

装着可能な軽量型上肢外骨格パワーアシスト装置 の開発と機能検証†

劉 暢*, 朱 赤**

Development of a Force Sensor-Controlled Upper-Limb Power-Assisted Exoskeleton with Backdrivability†

Chang Liu*, Chi Zhu**

In this study, a lightweight upper-limb power-assisted exoskeleton with high backdrivability was developed. Moreover, a motion capture system was adopted to measure and analyze the workspace of the wearer's upper limb after the exoskeleton was worn. The results were used to evaluate the exoskeleton's ability to support the wearer's movement. Furthermore, the force sensor and EMG sensor was used for power assistance, and the effect of the power assistance was evaluated by means of measuring the wearer's surface electromyography, force, and joint angle signals. Overall, the study showed that the exoskeleton could achieve power assistance and did not affect the wearer's movements.

Key words : upper-limb, power-assisted exoskeleton, backdrivability, workspace

1 はじめに

現在、世界規模での高齢化率が上昇している。特に、日本では出生率の低下とともに長寿化による高齢化が進み、超少子高齢化社会に突入していると言われている。高齢化社会において介護に必要な高齢者の増加に伴い介護者の負担が増加していると考えられる。また、高齢者の就業率からみると運輸・運送、製造、加工、設備、建築業などの重労働を伴う就業者の高齢化もますます進んでいる。このような介護現場と重労働現場の就業者たちでは重い荷物を持ち上げる荷役動作と介護者が被介護者を抱え上げて移動する際、上肢関節に大きな負担がかかる。したがって、パワーアシスト装置の導入が急務となっている。そのうち、上肢関節の負担を軽減できる上肢外骨格パワーアシスト装置を開発することは非常に有意義である。

外骨格パワーアシスト装置は主に回転関節とリンクを組み合わせて使用者の体の外側に装着する装置である。装着者の動作意図に追従して一緒に動作することにより、体にかかった荷重の一部が外骨格で負担されるため、負荷軽減と力補助を実現できる。しかしながら(1)外骨格装置が大きくて重い、使用に不便を生じる。(2)外骨格装置が装着者の運動範囲を制限してしまう。(3)外骨格

装置の装着性が良くない、拘束感を装着者に与えてしまう。以上の問題点が存在するため、外骨格パワーアシスト装置の研究開発を実用化するまでに重大な挑戦が残っている。私たちの研究チームも以前から筋電信号を用いた制御手法の研究と検証のため、非装着型のロボットアームを開発した。また、最小限の筋電信号を用いた制御手法を提案し、1自由度-1筋電センサ（屈筋の筋電信号のみ）での制御を検証して実現した。そこで、本研究ではこれまでの非装着型のロボットアームの開発と制御手法の提案を踏まえて上記の問題点を改善するため、親和性を持つ装着可能な軽量型上肢外骨格パワーアシスト装置の開発を目的とした。

2 外骨格パワーアシスト装置の開発

本研究はまず上肢外骨格パワーアシスト装置の開発コンセプトを決めて、これから具体的な設計と開発方法を紹介する。設計コンセプトとしてはまず重い荷物を持ち上げる場合に最も力補助が必要な肘と肩関節の屈曲・伸展動作に対してパワーアシストをできるようにする。また、装着者の動きを妨げない外骨格パワーアシスト装置の機械構造、及び違和感を感じさせない親和性が求められる。そして、人手不足である介護現場と重労働

† 原稿受理 令和2年3月26日 Received March 26, 2021

* 環境・生命工学専攻 (Department of Environment and Life Engineering)

