

令和 5 年 6 月 22 日現在

機関番号：52605

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K12774

研究課題名(和文) 手指リハビリテーション支援機器における促通反復療法の実現

研究課題名(英文) Development of hand rehabilitation assist device capable of repetitive facilitative exercise

研究代表者

青代 敏行 (Aodai, Toshiyuki)

東京都立産業技術高等専門学校・ものづくり工学科・准教授

研究者番号：40571849

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：手指における促通反復療法を実現可能な手指リハビリテーション支援装置の実現に向けて、拇指運動機構に取り付け部分の材料にTPUを使用し、弾性変形を利用することによって、拇指可動範囲を満たすことが出来た。また、手首運動機構として2つの平行リンク機構を直列に結合し、各中間節を一体化することによって動作安定性が向上した。そして、モデル化したモータ回転角度と関節トルクの関係を利用して、制御実験を行い、未装着時と同等の結果が得られた。また筋電位信号で動作を推定し、駆動トリガ信号の生成のために筋電位信号による特徴量の前処理を検討し、機械学習による高い識別精度が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

複雑な動作と広い可動範囲を有する拇指の運動アシストを実現する方法として、単一アクチュエータと協調型リンク機構、機構固定部の工夫を組み合わせた例はなく、独創的である。また、機構内に指を組み込んだことによる指関節に生じるトルクを従来方法で導出することが容易となり、導出方法や結果は学術的に意義があると言える。従来までの促通反復療法のアシスト装置と異なり、全ての指を同時に行えることから社会的意義もあると言える。また、筋電位による識別精度向上に対して、従来研究に比べて簡易で容易であり、生体情報に基づいた前処理方法を行うことで精度向上が図れたことは意義がある。

研究成果の概要(英文)：To realize a hand rehabilitation support device that can realize the repetitive facilitative exercise therapy in the hand, TPU was used as the material for the attachment part of the thumb movement mechanism, and elastic deformation was utilized to satisfy the range of thumb movement. In addition, two parallel link mechanisms were connected in series as a wrist motion mechanism, and each middle node was integrated to improve the motion stability. Control experiments were conducted using the relationship between the modeled motor rotation angle and joint torque, and the results were equivalent to those obtained when the robot was not worn. In addition, high discriminative accuracy was obtained by machine learning by using EMG signals to estimate movement and by examining the preprocessing of features by EMG signals to generate driving trigger signals.

研究分野：生体医工学

キーワード：リハビリテーション リンク機構 手指運動 手首運動 促通反復療法

1. 研究開始当初の背景

脳卒中患者を社会復帰や日常生活の困りごとを解決するためにリハビリテーションを充実なものにする必要がある。しかし、理学療法士の数は慢性的に不足している現状がある。そこで、理学療法士の補助や代替を目的に様々なリハビリテーション支援装置が様々な研究開発されている。しかし、日常生活に大きく影響を及ぼす手指運動を対象とした支援装置は、下肢に比べて研究開発例の数が少なく、医師や理学療法士、患者が満足する支援装置が出来ていない。

一方、脳卒中患者に対して「脳の可塑性」に注目し、リハビリテーションにおいて患者の運動機能レベルに合わせて促通反復療法が実施され、多くの運動機能回復事例を上げている。近年、促通反復療法とロボット技術を組み合わせたりリハビリテーション支援装置が開発されている。しかし、促通反復療法の運動と刺激を実現していたとしても指1本のみを対象としており、全指を対象としていない。また全指を対象とした従来までの支援装置は多くのアクチュエータを使用して全指運動が可能であるが、促通反復療法を実現していない。そのため、利用者が望む少ないアクチュエータで多指に対して促通反復療法を実現する支援装置がない。

