

令和 5 年 6 月 15 日現在

機関番号：15101

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20265

研究課題名（和文）摂食嚥下リハビリテーションを対象とした自己主体感向上のためのアプローチ

研究課題名（英文）An approach to improve the sense of self agency for eating and swallowing rehabilitation

研究代表者

中谷 真太郎（Nakatani, Shintaro）

鳥取大学・工学研究科・講師

研究者番号：10781700

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、高齢者の健康寿命の延伸に貢献する舌の運動リハビリテーションを対象とし、それを実現するための運動主体感の向上を実現するシステムを構築した。提案したシステムの核となるのは、運動意図に応じた感覚刺激を人工的に生じさせることにより中枢神経系を含めた神経回路網の強化を目指すというものである。まず、舌に対して一定の力を与え続ける舌圧子タイプの装置を製作し、舌の運動特性を実際に計測した。さらに、口腔内で計測した筋力からデータ駆動型の制御器調整法であるFRITによるアシストシステム設計を可能とする手法を提案し、シミュレーションと実験により実現可能性を確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

人間の複雑な運動には、筋力だけでなく脳・脊髄と末梢神経の密な神経接続によって実現されている。高齢などによる舌の運動能力低下によるオーラルフレイルは、食べる喜びを奪われることにつながりかねない重大な問題であるが、実際の動きを自分で見て確かめることができないこともあり、早期発見・回復のプロセスを取りづらいう問題がある。本研究の成果は、舌の運動状態を定量的に評価することができる技術と、利用者の運動能力に応じて課題の難易度を調整することで運動へのモチベーション維持につながる技術に関して新たな手法の提案を行なったことである。今後、オーラルフレイル症状の早期発見・早期回復につながることを期待している。

研究成果の概要（英文）：In this study, we aimed at the motor rehabilitation of the tongue, which contributes to the extension of the healthy life expectancy of the elderly, and constructed a system that enhances the sense of motor initiative to realize this goal. The core of the proposed system aims to strengthen the neural network, including the central nervous system, by artificially generating sensory stimuli in response to motor intention. First, a tongue depressor-type device was fabricated that continuously applies a constant force to the tongue, allowing the motor characteristics of the tongue to be actually measured. In addition, we proposed a method to design an assistive system using FRIT, a data-driven controller tuning method, based on the muscle force measured in the oral cavity, and confirmed its feasibility through simulations and experiments.

研究分野：生体医工学

キーワード：オーラルフレイル 筋電位 運動主体感 ヒューマンインザループ

1. 研究開始当初の背景

(1) 運動麻痺患者に対するリハビリテーションでは、患者の脳内で発生する動作指令に合わせて患部を動作させ、末梢感覚を適切なタイミングで脳内へフィードバックさせることが望ましいとされることがある。これは、ヘブ則として知られる神経細胞間の接続が強化される基本条件に着目した考え方であり、上肢および下肢麻痺患者を対象とした外骨格型ロボットを用いた臨床実験も進められている。

(2) 人にとって物を食べること(摂食・嚥下)は生きる喜びそのものとされる。摂食嚥下運動は筋の高度な協調によってなされることから、微小重力下であっても宇宙飛行士は食事を行える一方で、高齢や疾病などで摂食嚥下能力が低下すると肺炎などの重篤疾患につながる場合もある。これまで、摂食嚥下障害の予防や回復を目的とした様々なリハビリテーションの取り組みが進められているが、適切なリハビリテーションのためには医師・看護師・作業療法士など専門家チームによるサポートが必要となり、すべての患者に十分なケアを行うことは難しい。

これまで研究代表者は、舌の運動状態を識別し、識別結果に応じてコンピュータのカーソルをリアルタイムに操作することで摂食嚥下リハビリテーションを補助するシステム(図1)を提案した。このとき、舌の筋活動は図2に示す専用のマウスピースを用いて歯ぐき上から計測した。これにより舌動作時の違和感を低減させることはできたが、運動リハビリテーションのために自らの舌を動かしたという感覚を与える方法について検討を行った。