** システム生体工学科 (Department of Systems Life Engineering)

現場での使用を想定し、外骨格パワーアシスト装置を 1 人でも簡単に着脱できるようにする。更に装置本体は軽量、小型と低コストを目指している。

このような開発コンセプトを達成するため、まず人間の関節の構成に基づいて肘と肩関節の動作を拘束しないような多自由度を持つ外骨格装置の機械構造(図 1)を設計した。具体的には、人間の肘関節は 1 自由度のみで屈曲・伸展動作ができる。肩関節は一般的により複雑な球関節と認識されて 3 自由度を持ち、屈曲・伸展、外転・内転、外旋・内旋動作ができる。外骨格装置の設計はこの 4 つの自由度を考慮して設計した。そのうち、肘と肩関節の屈曲・伸展動作は人間が両腕で荷役の際に主に行う動作であり、最も力補助が必要な動作として外骨格装置が対応する関節をパワーアシスト可能な駆動関節に設計した。それ以外の 2 自由度は回転フリーな受動関節に設計した。従って、このような駆動関節と受動関節の組み合わせにより、装着者の運動を拘束しない上で必要なアクチュエータの数を最小限に抑えることにより軽量化と低コスト化が実現できた。また、人間の肩関節は球関節だけではなく、複数の関節(肩甲上腕関節(球関節)、肩鎖関節、胸鎖関節など)で構成された複合体である。肩複体の運動に伴い球関節の回転中心(上腕骨頭)がスライド運動を発生する。このような運動により装着者の肩関節と外骨格装置の肩関節にズレが生じて、装着者が違和感を感じてしまう。本研究の外骨格装置はこのようなズレも考慮に入れて設計することで、外骨格装置の装着性を更に向上できた。そして、外骨格装置にバックドライブバビリティを実現するため、直流モータと 2 段階の減速機構(タイミングベルトとプーリー、複合遊星ギア)で構成された駆動関節を設計した。駆動関節のバックドライブバビリティにより、制御を加えない場合(着脱時)と不具合が発生した場合(電源が落ちた時)に装着者の動作を制限しないようになった。これにより、装着者が容易に駆動関節を動かすことが可能となり、着脱時の利便性と緊急時の安全性を向上できた。

3 外骨格パワーアシスト装置の機能検証

次に、本研究は開発した外骨格パワーアシスト装置の運動範囲と駆動関節のバックドライブバビリティの実機検証を行った。本研究は外骨格装置の運動範囲の検証として、モーションキャプチャを用いて装着者が外骨格装置を装着している時と装着していない時の運動範囲の定量的な解析手法を提案し、分析を行った。その結果、開発した外骨格パワーアシスト装置を装着していても装着していない時の 8 割以上の動作範囲を達成した。この結果から日常生活に必要な運動範囲と比較することにより、外骨格装置を装着しても日常生活の動作を妨げないことが言える。そして、バックドライブバビリティの検証実験により駆動関節が高減速比(300:1)を持つ上で優れたバックドライブバビリティを有することを実証し、制御を加えていない時も装着者が容易に外骨格装置の関節を動

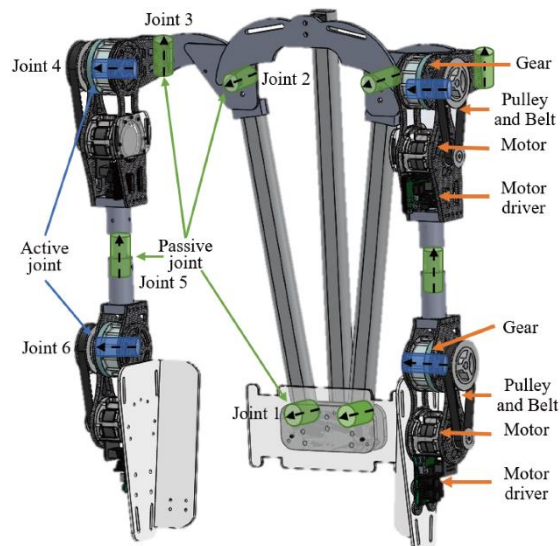


図 1 外骨格パワーアシスト装置の構成

かせることが確認できた。

更に、筋電センサまたは力覚センサを用いた外骨格装置に適用な制御手法を提案し、実機のパワーアシスト機能の検証を行った。先行研究での筋電信号を用いたロボットアームを制御する研究成果を踏まえて、最小限の筋電センサを用いた上肢外骨格パワーアシスト装置の制御と荷役動作の力補助を実現した。また、新たな制御手法として小型な力覚センサを導入し、センサを直接外骨格装置の先端に固定して検出した装着者の力情報により運動意図の判別を実現した。力覚センサを用いた場合は筋電センサのように電極を貼り付ける時間が不要となり、更に汗などの外乱に対して強くなるため使用可能な環境が広がられた。具体的な検証方法としては外骨格パワーアシスト装置を装着して荷物を地面から棚の上まで運ぶ実験を行った。パワーアシスト機能の検証結果として、筋電センサを用いた制御と力覚センサを用いた制御ともに、負荷荷物を運ぶ際の筋電信号と力情報から優れたパワーアシストの効果を確認できた。更に、モーションキャプチャを用いて運ぶ動作の運動軌跡を記録し、外骨格装置は装着者の動作に影響しなくて自然な運ぶ運動ができることを実証された。

4 まとめと今後の展望

本研究はバックドライブ性を有する肩と肘全自由度を持つ外骨格パワーアシスト装置を設計し、実機を開発した。そして、実機を用いて優れたバックドライブバビリティと運動範囲の検証結果を得られた。次に、筋電センサ或いは力覚センサを用いて外骨格パワーアシスト装置に適用な制御手法を提案し、開発した実機を用いて実際の荷役動作のアシスト実験を行った。その結果、記録された筋電信号と力信号から優れたアシスト効果を果たしていることが実証した。今後は被験者を増やして実際の重労働現場での検証実験を行う予定である。