

令和元年6月13日現在

機関番号：17501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16K01555

研究課題名(和文) 手指分離運動を目指した電気力覚ハイブリッド刺激型ニューロリハシステム

研究課題名(英文) Hybrid system of electric stimulation and haptic feedback to advance rehabilitative training for independent movement of wrist and fingers

研究代表者

菊池 武士 (Kikuchi, Takehito)

大分大学・理工学部・教授

研究者番号：10372137

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：手指の分離独立運動を再獲得するための手指リハビリテーションロボット(ReRoH)を開発した。ReRoHには、手首への力覚制御用の電気粘性流体ブレーキと、麻痺手の手指への刺激のための電気刺激装置が搭載されている。また、手指の運動計測のためにLeap Motionセンサーを採用している。実験の結果、手指の刺激に適した電圧値、および部位を決定した。刺激に適した部位は総指伸筋であったが、総指伸筋の動きは四指と手首の両方に影響するため、これらを分離することは困難であった。すなわち、電気刺激による手首、四指への同時刺激と、ERブレーキによる手首への単独刺激を組み合わせる必要性が確認された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

脳卒中患者が日常生活動作を獲得する上で、上肢(肩とひじ)による運動だけでなく、手指(手首と指)による把持動作の獲得が重要である。特に手首と指の動作は、腱の走行など空間的制約によって干渉が生じるため、分離した運動の獲得が難しい部位である。本研究では手指の分離独立運動を再獲得するための手指リハビリテーションロボット(ReRoH)を開発した。ReRoHは、総指伸筋への電気刺激による手首、四指への同時刺激と、ERブレーキによる手首への単独刺激を組み合わせ、それぞれの独立運動の再獲得を目指した新しいリハビリテーション法を提供する。

研究成果の概要(英文)：The rehabilitation robot for hand, "ReRoH," was developed in order to advance rehabilitative training for independent movement of wrist and fingers. The ReRoH consists of a main body, an external controller and a game controller. The ReRoH installs an ER Brake to generate senses of force to wrists, and an electric stimulation (ES) to stimulate paralyzed muscle of a wrist and fingers. The ReRoH also installs a Leap Motion sensor for hands coordinate. We investigated the optimal area of the sensor. By using this sensor, we suggested a new way to assess motor functions of fingers and hands. We experimentally investigated optimal muscle for the ES and effect of its voltage. According to the results, common digital extensor muscle is the best muscle for its purpose, but it is also cleared that the independent stimulation for a wrist or fingers may be impossible. It is important to use the ES and a force stimulation by ER brake for ReRoH.

研究分野：福祉工学

キーワード：福祉工学

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

脳卒中患者が日常生活動作を獲得する上で、上肢(肩とひじ)による運動だけでなく、手指(手首と指)による把持動作の獲得が重要である。特に手首と指の動作は、腱の走行など空間的制約によって干渉が生じるため、分離した運動の獲得が難しい部位である。申請者は、高精度力制御が可能な ER 流体ブレーキを搭載し、ブレーキのみによる安全性の高い上肢リハビリ支援ロボット SEMUL を開発してきた。また、非侵襲的な経皮的電気刺激(以下、電気刺激)との併用についても検討している。しかし、この取り組みでは手指を対象としていない。手指を対象とした訓練装置としても、NESS をはじめとして電気刺激の利用が注目されている。しかし、従来の電気刺激装置は前腕の筋が集中していることと機能重複していることから手指の分離刺激が困難である。

2. 研究の目的

そこで本研究では電気刺激による手指の集団的屈曲/伸展の促進に加え、申請者らがこれまで培ってきた ER 流体ブレーキによる高精度力覚刺激を組み合わせたハイブリッド刺激型手指ニューロリハ装置を開発し、総指伸筋への電気刺激による手首、四指への同時刺激と、ER ブレーキによる手首への単独刺激を組み合わせ、それぞれの独立運動の再獲得を目指した新しいリハビリテーション法を提供する。

