

博士(人間情報学)論文概要

手指動作支援のための超多関節外骨格システム

グローバル教育院 エンパワーメント情報学プログラム

高嶋 倫太郎

2021年 3月

論文概要

日常生活において物を把持し持ち上げる動作は、日常生活の行動全体の約 43%に含まれていることから重要な動作の一つである。しかし、脳・神経系の損傷などにより片手、もしくは両手に麻痺が生じると、麻痺手による手指の屈曲／伸展動作を行うことが困難になる。手指麻痺者は、自身の力で手指を屈曲／伸展することが困難であるため、日用品の把持を行うことができない。そのため、日常生活の動作のうち大多数を占める、物を把持し持ち上げる動作に困難を抱えており、手指麻痺者の QOL (Quality of Life) に大きな影響を与えている。

日用品を把持する際、一般に手指を屈曲／伸展させるため、手指麻痺者の手指の屈曲／伸展を支援することができれば日用品の把持支援が可能となることが期待される。日用品の把持支援において、様々な日用品の物体表面形状に対応させるため、手指ごとに独立した手指の屈曲／伸展支援が可能であること、日用品への接触を極力妨げないこと、手指の屈曲／伸展に伴う可動域を阻害しないことが必要である。さらに、日常生活において使用するために、手指麻痺者の手指に対して把持動作支援装置の手指関節間長の調節を行うことなく容易に装着でき、日用品把持に必要な力を伝達できることが必要である。したがって、手指の手背側に配置した柔軟に屈曲できる構造から各手指を覆うように力を伝達することが可能であり、手指関節間長に関する機構の長さの調整をすることなく装着可能であれば、日用品の把持を阻害することなく手指の屈曲／伸展を支援でき、手指関節間長に関する機構の長さの調整を必要としない衣服のような装着が可能となる手指動作支援機構が実現できると考えられる。

そこで本研究では、手指の屈曲／伸展に困難を抱える手指麻痺者の日常生活における把持を支援するため、手背側より手指の屈曲／伸展を支援することが可能であり、手指関節間長に関する機構の長さの調整をすることなく装着可能な超多関節外骨格機構を提案し、超多関節外骨格機構を適用した超多関節外骨格システムを研究開発することで、日用品の把持支援に適用できる可能性、有用性を示すこととする。

人間の関節は、関節にトルクが発生し、関節部の体表面長が変化しながら動作する。そのため、人間の関節に対して屈曲／伸展支援を行うためには、関節にトルクを与えながら、関節部の体表面長の変化を補償する必要がある。また、人間の持つ可動域を維持しながら動作支援を行うためには、関節が屈曲した際に閉じる面に極力何も配置しないように考慮する必要がある。そこで、関節が屈曲した際に閉じる面に把持を妨げるような硬質なパーツを配置することなく支援力を与える方法として、関節の背面に沿いながら、関節を覆うようにトルクを伝達する方法が考えられる。また、人間の関節の屈曲方向に対する角度の変化による関節表面上の距離の変化に対応しながらトルクを伝達することで、屈曲方向におけるあらゆる

姿勢に対して動作を支援することが可能となる。さらに、一般に人間が関節を伸展させる時、骨格に固定された筋が両端の腱に対し、筋の収縮する方向へ力を発揮し、腱を引張ることで関節にトルクを発生させる。そのため、関節の体表面上に両端を固定した構造物を収縮させることで関節に伸展トルクを与えることができ、伸展方向の動作を支援することが可能となる。この構造物が関節を覆うように伝達したトルク、および、構造物が収縮することで発生したトルクを組み合わせることで、関節の屈曲／伸展動作の両方を支援することができる。このように、関節の背面に設置可能であり、関節部の体表面長上を覆いながら屈曲／伸展方向の両方に力を与える機構として超多関節外骨格機構を提案する。超多関節外骨格機構は、多数のリンクと L 字リンクが複数関節による滑節で組み合わせられた超多関節構造と屈曲力伝達ワイヤ、スライダ、フレームによって構成されている。超多関節構造先端には屈曲力伝達ワイヤが通っており、屈曲力伝達ワイヤが超多関節構造の先端を牽引することで屈曲トルクを発生させる。一方で、屈曲力伝達ワイヤが牽引されていない時、超多関節構造の屈曲方向にトルクは発生しないため、超多関節構造は紐のように柔軟になり、関節表面上に沿った形状に変形する。この時、スライダが超多関節外骨格機構を収縮させるように移動すると、超多関節外骨格機構の両端が体表面上に固定されているため、伸展方向にトルクが発生する。これにより、超多関節外骨格機構が関節を伸展させる。この屈曲力伝達ワイヤの牽引による関節の屈曲方向へのトルク、および、超多関節外骨格機構を収縮させることによる伸展方向へのトルクを関節が屈曲／伸展する際に変化する関節表面長の変化に合わせながら関節の背面より装着部に伝達することで、屈曲／伸展動作を支援する。