2. 研究の目的

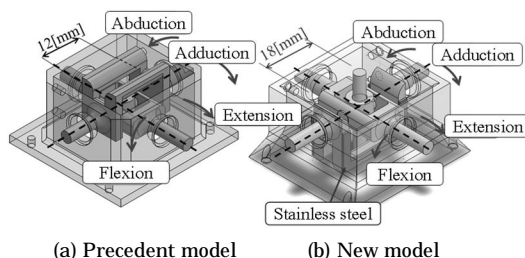
数少ないアクチュエータで促通反復療法にある手指運動を実現するために、本研究は、把持形態や把持対象物形状に合わせて自動的に変形可能な協調型リンク機構と手首背屈/掌屈用回転機構を併用することで実現する。そこで本研究は、「協調型リンク機構による各指用支援装置の再構築」、「促通反復療法を対象とした支援装置の実現」、「手指リハビリテーション支援装置の出力制御による刺激強弱の実現」を目的に実施した。

我々は、これまでに協調型リンク機構内に各指基節骨を組み込み、示指から小指までの4指の様々な把持動作を実現した。これをよりた自由度で複雑な運動を可能とする拇指に適用する。また、促通反復療法として、指の屈曲伸展に合わせた手首の背屈掌屈などが重要となるため、これらを最小限のアクチュエータ数で実現する。併せて、患者指先等に大きい力と僅かな抵抗力をそれぞれ加えられる協調型リンク機構の出力制御を実現する。

3. 研究の方法

(1) 協調型リンク機構による各指用支援装置の再構築

我々の先行研究において、拇指の運動可能方向を屈曲伸展に限定していた。そこで、物体把持運動に必要な不可欠な対立運動を可能とし、指の全自由度を拘束しない機構へ再構築する。本研究は、拇指運動用機構の駆動用球関節および取り付け部を開発する。そして、拇指可動域に対する影響について運動解析による定量評価を行なった。対立運動も可能な機構を実現するために屈曲伸展、内転外転に対するモータ回転軸を同一平面上に配置した図1(a)に示す球関節駆動部を構成して動作実験を行い、対立動作を含む拇指把持運動を実現した。しかし、球関節可動域が狭かったため屈曲/伸展運動に対して制限があった。そこで動作範囲拡大のために球関節可動域拡大を図った。改良した球関節モデルを図1(b)に示す。内転/外転を行うシャフト凸部分を内部に配置し、外郭形状を変更して可動域拡大を図った。



(a) Precedent model (b) New model
Fig. 1 Thumb drive with the spherical joint

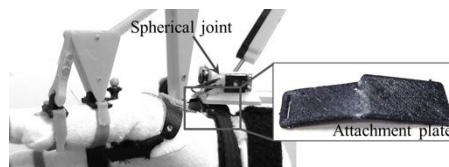


Fig. 2 Attachment part for the thumb link mechanism

先行研究モデル取り付け部はアルミ板の板金により作製した。拇指 CM 関節周辺と機器の間に空間が生じてしまい、機器装着時の拇指可動域が狭くなっていた。そこで、図2に示す熱可塑性ポリウレタン(TPU)で取付部を作製した。TPU 材は弾性材料であるため把持運動中に変化する CM 関節部形状に沿って機器を装着することが出来る。また TPU 厚さによって、手形状に対する対応量は変化する。そこで TPU 厚さを変更して機構取付部を検討する。

(2) 促通反復療法を対象とした支援装置の実現

促通反復療法における手首運動を再現するために対象運動を 2 軸ゴニオメータと慣性センサユニット、前腕部表面筋電位を使用して動作解析する。対象運動は掌屈背屈、回内回外とし、自発的運動と促通反復療法時の運動における各関節角度を測定した。また手首運動用機構の基本構造図を図3に示す。手首運動機構は、2 個の平行リンク機構を連結させたものであり、各平行リンク機構の中間節を 一体化させることにより、4 節回転リンク機構特有の思案点による機構

動作不安定を回避することが可能となる。本機構による手首の背屈掌屈、回内回外運動を運動対象とし、手首動作解析と同じ機器を使用して行なった。また、機構による指関節の屈曲伸展に加えて機構内の各関節における回転抵抗を調整することで促進反復療法における指運動再現度合いを向上させることができる。本研究では、関節回転軸にねじを使用してねじの締め付け具合を調整することで実現する。