3. 研究の方法

本研究では手指、手首の協調動作から分離学習までの効率的なリハビリテーションや、それらの評価を行うことができる新しいリハビリテーションロボット(Rehabilitation Robot for Hand, ReRoH)を開発した。ReRoH は手指の伸筋への電気刺激と、ER 流体ブレーキによる手首へのトルク刺激を組み合わせた電気-力覚ハイブリッド刺激が可能である。まず、電気刺激位置の検討を行った。また、長期にわたるリハビリテーションでは患者のドロップアウト率を抑えることも重要である。そこで、ゲーム性を持たせた訓練プログラムの開発も行った。

4. 研究成果

(1) システム概説

ReRoH システムの外観を図 1 に示す。本装置は、手指姿勢計測センサ(Leap Motion)、手首関節計測用エンコーダ、手首力覚刺激用 ER 流体ブレーキ、手指力覚刺激用空気圧グローブ、電気刺激装置(DENKEN, Drive)、肘固定台、各要素の制御用マイコン(Arduino Due)、訓練アプリケーションのグラフィックおよび患者データ管理用 PC 等から構成される。Leap Motion は手首とともにターンテーブル上に固定した(図 1)。これにより、手首が掌背屈しても常に掌を撮影可能とした。Leap Motion は指関節の運動計測のみを行い、手首の掌背屈は別途エンコーダによって計測する(図 2)。

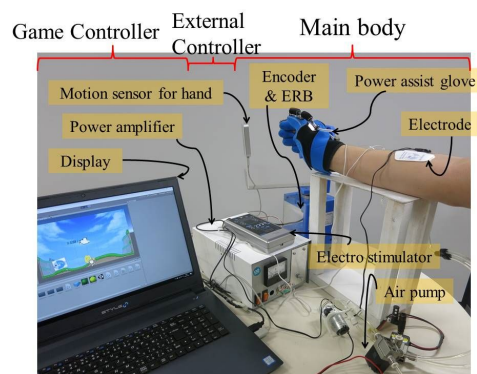


Fig. 1 Rehabilitation Robot for Hand "ReRoH"

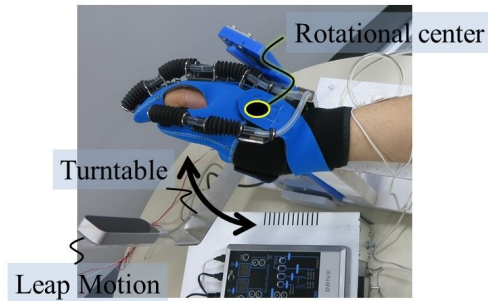


Fig. 2 Hand posture sensor for ReRoH

(2) 電気刺激位置の検討

目的

脳卒中片麻痺者の上肢運動障害の特徴として、屈曲優位の共同運動パターンが知られている。すなわち、関節ごとの独立した運動と伸展方向の運動が困難となる。上肢運動リハの目的は、この関節ごとの独立運動と伸展の再学習であり、特に手指に関して言えば、指を開くことと手首を背屈することが重要である。ReRoH では電気刺激を用いた手首の背屈、手指の伸展動作の補助を行うが、その電気刺激位置に関して検討する。手指の伸筋に関しては解剖学的に下記が代表となる。

【 】手首の背屈筋

手首の背屈には尺側手根伸筋、長撓側手根伸筋、短撓側手根伸筋の3つの筋が関連する。

【 】4指の伸展筋

母指以外の4指の伸展には総指伸筋、小指伸筋、指示伸筋、骨間筋、虫様筋の5つの筋が関連する。

この中でも特に各動作に与える影響の大きいと考えられる筋に対して電気刺激を与える実験を行った。実験の対象筋は【 】手首の背屈筋として尺側手根伸筋(Extensor carpi ulnaris muscle)、【 】4指の伸展筋として総指伸筋(Common digital extensor muscle)を選定した(図3)。電気刺激で筋をそれぞれ独立して制御できるか調査する。

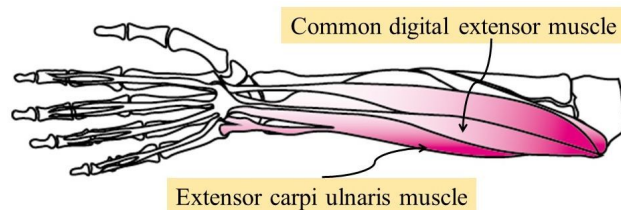


Fig. 3 Target muscles

方法

20代の健常男性5名(A~E)を対象とした。刺激装置としてDENKEN製DRIVEを用いた。刺激面積の小さい電極では伸展、屈曲動作が見られなかったため、面積の広い日本光電製心電図モニタ用ディスク電極 VitrodeT T-50を用いた。電気刺激は15V、16.2V、18V、幅100 μ s、100Hzのパルスを用いた。被験者の尺側手根伸筋、および総指伸筋の筋腹を触診で探し、電極を貼付した。それぞれの筋の触診法は以下のとおりである。

