変わってしまうので, それを考慮した閾値処理や正規化手法を考える必要があると考えられる.

(2) 日常生活動作における筋活動評価

算出したスパイク数から試験動作ごとに AFR を計算した. 図 4 のレーダーチャートに各被験者の試験動作ごとの AFR を示す. 全被験者に共通して利き手の上腕二頭筋はすべての動作で AFR が高いことが分かる. また非利き手の上腕二頭筋は洗顔, 食器洗い, 荷物運搬といった動作では AFR が高くなる事が分かる. 橈側手根屈筋における AFR は高くならず, 被験者によって動作ごとの筋活動の傾向が異なる結果になった.

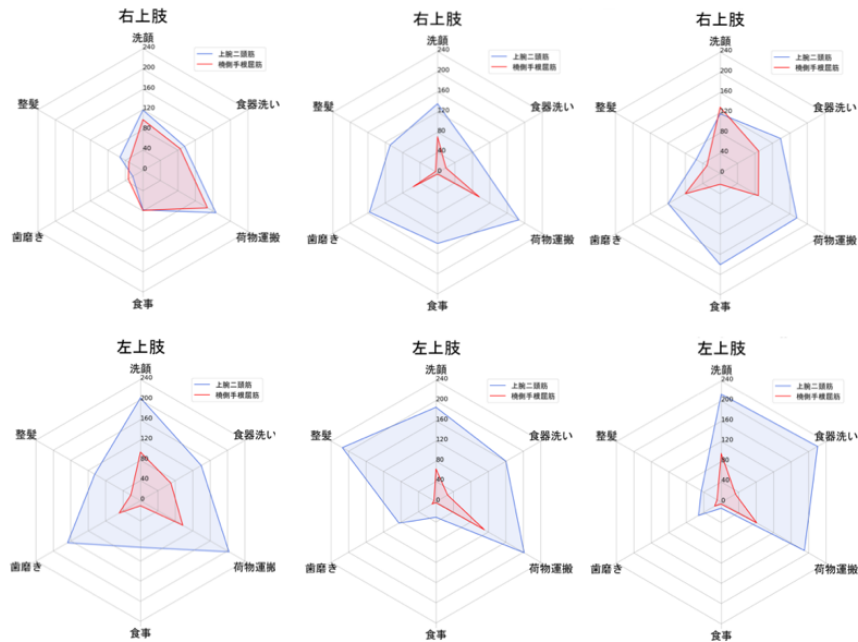


図 4: 日常活動動作における AFR, (左) 被験者 A, 左利き (中) 被験者 B, 右利き (右) 被験者 C, 右利き

これは利き手の上腕二頭筋が様々なものを掴み、移動させる役割を主に担っているからだと考えられる。また非利き手の上腕二頭筋は洗顔、食器洗い、荷物運搬といった両上肢を用いる動作では AFR が高くなり、片手を主に使う動作では AFR が低くなることから、筋活動を定量化できていることが分かる。

本研究では、ウェアラブル筋電位計を用いて日常生活動作の両上肢の筋電位を計測し、平均発火率 (AFR) により筋使用度を定量化した。従来の筋活動評価手法とスパイク数を用いた評価手法の比較により同一の被験者であれば筋肉間の筋活動を比較できることが分かった。しかし異なる被験者間での比較は個人差によりできないものと考えられる。また日常生活動作における筋活動評価により利き手の上腕二頭筋は AFR が大きくなる傾向にあり、非利き手の上腕二頭筋も両上肢を用いる動作では AFR が大きくなる傾向にあることが分かった。