手指の屈曲／伸展動作の際に動作する関節として、MP 関節（中手指節間関節）、PIP 関節（近位指節間関節）、DIP 関節（遠位指節間関節）がある。そのため、手指関節モデルを、4つのリンクと3つの関節で構成されたリンク構造として表すこととする。この時、手指の屈曲／伸展に伴う表面長の変化は、各関節の手指関節の関節角度により増減する。したがって、超多関節外骨格機構により手指の屈曲／伸展を支援するためには、手指表面長の変化に合わせて、超多関節構造を前後にストロークさせる必要がある。また、日常生活において使用する日用品にはさまざまな種類があるが、本研究において日用品は鎌倉らが健常者の把握形態について調査した際に使用した物体、および、把握物体の選定手法を基に選定できるものとする。なお、同調査中では MP 関節を過伸展せず、手指で包み込むように把持できる物体が選定されていたことから、MP 関節を過伸展しなければ持てない物体を除外し、選定する。さらに、健常者の把握形態について調査した先行研究では、最も重い物体として 4 kg 内容入りポリバケツを挙げ、示指から小指までの 4 本の指による鉤型把握で支持する事例が示されている。そのため、本研究では、手指屈曲動作では各手指先端に対して、最大 9.8 N (1 kgf) 以

上の力を与えることを目標とする。一方、手指伸展動作では、手指の関節に重度の拘縮や変形が生じていない状態の手指を支援することとする。手指動作を支援する超多関節外骨格を実現するため、始めに手指機能に問題のない 5 名の協力者に超多関節構造を装着し、その時の可動域を評価した。その結果、超多関節外骨格機構は装着者の可動域を阻害しないことを確認できた。以後、可動域評価に用いた超多関節構造をベースとして、3 種類の手指動作を支援する超多関節外骨格システムを提案する。提案した各超多関節外骨格機構には軽量かつ機械的特性に優れたポリカーボネート樹脂を主に使用した。超多関節構造の各リンクは関節の過伸展を防ぐため伸展方向に対してハードウェアリミッタを有する。超多関節構造を構成するリンク、スライダの下部には屈曲力伝達ワイヤを通す穴、リンク、スライダの回転中心を通る上部には超多関節構造を連結するために必要なリンク結合ワイヤを通す穴がある。超多関節外骨格機構の全ての穴はワイヤの摩擦を軽減するために研磨、及びシリコンコーティングをしている。また、リンク結合ワイヤは L 字リンクの回転中心部の穴から各リンクの回転中心部の穴を通り、スライダの回転中心部の穴まで挿通され、L 字リンクとスライダでそれぞれ固定される。提案した 3 種類の超多関節外骨格機構の内、アクチュエータの数と、動力伝達のためのアウターワイヤの本数が最も少ないものを採用する。超多関節構造内部の屈曲力伝達ワイヤを牽引するため、ラックアンドピニオンを使用したリニアパワーユニットを開発する。屈曲力伝達ワイヤは、超多関節構造の先端部、および、ラックに固定され、また、屈曲力伝達ワイヤは超多関節構造最後部のスライダとリニアパワーユニットのケースの一端に固定されたアウターワイヤを通して牽引される構造となっている。超多関節外骨格機構による手指動作支援は、超多関節構造により発生する屈曲トルク、超多関節外骨格機構を収縮させることで関節に発生する伸展トルク、手指の屈曲／伸展に伴う手指表面長の変化に合わせたスライダの直動を組み合わせることで実現される。これらはラックアンドピニオンを使用したリニアパワーユニットによる屈曲力伝達ワイヤの牽引により実現される。そこで、日用品の把持を行う手指の屈曲／伸展動作を、屈曲フェーズ、伸展フェーズ、日用品保持フェーズの 3 フェーズに切り分け、ワイヤ牽引の制御を行う。屈曲フェーズは日用品を持つために手指を曲げる動作を行うフェーズであるため、超多関節構造に手指を屈曲させる方向にトルクを発生させる必要がある。そのため、屈曲力伝達ワイヤを牽引することで超多関節構造にトルクを発生させる。伸展フェーズは手指が屈曲した状態から伸展した状態へと変化するフェーズであるため、手指を屈曲させる方向にトルクを発生させてはならない。そのため、屈曲力伝達ワイヤを牽引しないことで、超多関節構造に発生する屈曲方向へのトルクをなくす。日用品を安定して把持し、保持する時、手指は日用品に沿って力を伝達しながらもほぼ動くことはない。したがって、把持フェーズでは伸展方向にトルクが与えられることがない

