

上肢外骨格パワーアシストスーツの開発における モーションキャプチャーを用いた人の動きの再現及び追従性の評価†

劉暢*, 朱赤**, 小川尚幸**, 松澤隆一**, 朴胎明**

Evaluation of Human Motion Reproduction and Trackability for Upper Limb Power Assistance Device by Motion Capture System†

Chang Liu*, Chi Zhu**, Naoyuki Ogawa**, Ryuichi Matuzawa** and
Taiming Piao**

As the focus of the study in this year, we introduce a method of using a motion capture system to measure and evaluate the motion range of a wearable exoskeleton. The exoskeleton is developed by us for supporting the wearer's upper extremity. In order to avoid hindering the wearer's movement and completely achieve all intended upper limb movements, the flexion and extension movements of the elbow and shoulder joints are actively powered to support the wearer while the other two degrees of freedom (DoFs) of the shoulder joints are freely passive. We further demonstrate the experimental results that validate the effectiveness of the power assistance using surface myoelectric potential.

Key words: Upper Extremity Exoskeleton, Power Assist, Movement range measurement

1 はじめに

現在日本は少子高齢社会となり、生産年齢人口が急速に減少し、働く人そのものが減少しているため、介護や物流などの重労働の場では個人にかかる負担が増大している。そのため、現在作業者の負担を軽減するパワーアシスト装置の開発が盛んでいる 1)。本研究室では人の動きを妨げず、人の動きに追従できる外骨格パワーアシスト装置 (FEA2) の開発を行っている。外骨格パワーアシスト装置の実用性を向上するため、本研究は外骨格パワーアシスト装置の装着時の運動範囲を計測し、人間非装着時の運動範囲と比較した。このような計測と比較評価を用いて、装置の機械構造の問題点を明確し、今後の改良の根拠とすることができる。

これまで外骨格パワーアシスト装置に対する動作範囲の評価とパワーアシスト時の人の動きへの追従性の評価は主に被験者の主観的な評価で行っていた。よって、本研究では外骨格パワーアシスト装置を対象にしてモーションキャプチャーを用いた人の肘・肩関節の可動範囲の比較および人の動きに対する追従性の評価を目的とし、実際の運搬動作のアシスト効果も評価した。

2 上肢パワーアシスト装置の構成

開発した外骨格パワーアシスト装置の構成と関節の自由度の設計を Fig.1 に示す。装置の開発コンセプトとしては以下の通りになる。まず、装着した人間に違和感がない。外骨格は人間に必要な自由度を全部持つ。次に、パワーアシストは全ての自由度に対して行うのではなく、最も必要な動きに対してパワーアシストを行う。更に、外骨格は軽量、低コスト、着脱が容易であることを重視する。

上記の開発コンセプトに従って、人間の肩関節と肘関節のモデルを参考にし、肩の屈曲・伸展動作、外転・内転動作及び前腕の内旋・外旋動作、肘の屈曲・伸展動作の合計 4 自由度を持つ外骨格を設計した。これらの自由度に対応することでより装着者の動作を妨げないことが実現できた。Fig.2 に示すのは駆動機構の設計となる。肩と肘の屈曲・伸展の自由度に 2 つの小型軽量のモータを用いてパワーアシストが可能な駆動関節にし、ギアとプーリーの組み合わせで必要な出力トルクを実現した。また、モータドライバは外骨格のスペース考慮し、駆動機構の近くに設置した。他の 2 自由度は人の動作範囲を制限しないように設置し、受動関節とした。

† 原稿受理 令和 2 年 2 月 28 日 Received February 28, 2020

* 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)

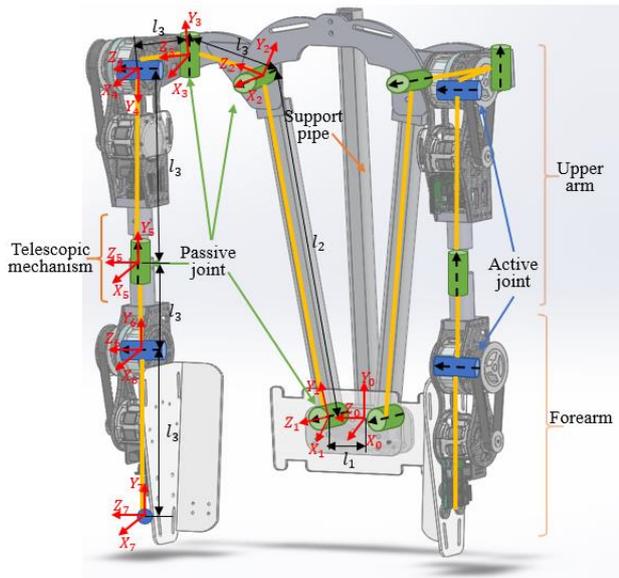


Fig. 1 Developed exoskeleton FEA2 (Flexion and Extension Assistive Device 2)