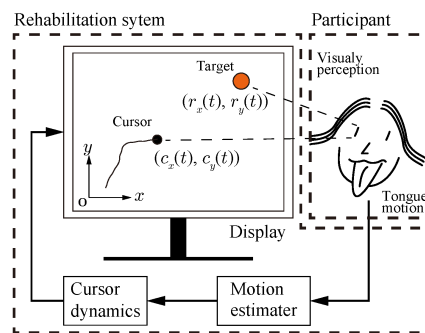


図1：舌カーソル操作システム

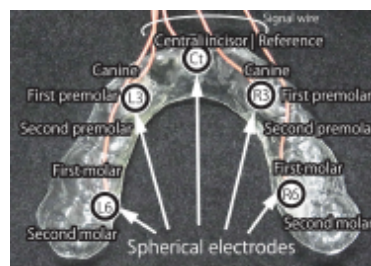


図2：マウスピース型電極

2. 研究の目的

上述の実験を健常者に対して繰り返し行う中で、舌の運動方向を正しく推定できているにも関わらず、操作性が悪いという感想が多く得られた。この操作性の悪さは、患者さんの運動意図(想定したカーソルの動き)と視覚的なフィードバック(現実のカーソルの動き)の不一致により生じているものと考えられ、使用者が自分自身でカーソルを動かしたという感覚(自己運動主体感)の大幅な低下を引き起こす。本研究では、舌運動にかかわる神経活動を対象とし、患者の自己運動主体感に着目したリハビリテーションシステム構築を目的とした。特に、ダイナミクスも含めた運動意図の実現について考慮し、人間がシステムを操作する際に生じる自己運動主体感を、いかにして高めるかという問題について取り組んだ。

3. 研究の方法

(1) まず、舌の運動強度の評価を行うための装置を製作した。本研究では、特に舌の挙上運動を担うとされる茎突舌筋(styloglossus)を対象とし、舌に一定の負荷を加えた状態での動きを伴う運動能力の評価・訓練を行うことができる装置を製作した。図3に示すように並行リンク機構に取り付けられた舌圧子を舌に押し付ける動作を行う。この時、舌圧子はねじり弾性を持つコイルばねを介してモータと接続される。ばねのねじれ角から舌に加えられる力を計測できるため、使用者に対して安全性を確保することが可能である。

(2) 次に、自己運動主体感を持たせるための手法として、被験者が視覚フィードバックによってカーソルを制御する制御器として振る舞うと仮定し、運動能力の差をアシストする項の設置および人間の感覚に近くなるような軌道の非線形化を実施した。さらにFRIT(fictitious reference iterative tuning)と呼ばれるデータにもとづく制御器調整法の援用により、個人の運動能力H(s)の違いを認識し、アシストシステムを自動で構成する手法を提案した。

4. 研究成果

(1) 本研究で製作した舌運動機能評価装置の構成図を図4に示す。本装置は、並行リンクに接続された舌圧子（京大式舌圧子 B-107, ミドリコーポレーション）を用いて舌に対して下向きの負荷を与える。この時、平行リンクの駆動軸はねじりばねを介してギアヘッドの出力軸と接続される。ねじりばねは、ギアヘッドと駆動軸との間の弾性機構としてバックドライバビリティを有しており、さらに、エンコーダを用いたねじり角の測定によってトルクの直接計測ができる。この時、ギアヘッド付き DC モーター (ECmax 30, maxon motor ag.) によるインピーダンス制御を実装することで装置の動特性を任意に変更できる。また、舌圧子先端の高さおよび負荷力は PC 上でリアルタイムに表示し、被験者自身で確認することができる。システムの制御・通信にはプログラマブル I/O (myRIO, National Instruments) を利用しており、制御周期は 5 ms である。