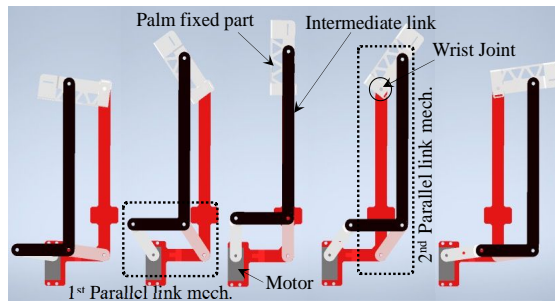


Fig. 3 Overview of Wrist Link Mechanism

(3) 手指リハビリテーション支援装置の出力制御による刺激強弱の実現

協調型リンク機構の出力制御による指運動の刺激強弱を実現するために、これまでの DC モータを角度制御が可能にするために角度センサを取り付け、サーボモータ化した。またモータ回転角度に対する各指関節角度の変化および関節トルク変化のモデル化を図った。そして、対象物形状に合わせた制御を行なった。また、患者動作を 2 箇所筋電位信号から推定し、支援機器の動作トリガとして使用する。筋電位信号から動作を推定する特徴量前処理方法について検討した。

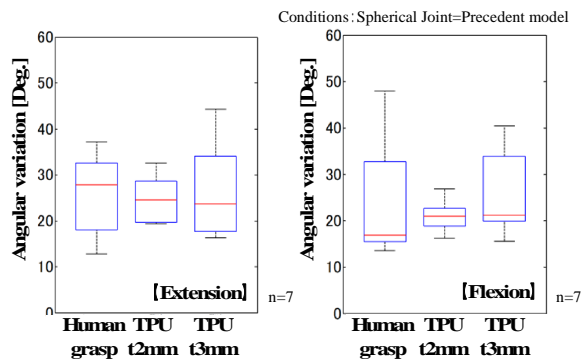


Fig. 4 Amount of angular variation at MP joint in 1st grip

4. 研究成果

(1) 球関節機構構造寸法変更による可動域検討

機器を装着していないヒト把持動作と図 1 に示す 2 種類の球関節で握りこぶし動作時における拇指 MP 関節の屈曲伸展時における関節角度変化量を評価した。その結果より、球関節内部可動範囲向上による指関節角度に変化は見られなかった。

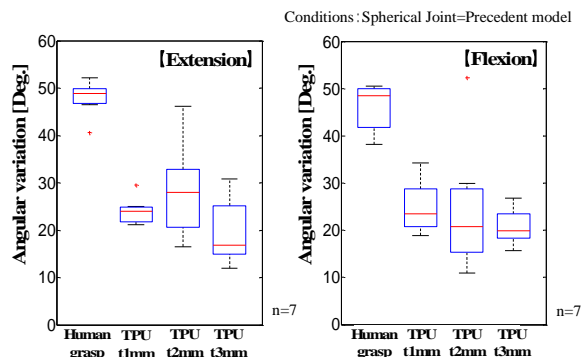


Fig. 5 Amount of angular variation at MP joint in cylinder grip

(2) 駆動ユニット取付部材質変更による可動域向上

機器を装着していないヒト把持動作と取付部 TPU 厚さを変えたときの握りこぶし動作時における拇指 MP 関節の屈曲伸展時における関節角度変化量を図 4 に示す。各厚さともに伸展方向、屈曲方向で未装着時におけるヒト把持動作と同等の角度変化量を示した。このことから、ヒト指関節の最大可動域を使用する握りこぶしを実現できたと言える。次に直径 30mm の円柱を把持したときの TPU 厚さが 1mm, 2mm, 3mm のときの結果を図 5 に示す。図 5 より、伸展方向、屈曲方向ともにヒト把持動作より関節角度変化量が小さい結果となった。しかし、円柱把持の伸展時において、TPU 厚さ 2mm は他条件に比べてヒト把持に近い伸展方向の関節角度変化量を示し、ヒト把持を実現できる可能性が高いと考えられる。従って、こぶし握りと円柱把持のヒト把持動作を両立して実現するために TPU 厚さ 2mm の把持取付部を採用することが有効であると考える。