ようにワイヤの動作を極力止める必要がある。そのため、アクチュエータにより屈曲力伝達ワイヤに電磁ブレーキをかけることで超多関節構造が伸展方向へのトルクを発生しないようにする。上記で説明した 3 つのフェーズに、各アクチュエータにトルクを発生させない初期フェーズを加えた 4 つのフェーズをコントローラによる伸展指令、および屈曲指令にしたがって動作させる。手指へのシステム装着について、手指麻痺者は手指の姿勢を保持することが難しい場合があるため、自力で手指の伸展状態を維持できず、健常者が装着する構造と同じ手袋を装着することが困難である。そこで、装着に際して手指の伸展を必要としない超多関節外骨格装着用グローブを作製する。本グローブは手指部と手掌部をそれぞれ分離可能であり、様々な長さの手指に対して装着時に調整可能である。また、手指部は指先のみを覆う構造である。システム装着前に手指長の個人差に合わせた超多関節外骨格機構の微調整を行うため、超多関節外骨格機構は指 1 本毎にモジュール化されている。また、システム装着後に超多関節外骨格装着用グローブの交換や消毒、および、超多関節外骨格機構を消毒可能とするため、超多関節外骨格機構と超多関節外骨格装着用グローブは面ファスナにより組み合わせられた分離可能な構造である。

開発した手指動作支援のための超多関節外骨格機構を有するシステムの基礎動作を確認するため、手指機能に問題のない健常者による日用品把持試験を行う。手指機能に問題のない健常者による試験は 10 名に対して行う。日用品として、基本的な形状である球形のテニスボール、円筒形の 500ml ペットボトル、さらに手にぶら下げて持つバケツを選定する。バケツの重量に関して、鎌倉らの日用品の把持携帯を分類した研究で用いられたものの中で最も重い物体は 4kg 内容入りバケツであったが、従来は示指、中指、薬指、小指の 4 本で把持することが多いバケツを本試験では示指、中指の 2 本の指を支援して持つことを考慮し、2kg に設定する。超多関節外骨格システムを手指機能に問題のない健常者に装着し、コントローラにより屈曲／伸展指令を与えることで、手指の屈曲／伸展支援を行う。手指の屈曲・伸展支援が可能であることを確認した後、手指の屈曲／伸展支援をすることで日用品の把持を行い、机上、もしくは床面より持ち上げ可能なことを確認する。手指機能に問題のない健常者による試験では、超多関節外骨格システムにより支援された手指機能に問題のない健常な手指が屈曲／伸展することを確認した。また、超多関節外骨格システムにより支援された手指がテニスボール、ペットボトル、2kg 内容入りバケツを把持し、机上、もしくは床面より持ち上げ可能であることを確認した。

開発した手指動作支援のための超多関節外骨格機構を有するシステムの基礎動作を確認するため、手指麻痺者による日用品把持試験を行う。日用品として、基礎試験で使用したものと同様に球形のテニスボール、円筒形の 500ml ペットボトルと 2kg の内容入りバケツ、さら

に、バケツの重量の半分であり、手にぶら下げて持つ 1kg のカバンととって付きお碗を選定した。超多関節外骨格システムを手指の屈曲／伸展に困難を抱えている試験協力者に装着し、コントローラにより屈曲・伸展指令を与えることで、手指の屈曲／伸展支援を行う。手指の屈曲／伸展支援が可能であることを確認した後、手指の屈曲／伸展支援をすることで日用品の把持を行い、机上、もしくは床面より持ち上げ可能なことを確認する。本試験では脳梗塞により右手に麻痺を有する試験協力者 1、脳出血により右手に麻痺を有する試験協力者 2、脊髄損傷により両手に麻痺を有する試験協力者 3 の協力のもと、システムの介入による手指動作の変化、および日用品把持時の変化について評価する。超多関節外骨格システムを手指の屈曲／伸展に困難を抱えている試験協力者に装着し、コントローラにより屈曲／伸展指令を与えることで、手指の屈曲／伸展支援を行う。手指の屈曲／伸展支援が可能であることを確認した後、手指の屈曲／伸展支援をすることで日用品の把持を行い、机上、もしくは床面より持ち上げ可能なことを確認する。実証試験では、超多関節外骨格システムにより支援された手指の動作に困難を抱える方の手指が屈曲／伸展することを確認した。また、超多関節外骨格システムにより支援された手指麻痺者の手指がテニスボール、ペットボトル、1kg 内容入りカバン、2kg 内容入りバケツ、お碗を把持し、机上、もしくは床面より持ち上げ可能であることを確認した。