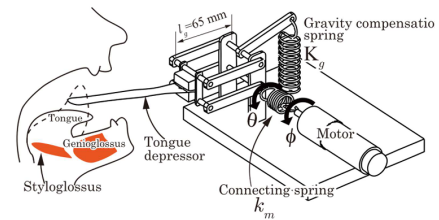


図3：製作した舌トレーニング装置

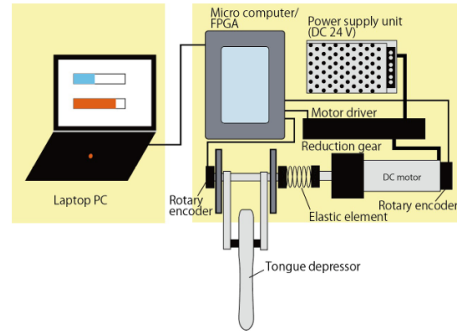


図4：装置の構成

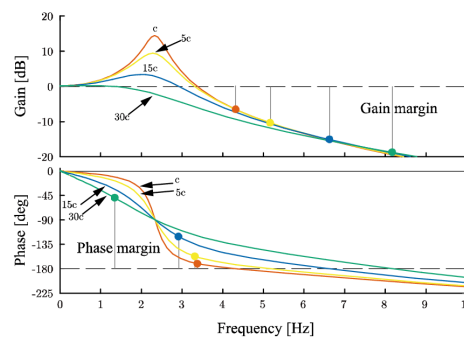


図5：舌が与えたトルクに対するモーターが発生させるトルクの応答

ここで、インピーダンス制御によって仮想的な粘性係数を変更し、共振が起きないように設定することで安全性を確保した。装置が元々持っている粘性係数を c としたとき、仮想的な粘性を粘性係数 $c_d = [c, 5c, 15c, 30c]$ となるよう変化させると、舌が与えたトルクに対してモーターが発生させるトルクの応答は図5のようになった。ここからピークが抑制され、位相遅れが許容できる $c_d = 15c, J = J, \theta = 0$ となる装置を設計した。

製作した装置と従来の舌機能計測手法との比較を行うため、舌を含む口腔内や顎などの摂食・嚥下に関わる部位に疾患のない健康な 20 代の成人男性 5 名を対象とした実験を行った。本実験は鳥取大学医学部倫理委員会の承認を受けており、実験前に被験者全員から十分なインフォームドコンセントを得た。製作したトレーニング装置を用いて、被験者の舌に抵抗負荷を加えた状態で 30 秒間できる限り早く挙上運動を繰り返し行わせ、そのときの舌先の挙上量および舌に加えられる負荷量を計測した。目標外力は比較的軽負荷の 1.5 N ($\tau=0.0975$ Nm) および比較的重負荷の 3.0 N (0.195 Nm) の 2 通りとした。

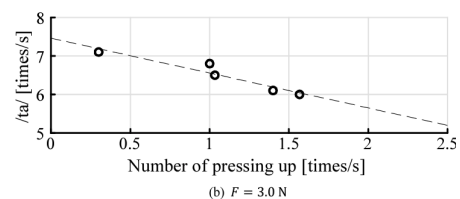
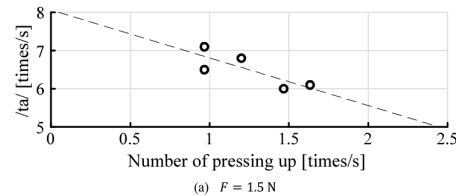


図6：オーラルディアドコキネシス (/ta/) による無負荷時の敏捷性と製作した装置を利用した負荷時の敏捷性の関係

従来法として、オーラルディアドコキネシス (OD) 法を利用した無負荷時の舌の運動速度測定を行った。特に舌の挙上動作に関わる /ta/ 音節を 10 秒間できるだけ早く発声してもらい、1 秒当たりの発声回数値の平均値を評価に利用した。

当初の予想と異なり、図6に示すように OD 法による一定時間内の発声回数と一定負荷下での挙上回数の間には負の相関がみられた。特に図9(a)に示す負荷 1.5 N の時には相関係数 $r=-0.8$ 、図9(b)に示す負荷 3.0 N の際には相関係数 $r=-0.95$ にもなる明確な相関関係が存在しており、OD による成績が高い被験者ほど負荷によって俊敏性が低下している傾向が見られた。このことは、OD 法によって計測される無負荷時の俊敏性は、必ずしも食塊形成における負荷時の俊敏性に繋がらない可能性を示している。

以上より、舌筋の筋力を効率的に鍛えることを目的として、舌筋に等張性収縮を伴う抵抗運動を行わせることで、舌の筋力増強トレーニングおよび等張性運動中の舌の運動機能評価を行うことができる評価・訓練装置の提案を行った。本装置は、舌圧子と減速機付きモーターとの間にねじりばね要素を付加し、SEA を利用したインピーダンス制御を実装することで所望のインピーダンス特性を実現しつつ、任意の一定負荷を与え続けることができる。開発した訓練装置によって計測される値は従来の舌運動指標だけでは計測できない、より詳細な個人の舌運動能力を評価できる可能性がある。

(2) 図7に示す舌の運動リハビリテーションを目的としたシステムは、舌動作に応じて画面上のカーソルが動くことで舌の運動状況を視覚的に認知させることができる。このシステムは歯茎上に設置した電極から得られる電位変化をもとに被験者の舌の動作状態をとらえることができる。このシステムでは、運動強度を口腔内電位の振幅の大きさとして連続的な値で表現することができるが、人が連続的な行動を行う際に高い運動主体感を得るためには、当初期待した程度あるいはそれ以上の結果が得られることが重要になる。