【 】尺側手根伸筋

被験者の手を握り、肘を90度屈曲させ、尺骨体を探し出す。その後、尺骨体を離れ外側へと指を滑らせて、尺側手根伸筋の細い筋腹へ移動する。そして、抵抗力に逆らって手関節を内転させるように被験者に頼む。この動作で尺骨のすぐ外側にある組織が固くなることに注意する。最後に、尺骨頭遠位へと腱をたどる。

【 】総指伸筋

被験者の手を握り、肘を90度屈曲させ、撓側手根伸筋繊維を離れ、指を外側へと滑らせる。その後、前腕を移動しながら指伸筋の平らな表面を触診する。指伸筋繊維を横切るようにローリングする。そして、手関節と指を伸展させるように被験者に頼む。指伸筋の筋腹を分離する。最後に、手の背側にある指伸筋の腱を遠位へとたどる。

触診後、被験者の手に橈骨上の前腕部側面、CM関節、MP関節、PIP関節にマーカーを付ける(図4)。

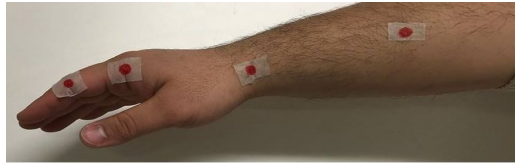


Fig. 4 Positons of marks

決定した刺激パラメータを用い，電圧を徐々に高くしていきながら電気刺激を行う．被験者が痛みを感じた場合は刺激を中断し，痛みを伴わない刺激で角度計測を行う．その様子をビデオカメラで撮影する（図5）．

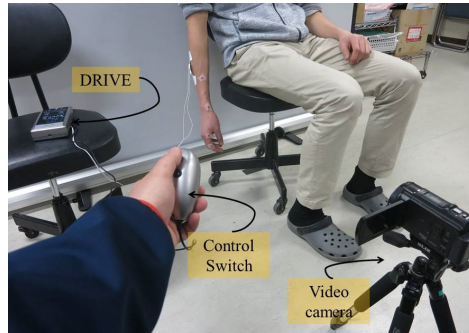


Fig. 5 Experimental setup

撮影した映像から，CM 関節，MP 関節の関節角度の変化量を求める．また，同時に NRS（Numerical Rating Scale）評価スケールを用いて刺激に痛みが伴うか聞き取り調査を行った．

結果

尺側手根伸筋に対する電気刺激では，2名の被験者が電圧8Vの段階で痛みを訴えるなど，多くの被験者が検証の早期段階で NRF 評価スケールにおける中程度の痛みを訴えた．手の内側の方が外側よりも刺激に敏感であると思われる．すべての被験者が手首の背屈以外に，尺屈動作も示した．尺屈動作に関しては ReRoH の訓練目的外の運動であるが，ReRoH のハンドレスト構造によってこの運動の影響はほとんどない．別の問題として，4名の被験者で屈曲筋との同時収縮を示した．これは刺激位置が手の内側に近くなり，屈筋を同時に刺激してしまったことが原因と考えられる．

総指伸筋に対する電気刺激では，すべての被験者が12Vの電気刺激は痛みもなく問題ないと答えた．18Vの電圧の刺激でも問題なく耐えられる被験者も2名おり，総指伸筋への電気刺激は尺側手根伸筋に対する電気刺激よりも痛みが出にくい．総指伸筋は4指の伸筋であるが，腱が手首の上を通るため手首の背屈にも関連する．すべての被験者が電気刺激を与えた際，4指の伸展と同時に手首の背屈動作も示した．総指伸筋に電気刺激を与えた際の CM，MP 関節角度の変化量を以下の表1に示す．