引用文献

- [1] 道免和久, ニューロリハビリテーション, 医学書院, 2015.
- [2] M M Merzenich, J H Kaas, J Wall, R J Nelson, M Sur, D Felleman, "Topographic reorganization of somatosensory cortical areas 3b and 1 in adult monkeys following restricted deaf-ferentation", *Neuroscience*. 1983 Jan;8(1):33-55.
- [3] Dr. Michael M. Merzenich, Randall J. Nelson, Michael P. Stryker, Max S. Cynader, Axel Schoppmann, John M. Zook, "Somatosensory cortical map changes following digit amputation in adult monkeys", *Journal of Comparative Neurology*, Vol 224, Issue 4 pp.591-605.
- [4] R J Nudo, B M Wise, F SiFuentes, G W Milliken, "Neural substrates for the effects of rehabilitative training on motor recovery after ischemic infarct", *Science*. 1996 Jun 21;272(5269):1791-4.
- [5] S L Wolf, D E Lecraw, L A Barton, B B Jann, "Forced use of hemiplegic upper extremities to reverse the effect of learned nonuse among chronic stroke and head-injured patients", *Exp Neurol*. 1989 May;104(2):125-32.
- [6] Steven L Wolf, Carolee J Winstein, et al. "Effect of constraint- induced movement therapy on upper extremity function 3 to 9 months after stroke: the EXCITE randomized clinical trial", pp.2095-2104, 2006.
- [7] Marika Noorkoiv, Helen Rodgers, Christopher I Price, "Accelerometer measurement of upper extremity movement after stroke: a systematic review of clinical studies", *Journal of neuroengineering and rehabilitation* 2014,11:144.
- [8] 小野弓絵, "非侵襲生体信号の処理と解析-IV", システム制御情報学会 62 巻 8 号, pp.337-342, 2018.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 大脇大	4. 巻 23
2. 論文標題 医工学連携を通じたロボティクス装具開発	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 地域ケアリング	6. 最初と最後の頁 48-51
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
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 Yonatan Hutabarat, Dai Owaki, Mitsuhiro Hayashibe	4. 巻 2
2. 論文標題 Quantitative Gait Assessment with Feature-Rich Diversity Using Two IMU Sensors	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Medical Robotics and Bionics	6. 最初と最後の頁 639-648
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMRB.2020.3021132	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 該当する
1. 著者名 Hutabarat Yonatan, Owaki Dai, Hayashibe Mitsuhiro	4. 巻 21
2. 論文標題 Recent Advances in Quantitative Gait Analysis Using Wearable Sensors: A Review	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Sensors Journal	6. 最初と最後の頁 26470 ~ 26487
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/jsen.2021.3119658	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 該当する
1. 著者名 Owaki Dai, Sekiguchi Yusuke, Honda Keita, Izumi Shin-Ichi	4. 巻 11
2. 論文標題 Two-Week Rehabilitation with Auditory Biofeedback Prosthesis Reduces Whole Body Angular Momentum Range during Walking in Stroke Patients with Hemiplegia: A Randomized Controlled Trial	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Brain Sciences	6. 最初と最後の頁 1461 ~ 1461
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.3390/brainsci11111461	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Sekiguchi Yusuke, Honda Keita, Owaki Dai, Izumi Shin-Ichi	4. 巻 11
2. 論文標題 Classification of Ankle Joint Stiffness during Walking to Determine the Use of Ankle Foot Orthosis after Stroke	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Brain Sciences	6. 最初と最後の頁 1512 ~ 1512
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/brainsci11111512	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Owaki Dai, Manoonpong Poramate, Ayali Amir	4. 巻 9
2. 論文標題 Editorial: Biological and Robotic Inter-Limb Coordination	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Robotics and AI	6. 最初と最後の頁 875493
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/frobt.2022.875493	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 該当する

1. 著者名 Otaki Ryoji, Oouchida Yutaka, Aizu Naoki, Sudo Tamami, Sasahara Hiroshi, Saito Yuki, Takemura Sunao, Izumi Shin-Ichi	4. 巻 15
2. 論文標題 Relationship Between Body-Specific Attention to a Paretic Limb and Real-World Arm Use in Stroke Patients: A Longitudinal Study	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Frontiers in Systems Neuroscience	6. 最初と最後の頁 806257
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3389/fnsys.2021.806257	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 菅井諒
2. 発表標題 ウェアラブル表面筋電位計を用いた日常動作における両上肢の筋活動評価
3. 学会等名 ロボティクス・メカトロニクス講演会2021 in Osaka
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大脇大
2. 発表標題 片麻痺患者の歩行の運動学的理解に基づくモデルベースト・リハビリテーション
3. 学会等名 日本臨床神経生理学会学術大会 第50回記念大会（招待講演）
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Dai Owaki
2. 発表標題 Robotic and Biological Interlimb Coordination
3. 学会等名 Dynamic Walking 2021（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

Neuro-robotics Lab., Tohoku University http://neuro.mech.tohoku.ac.jp 大脇大webサイト http://oscillex.org/researchmap https://researchmap.jp/embodiment2004
--

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
研究分担者	大内田 裕 (Oouchida Yutaka) (80510578)	大阪教育大学・教育学部・准教授 (14403)	

6. 研究組織（つづき）

	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
研究協力者	菅井 諒 (Sugai Ryo)		
研究協力者	大瀧 亮二 (Otaki Ryoji)		
研究協力者	林部 充宏 (Hayashibe Mitsuhiro)		

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