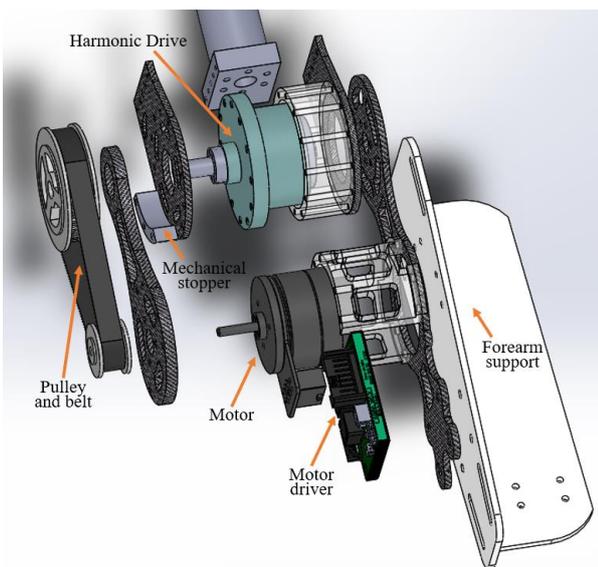


Fig. 2 Configuration of active joint

外骨格のサイズ調整機能は個人差を考慮し、装着者の腕の長さや肩幅の調節機構を取り入れた。軽量な外骨格を実現するため、部品は主にカーボンファイバーと樹脂を用いて製作し、負荷が最も掛かる部品のみアルミで作成した。

本研究の外骨格パワーアシスト装置は外骨格の手先に取り付けた力覚センサを用いて制御する。取り付けのスペースとコストを考慮すると、本研究ではセンサを最小限にし、1腕1力覚センサに抑える。また、小型のマイコンで力情報の信号処理と制御が行われることで、パワーアシスト技術を実現している。



Fig. 3 Measurement by motion capture system

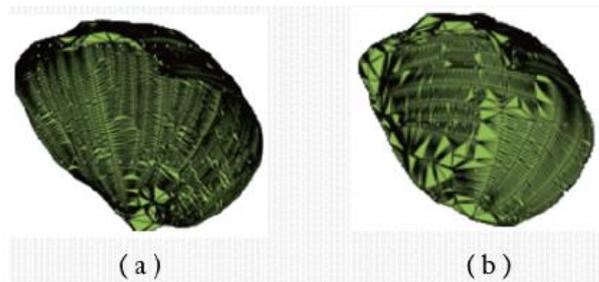


Fig. 4 (a): Elbow's movement range with FEA2
(b): Elbow's movement range without FEA2

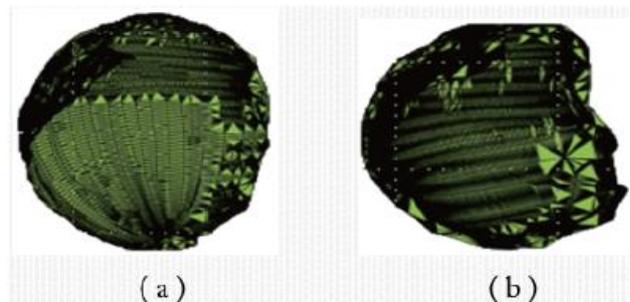


Fig. 5 (a): Shoulder's movement range with FEA2;
(b): Shoulder's movement range without FEA2

3 外骨格パワーアシスト装置の追従性調査

前述の外骨格パワーアシスト装置(FEA2)の設計と製作が完成した。次に、実際の装着実験を行った。各駆動関節の設計角度と人の関節可動域を比較すると屈曲伸展動作は 82.6%、外転内転動作は 100%、外旋内旋動作は 100%、肘関節の屈曲伸展動作は 66.7%まで達成できる。しかし人の自然な上肢の動きは単一した重複性の高い動きではなく、複雑な動作を行っているため、単に各動作の可動角度で可動域を評価するには不十分だと考える。そこで可動範囲の定量的な評価はモーションキャプチャーを用いて外骨格パワーアシスト装置の装着時および非装着時の肩関節の動きと肘関節の動きを計測した。