提案した超多関節外骨格システムは、多数のリンクが組み合わされることにより柔軟に屈曲する超多関節構造を手背側に有しており、超多関節構造が手指の関節可動域を阻害しないことに加え、手指関節が曲がる位置に合わせた機構の調整をすることなく装着することができる。これにより超多関節外骨格システムは多くの方々の手指に対して装着可能であり、手指の屈曲／伸展支援が可能になると考えられる。また、手指麻痺者へのシステムの装着を考慮し、超多関節外骨格装着用グローブを使用した。超多関節外骨格機構と装着用グローブは面ファスナにより組み合わされている。そのため、手背側・手掌側の全てを覆うような手袋であっても、指先部、及び手掌部に面ファスナを取り付けることで超多関節外骨格機構を装着することが可能となる。これにより、一般的な手袋から手指麻痺者を対象とした手袋まで種類を選ぶことなく装着できるようになると考えられる。手指モックアップによる基礎動作検証、および手指機能に問題のない健常者による日用品把持試験において、基本的な日用品の形状である球形に近いテニスボール、円筒形に近い物体であるペットボトルの把持支援が可能であることを確認できた。日用品は基本的な形状が組み合わさってできている。そのため、本システムは様々な形状の日用品の把持を支援できる可能性を持つと考えられる。また、基礎動作検証において、2kg 内容入りバケツを持ち上げることを支援できることを確認できた。この結果より、本システムは手指 1 本あたり 9.8 N 以上の支援力を持つと考えられる。

ため、日用品の把持に必要な支援力を与えることが可能であると考えられる。今後、使用する日用品の種類を増やした日用品把持試験を通して、様々な日用品を把持できることを確かめていくことが望まれる。手指麻痺者に対する実証試験において、システムにより手指麻痺者の手指の屈曲／伸展支援を行うことができ、テニスボール、ペットボトル、1kg 内容入りカバン、2kg 内容入りバケツ、お碗の把持を支援することを確認することができた。この結果より、超多関節外骨格システムが手指を動かすことに困難を抱えている方の手指の屈曲／伸展支援を行うことができ、日用品把持を支援できる可能性があると考えられる。

手指麻痺者は手指の屈曲／伸展動作を行うことが困難であるため、手指の屈曲／伸展動作を伴った日用品の把持を行うことが難しく、日常生活の大多数を占める、物を把持し持ち上げる動作に支障をきたしていた。本研究では、このような状況を鑑み、手背側から各手指を覆うように力を伝達し、手指関節間長に関する機構の長さを調整なしに装着することで手指の屈曲／伸展を支援する超多関節外骨格システムを提案、研究開発することとした。その実現のため、多数のリンクより構成され、柔軟に屈曲する超多関節構造を有する超多関節外骨格機構、および、超多関節外骨格システムを提案、研究開発し、基礎試験を通して、手指の屈曲／伸展支援、および日用品把持支援が可能であることを確認した。さらに、実証試験を通して、手指麻痺者の手指の屈曲／伸展を支援することで日用品の把持が支援できることを確認し、超多関節外骨格システムが手指麻痺者の日用品把持支援に対する適用可能性を有することを確認した。

以上のことから、本研究では手指の屈曲／伸展に困難を抱える手指麻痺者の日常生活における把持を支援するため、手背側より手指の屈曲／伸展を支援することが可能であり、手指関節間長に関する機構の長さの調整をすることなく装着可能な超多関節外骨格機構を提案し、超多関節外骨格機構を適用した超多関節外骨格システムを研究開発することで、日用品の把持支援に適用できる可能性、有用性を示すことができた。

本研究の人間情報学分野への貢献として、人間という柔らかいシステムに対して、超多関節構造によって硬いものを柔らかく使い、様々な手指の屈曲／伸展姿勢に対応した支援を可能にしたことに加え、超多関節構造をスライドさせることで長さを可変とした超多関節外骨格機構により、人間の体表面にしなやかに沿いながら動作支援を行うことを可能としたことが挙げられる。また、装着型デバイスによる人支援分野において、多様な姿勢に対してしなやかに沿いながら人に介入することができる動作支援機構、および動作支援システムは新規的技術であり、人の機能を補完・協調・拡張する技術として従来にない「超多関節外骨格システム」という新たな学術分野を開拓することができたと言える。本研究の社会的分野への貢献として、実際的手指麻痺者にシステムを適用し、超多関節外骨格システムの有用性を明

らかにすることで、装着者の QOL 向上に向けた実現可能性を示したことが挙げられる。また、本研究の成果を手指の動作に困難を抱えている手指麻痺者の日常生活に適用することで、システム装着者の QOL 向上、および手指麻痺者の自立生活環境の拡張を見込むことが期待できる。さらに超多関節外骨格システムを社会実装することで手指麻痺者の社会復帰と経済的自立を促し、世界に対しても社会保障費の大幅な削減と労働生産性の増加をもたらすものと期待できる。