

氏名（本籍） 高嶋 倫太郎  
学位の種類 博士（人間情報学）  
学位記番号 博甲第 9989 号  
学位授与年月 令和 3 年 3 月 25 日  
学位授与の要件 学位規則 第4条第1項該当（昭和28年4月1日文部省令第9号）  
審査組織 グローバル教育院  
学位論文題目 手指動作支援のための超多関節外骨格システム

	（大学名 職名）	（学位）	（氏名）
主査	筑波大学 教授	工学博士	山海 嘉之
副査	筑波大学 教授	博士（情報科学）	望山 洋
副査	筑波大学 准教授	博士（工学）	河本 浩明
副査	筑波大学 准教授	博士（医学）	鶴嶋 英夫
副査	筑波大学 教授		弥永 真生

## 論文の要旨

手指によって物を把持し持ち上げる動作は日常生活の大多数を占める。しかし、手指麻痺者は手指の屈曲／伸展に困難を抱えているため、物体を把持し持ち上げることに支障をきたしており、QOLの低下を強いられている。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に、手背側より手指の屈曲／伸展を支援し、手指関節間長に関する長さの調整を必要とせずに装着可能な手指動作支援システムの提案・研究開発することを目的としている。

本手法の実現のために必要となる機構解析と原理検証のため、超多関節外骨格機構と単関節、手指関節のモデル化を行うことで、滑節、回転支点、トルクと力の釣合の構造力学的観点から、超多関節外骨格機構の動作により手指関節に力が伝わり、手指を屈曲させることで把持が実現され、手指を伸展させることで把持した物体が解放されることを示している。また、関節の骨格を簡易的に表したリンク構造による幾何学的観点から、手指関節が屈曲／伸展する際に変化する体表面の長さに合わせて超多関節構造をスライドさせることで、体表面に沿った超多関節外骨格機構の動作が実現されることを示している。更に発展させるため、装着者の可動域を考慮した超多関節構造を検討し、本構造を有する超多関節外骨格機構、超多関節外骨格システムを研究開発するとともに、手指モックアップを使用した基礎動作検証として、手指機能に問題のない健常者10名に対して、手指の屈曲／伸展、球形状、円筒形状の物体把持を実現している。

提案システムの手指動作への介入効果を確認するため、脳梗塞、脳出血、脊髄損傷による後遺症により手指の屈曲／伸展に困難を抱えている3名の試験協力者の協力のもと実証試験を実施している。実証試験の結果として、システム装着者の本来持つ手指機能を活かした手指の屈曲／伸展支援、日用品把持支援ができること、また、装着者の代償動作を緩和させた手指の屈曲／伸展支援、日用品把持支援ができることを確認している。この結果より、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

関節外骨格機構を有する超多関節外骨格システムを手指麻痺者の手指動作支援、および日用品の把持支援に適用できることを明らかにしている。

結論として、本論文では、基礎研究開発による概念実証から対象者による実証試験まで一貫した研究開発を通じて、手指麻痺者の手指動作支援、および日用品の把持支援に適用できる超多関節外骨格システムを提案、研究開発できたこと、手指麻痺患者による試験により、日常生活でこれまで困難であった物体把持動作の支援が可能であることを実証し、手指動作支援のための新たな手法として、提案・研究開発した新たな超多関節外骨格システムの先進的成果、有効性、実現可能性を示している。

## 審査の要旨

### 【批評】

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に、手背側より手指の屈曲／伸展を支援し、手指関節間長に関する長さの調整を必要とせずに装着可能な手指動作支援システムの提案・研究開発をしている。加齢にもなって、脳卒中や頸髄損傷や手指の腱の異常などにより、手指に障害が生じると著しく QoL が低下する。提案手法は、従来困難とされた手指の動作支援を実現するために、超多関節構造での外骨格系を提案するもので、軽量で高剛性の超小型リンク系部材で構成されており、手指の関節系と手指のリンク系に沿わせることで、任意の箇所での屈曲できる超小型関節リンク系を実現している。これにより、柔と剛の特徴が実現されるため、指への力伝達と指の長さに影響されない柔軟な屈曲・伸展が実現されている。ソフトロボティクス、サイバニクス、人支援ロボティクスにおいても、従来には存在しない独特の機構であり、世界的にも先進的な研究であると評価できる。物理的、機構学的観点から基礎的原理を示しているが、更に深化させて解析を行うことで基礎分野の学術分野の充実につながると考えられる。原理検証のための基礎試験として、プロトタイプを試作し、受動的関節・リンク系で構成されるモックアップの手指に対して、その手指に沿わせて試験を行い、その状態でロボットハンドのようにモックアップの手指が制御できることを示している。また、ボールを持つ・放す、ペットボトルを持つ・放す、バケツのグリップを握って持ち上げるなどの基礎機能の評価を行い、原理的に実環境での適用可能性を示している。このことは、手指が完全に麻痺した状態の患者に対しても適用可能であることを意味している。このような基礎試験を経て、プロトタイプでの検証後、実際の患者への適用のために改良を進め、何名かの不全麻痺患者に対する適用試験を行っている。その結果、全ての適用事例に対して基礎試験で行った支援項目を達成し、アンケート調査では、全ての不全麻痺患者から最高得点での主観評価を得ており、Patient Reported Outcome の観点からも高く評価できる結果を示している。更に言えば、本研究で提案された技術は、人間補完の観点からだけでなく、機能改善治療の観点からも有用性が期待できる。以上から、本研究は、人間情報学、サイバニクス、工学などの学術的観点からも、また、医療的、社会的観点からも、重要かつ有用な研究であると評価される。

### 【最終試験の結果】

令和3年2月9日、専門委員会において、専門委員会委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、専門委員会委員全員によって、合格と判定された。

### 【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(人間情報学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。