Table 1 Experimental results

Subject	Volt.[V]	CM [°]	MP [°]	NRS
A	15	27	31	0
	16.2	57	47	2
	18	59	48	2
B	12	14	5	0
	15	47	-7	0
	16.2	55	34	5
C	15	35	35	2
	16.2	37	30	2~3
	18	35	39	3
D	12	22	3	2
E	12	22	10	2
	15	25	11	4

考察

手首の背屈を単独に行わせることを目的として尺側手根伸筋への電気刺激を検討したが，痛

みを感じやすい，屈筋との同時収縮が起こりやすいなどの問題が見られた．総指伸筋に関しては，痛みを感じにくく指の伸展を誘発しやすいが，手首の背屈も連動してしまうことが分かった．以上の結果から，現状として手首の背屈と指の伸展を独立して誘発する刺激位置は見られなかった．ReRoH では，手首への刺激としてER 流体ブレーキによる力覚刺激を，また手指への力覚刺激として空気圧グローブを使用し，電気刺激を補うハイブリット方式を提案していた．今回の結果は，その方式の必要性を示すものとなった．今後，ReRoH への電気刺激としては，総指伸筋への刺激が最も有効と考えるが，電圧・周波数調整法に関しては別途検討が必要である．

(3) 訓練アプリケーション

リハビリ訓練は苦痛や忍耐を伴うことから，ドロップアウト率を低減するための工夫が必要となる．そこで ReRoH を用いた動機付けのための訓練アプリケーションを開発した．訓練中に表示される画面を図6に示す．

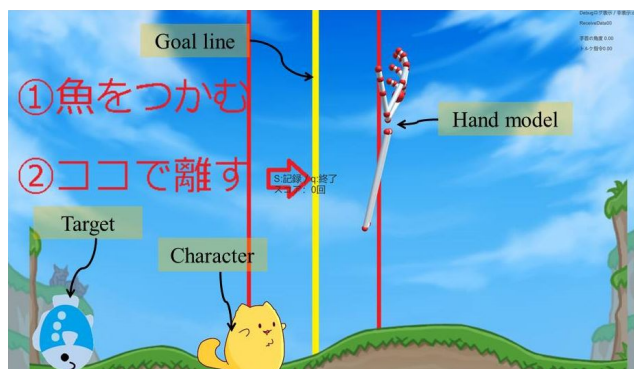


Fig. 6 Scene of training program

ゲームデザインの基本として，ゲームには目的，障壁，演出が必要と言われている．まずこのゲームの目的は，手首と指の独立運動の獲得である．それを達成するための演出として，手首の掌背屈により左右に移動するキャラクター（ねこ）があり，同時に手指の開閉によってこのキャラクターは近くの物体を把持できる．このゲームでは，画面の左右の端に現れるターゲット（さかな）をつかんで画面中央のゴール地点に移動させることでスコアを獲得する．

画面左に現れたターゲットをゴール地点に移動させるためには，(1)手首を掌屈してキャラクターを左に移動させ，(2)手首の掌屈を維持した状態で指を屈曲し，(3)指の屈曲を維持した状態で手首を背屈し（手首の独立伸展），(4)手首を背屈した状態で指を伸展する必要がある（指の独立伸展）．

画面右に現れたターゲットをゴール地点に移動させるためには，(1)手首を背屈してキャラクターを右に移動させ，(2)手首の背屈を維持した状態で指を屈曲し（手首の独立伸展），(3)指の屈曲を維持した状態で手首を掌屈し，(4)手首を掌屈した状態で指を伸展する必要がある（指の独立伸展）．

以上の操作により手指の分離運動を促進する．また，このゲームにおけるスコア獲得の障壁として，キャラクターが移動する地面に凹凸を設けており，凸部をキャラクターが乗り越えるときに手首に抵抗が付加される．これによって手首への力覚刺激を与える．

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 3件)