本研究では、人がカーソルを動かす際の目標軌道をあらかじめ設定しておき、その目標軌道に沿うようにシステムのダイナミクスを調整する手法について検討を行った。初めに、人が目標物に手を伸ばすリーチング運動を行う際の手先軌道に近い動きをロボットに取らせるために提案された time base generator をもとに目標軌道を設定し、人間が制御ループ内において制御器として振る舞うことを想定した。実験により人間がシステムを操作した際に得られた軌道を元に適切なアシストを行うための補償器を設置した。

図8に、健常人2名に対して舌を突き出してカーソルをターゲットに近づける実験を行った際の実験結果を示す。赤色で示したアシストのための補償器が無い状況下の平均軌道は、点線で示した目標軌道よりもゆっくりと動き始めた後に急加速するような軌道を通っている。一方、学習済みの補償器を利用した場合には目標地点付近での減速ができず多少のずれが生じたものの、補償器がない場合に比べて目標軌道との一致率が高くなった。また図9に示したこの時の筋活動量の変化を見ると、補償器が適応された場合(黒線)には前半で大きな力を発揮し、後半で細かな動きでカーソルを調整しようとしていることを確認できる。この傾向は人間が実際の到達運動時に取る筋活動と似ており、設置した補償器によって対象の運動を人間のリーチング運動時の動作感覚に近づけることができた可能性がある。

今回の研究は主に口腔内の舌の動きを対象にして検証を進めたものであり、視覚フィードバックのみが得られる場合の運動制御として捉えることができる。ただし、提案手法を改良することで視覚フィードバックのみならず力フィードバックを伴う系への適用も可能となり、より多くの状況への対応が期待できる。ロボットによる運動補助の効果については、良い影響も多くみられる一方で、強すぎる補助が運動主体感の低下やモチベーションの低下につながることも指摘されている。今後は、VRゴーグルを用いた視覚フィードバックの修正とロボットを用いた運動アシストの同時適応を行うことでロボットによる外的なアシストと運動主体感増強の両立を目指したシステムの研究を進めることを計画している。

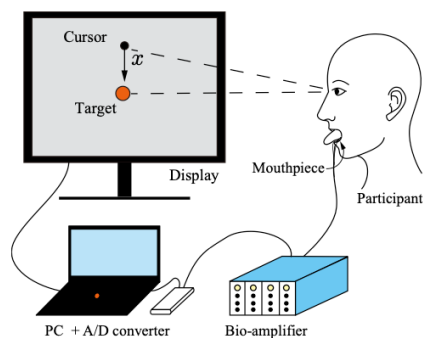


図7: 舌の運動リハビリテーションシステム

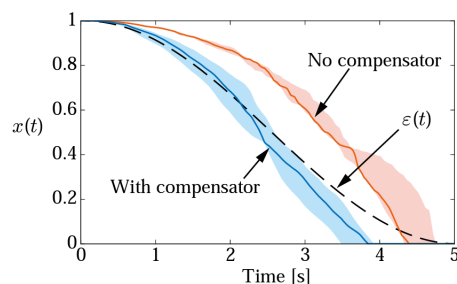


図8: 舌突き出し実験時のカーソル軌道

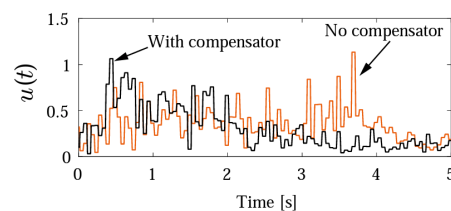


図9: 実験時の筋活動量変化

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 2件）

1. 著者名 Nakatani Shintaro, Okuda Kazuya	4. 巻 142
2. 論文標題 Manual Control for Motor Rehabilitation	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems	6. 最初と最後の頁 412 ~ 421
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejeiss.142.412	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 HOSHIKUMA Takashi, NAKATANI Shintaro, NISHIDA Shin-Ichiro, CHURIKI Naoki, KODANI Isamu	4. 巻 86
2. 論文標題 Dynamic resistance training device for evaluation of tongue motor function	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Transactions of the JSME (in Japanese)	6. 最初と最後の頁 00229-20-00229
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1299/transjsme.20-00229	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 中谷 真太郎	4. 巻 66
2. 論文標題 リハビリテーションにおける運動主体感向上のためのシステム・制御系設計	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 システム / 制御 / 情報	6. 最初と最後の頁 440 ~ 445
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.11509/isciesci.66.11_440	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1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 中谷真太郎
2. 発表標題 リハビリテーションを目的としたマニュアルコントロール
3. 学会等名 電気学会制御研究会
4. 発表年 2020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
---------	---------