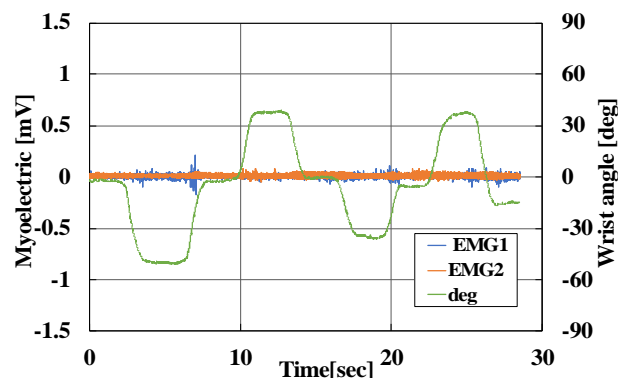


Fig. 6 Human Wrist motion (Unworn)

(3) 手首運動用機構の構築と動作評価

機器を装着していない状態で掌屈背屈、回内回外の手首運動、撓側手根屈筋と尺側

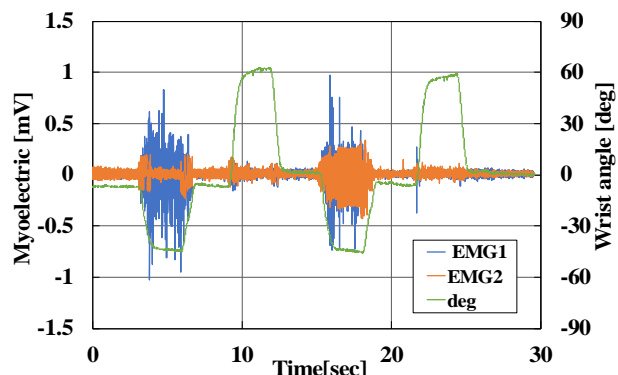


Fig. 7 Human Wrist motion with Mech.

手根伸筋の表面筋電位を測定した。その結果、回内回外はほとんど行われていなかった。そこで、機器で実現する運動として、掌屈背屈とした。図3の手首運動機構を3Dプリンタで製作し、装着時の手首運動を評価した。未装着と装着時の手首掌屈背屈(deg)、橈側手根屈筋(EMG1)と尺側手根伸筋(EMG2)を図6,7に示す。手首掌屈背屈角度は、機器を装着することによって背屈運動の可動域が増えていた。一方、掌屈運動の可動域は機器を装着しても未装着時と同等であった。また、未装着と装着時の表面筋電位を比較したとき、装着することによって、橈側手根屈筋、尺側手根伸筋ともに活動量が増えていることが分かった。これは、手部の固定面積、設置面積が小さいことから運動時に余計な運動の実施や力を発揮してしまったと言える。これらを改善することによって、実装着と同等な運動が可能であると考えられる。

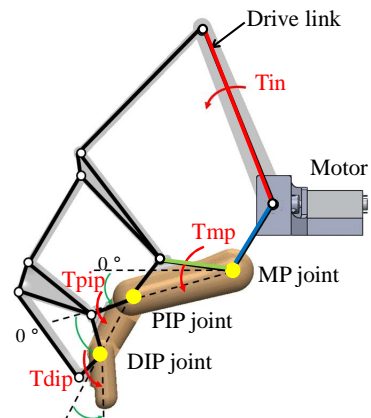


Fig.8 Analysis model of finger Link mechanism

モータ回転角度に対する各関節に生じるトルク、回転角度の関係をモデル化する。協調型4節回転リンク機構である4指用リンク機構に対して、図8により仮想仕事の原理を用いてトルク解析を行った。遠位指節間関節(DIP関節)、近位指節間関節(PIP関節)を0degで固定し、中手指節間関節(MP