- [1] Takehito Kikuchi, Tomoya Nagata, Chihiro Sato, Isao Abe, Akio Inoue, Shintaro Kugimiya, Tetsuya Ohno, Shinnosuke Hatabe, Sensibility Assessment for User Interface and Training Program of Upper-Limb Rehabilitation Robot, D-SEMUL, Proceedings of Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC2018), pp.3028-3031, 2018, 査読有
- [2] Hayato Mukai, Chihiro Sato, Isao Abe, Takehito Kikuchi, Development of Rehabilitation Robot for hand "ReRoH", 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp.2063-2068, 2017, 査読有
- [3] Takehito Kikuchi, Chihiro Sato, Kazuki Yamabe, Isao Abe, Tetsuya Ohno, Shintaro Kugimiya and Akio Inoue, Upper Limb Training/Assessment Program Using Passive Force Controllable Rehabilitation System, The 15th IEEE Conference on Rehabilitation Robotics (ICORR 2017), pp.505-510, 2017, 査読有

〔学会発表〕(計 11 件)

- [1] 末永征士郎, 菊池武士, 長田朋也, 浅海靖恵, 上肢リハビリテーションロボット D-SEMUL の意欲向上を目指した訓練アプリ開発のための脳波計測および感性評価, 日本機械学会 2019 年ロボティクス/メカトロニクス講演会講演論文集, in press, 2019
- [2] 長田朋也, 佐藤地洋, 阿部功, 菊池武士, 井上昭夫, 釘宮慎太郎, 大野哲也, 畑辺真之介, 卓上型上肢リハビリテーションロボットの受け入れやすさに関する評価, 日本機械学会 2018 年ロボティクス/メカトロニクス講演会講演論文集, 2A2-G02, 2018
- [3] 向井勇人, 長田朋也, 阿部功, 菊池武士, 手指リハビリテーションロボット ReRoH における電気刺激位置の検討と訓練プログラムの開発, 日本機械学会 2018 年ロボティクス/メカトロニクス講演会講演論文集, 2P1-G01, 2018
- [4] 佐藤地洋, 長田朋也, 阿部功, 菊池武士, 井上昭夫, 釘宮慎太郎, 大野哲也, 畑辺真之介, 卓上型上肢リハビリテーションロボット D - SEMUL の感性評価, 第 27 回ライフサポート学会 フロンティア講演会, p.70, 2018
- [5] Takehito Kikuchi, Manyo Takenaka, and Yusuke Fujii, Simple calibration method for low-cost eye-tracker, The 11th International Convention on Rehabilitation Engineering and Assistive Technology (i-CREATE 2017), PP5-2, 2017
- [6] 長田朋也, 佐藤地洋, 阿部功, 菊池武士, 井上昭夫, 卓上型上肢リハビリテーションロボット D - SEMUL の開発, 第 38 回バイオメカニクス学術講演会, pp.115-116, 2017
- [7] 佐藤地洋, 熊谷尚也, 藤井祐輔, 菊池武士, 安藤将孝, 浅海靖恵, 田中健一郎, 板ばね内蔵型空気袋を用いた CMP 装置の開発, 第 32 回リハ工学カンファレンス, pp.167-168, 2017
- [8] 向井勇人, 山辺一輝, 阿部功, 菊池武士, 大野哲也, 脳卒中片麻痺患者のための手指リハビリテーションロボット ReRoH の開発, 日本機械学会 2017 年ロボティクス/メカトロニクス講演会講演論文集, 2A2-H05, 2017
- [9] 山辺一輝, 向井勇人, 佐藤地洋, 菊池武士, 井上昭夫, 大野哲也, 釘宮慎太郎, 電気-力覚ハイブリッド刺激型手指リハ装置に関する研究, 第 26 回 ライフサポート学会 フロンティア講演会, p.109, 2017
- [10] 菊池 武士, 山辺 一輝, 佐藤 地洋, 向井 勇人, 釘宮 慎太郎, 大野 哲也, 井上 昭夫, 手指分離運動を目指した電気 力覚ハイブリッド刺激型ニューロリハシステムに関する基礎研究, 第 17 回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講演論文集, pp.2861-2864, 2016
- [11] 佐藤地洋, 大野哲也, 釘宮慎太郎, 山辺一輝, 阿部功, 菊池武士, 井上昭夫, 上肢リハビリロボットを用いた広い運動レベルに対応したリーチングプログラムの開発, 第 34 回日本ロボット学会学術講演会予稿集, 2F1-02, 2016

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等: <http://www2.hwe.oita-u.ac.jp/kikuchilab/index.html>

6. 研究組織

(1)研究分担者
該当なし

(2)研究協力者
該当なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。