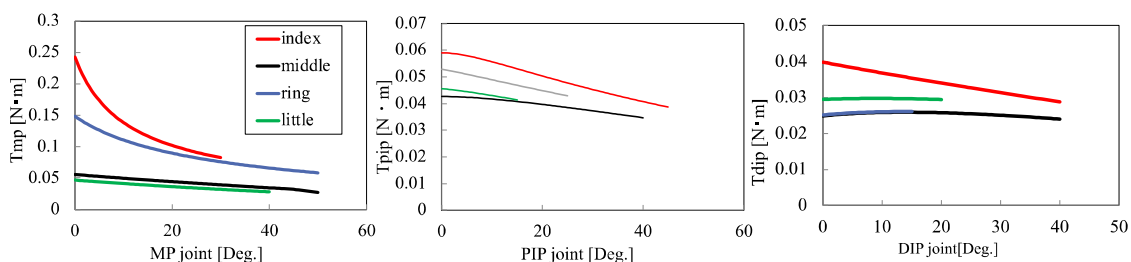


Fig.9 Results of Link mechanism analysis

関節)を0から90deg動かした時のMP関節トルクは、各指で発生する関節トルクの軌跡が大きく異なっていた。また中指が最も小さい値を示していた。次に66mmの円筒を把持した時と同じ角度になるまで本リンク機構を動作させた時のトルク値を図9に示す。把持する際、実際のヒト指の各関節トルクの大さは中指が最も大きくなければならない。しかし、本リンク機構による中指の関節トルクは異なっていた。また各指の関節トルクの軌跡は異なっていた。このことから、本リハビリテーション機器は各指に合わせてトルク制御が必要であることが分かった。また全解析結果において、回転角度とトルクに関係性はあるため、回転角度により出力制御可能であることが分かった。これらの結果をもとにして、サーボ化した原動節用DCモータに適用し、指令回転角度に対する各指関節角度を制御した。その結果、未装着時の各把持対象物形状と同等な関節角度を実現することが出来た。

再構築した手指運動機構と構築した手首運動機構を結合し、動作確認を行なった。結合した促通反復療法を実現可能な手指リハビリテーション支援装置の全体図を図10に示す。動作確認において、想定していた動作が可能であること、安全性を確認した。

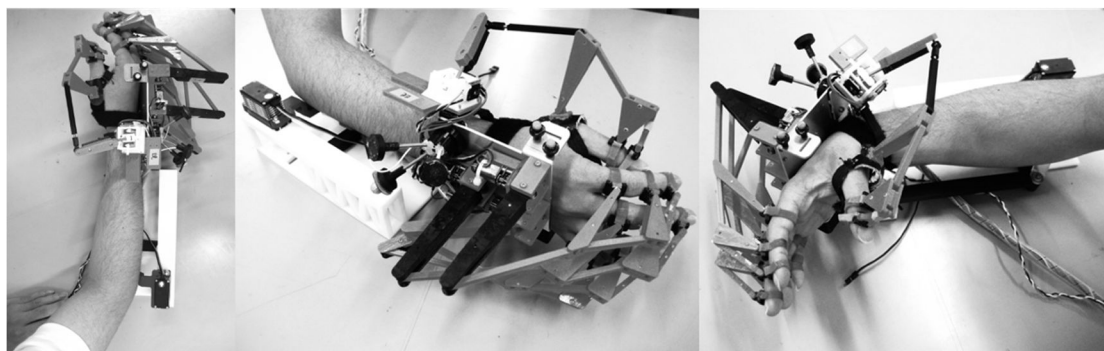


Fig.10 Overview of Hand Rehabilitation assist device for Repetitive Facilitative Exercise

支援機器による装着者の運動を推定して動作トリガ、制御入力量として、前腕部にある浅指屈筋、長拇指屈筋直上の表面筋電位を使用している。筋肉量や脂肪量など個人差をなくし、汎用性を確保するために最大随意筋力に対する各筋電位の割合である%MVCを応用する。筋電位信号取得時の最大値を用いた疑似%MVCと0と1によるMin-Max法による正規化を用いた前処理をすることによって可能であることを手指動作の識別推定実験により確認した。擬似的%MVC、Min-Max法による正規化はリアルタイム性が欠けている。そこで処理アルゴリズムを再検討し、動的なデータを使用しても識別精度が維持出来ることが分かった。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 青代敏行, 持田智実, 中西大輔
2. 発表標題 手指リハビリテーション支援機器に用いる拇指用駆動ユニットの開発
3. 学会等名 LIFE2020-2021
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青代敏行, 三木巧規, 鈴木遥香, 松本大樹, 堀内匡
2. 発表標題 筋電図正規化による特徴量を用いた手指リハビリテーション動作推定精度の向上
3. 学会等名 LIFE2022
4. 発表年 2022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
---------	---------