モーションキャプチャーは、現実の人物や物体の動き

Table 1 Measurement results of the range of motion at the elbow joint

Measured area [m ²]	Subject 1	Subject 2	Subject 3
With FEA2	0.268	0.229	0.251
Without FEA2	0.235	0.218	0.232
Rate	87.9%	87.9%	92.5%

Table 2 Measurement results of the range of motion at the shoulder joint

Measured area [m ²]	Subject 1	Subject 2	Subject 3
With FEA2	1.914	1.330	1.693
Without FEA2	1.591	1.143	1.566
Rate	83.1%	87.9%	92.4%

をデジタル的に記録する技術である。複数のカメラと反射マーカをトラッカーとして用い、撮影する計測空間の周囲にカメラを設置して利用する。本研究は Fig. 3 に示すように、被験者の全身に反射マーカを貼り付けてカメラの撮影範囲内で運動する。

モーションキャプチャーによる運動の計測で一連の運動に関する座標データを取得することができる。この座標データから3次元空間内での運動軌跡を生成でき、さらに3次元の一連の点を囲む境界ボリュームを作成することができる。作成された形状の面積および体積の値を算出することで可動範囲の評価を行った。面積及び体積の精度に関してはバランスボールを用いた検証実験を行った。実寸法がわかるバランスボールをモーションキャプチャーで表面積と体積を計測した結果、その精度が99%を確保できることが確認できた。Fig. 4 と Fig. 5 に生成された運動範囲の形状を示し、表1に被験者3人の肘関節における動作面積の結果、表2に被験者3人の肩関節における動作面積の結果を示す。どちらの被験者とも外骨格を装着しても手先が届く範囲の達成率は全部83%以上であることを確認できた。

参考文献2)により箱を運搬する動作を含めた日常生活でよく行われる動きの運動域を参考とした。これを上肢関節可動域と比較すると、普段の動きで行う角度変化は肘関節可動域の80%以上、肩関節の67%以上達成できれば人の動きを妨害しないことが分かった。表1, 表2に示された達成率を見ると被験者2人ともにこの達成率を超えて動作できたことが分かる。つまり、本研究で開発された外骨格パワーアシスト装置の可動範囲は人の動きを妨げずに動作することが十分可能であることを確認した。

さらに、外骨格を装着する時と装着しない時に計測された運動範囲の面積表示(被験者1)を重ね合わせ比較を行った。その結果は Fig. 6 に示し、(a)は肘関節の運動範囲、(b)は肩関節の運動範囲となる。外骨格を装着場合は(緑)、外骨格を装着しない時の運動範囲(紫)よ

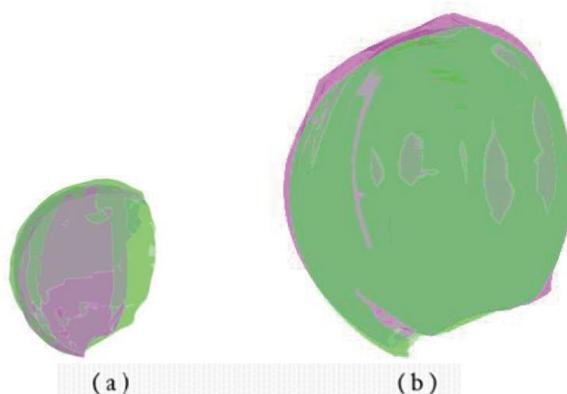


Fig. 6 Overlapping measurement results for comparison

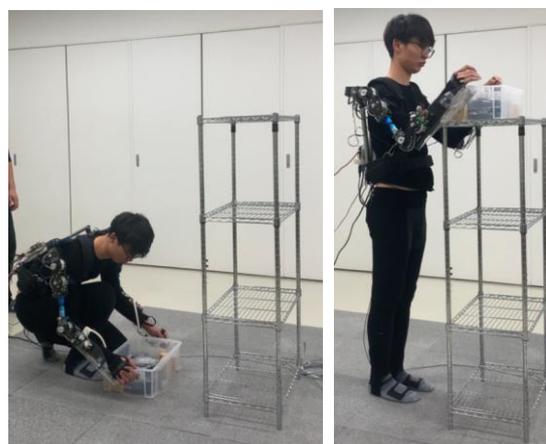


Fig. 7 Power assist experiment of transfer operation

り狭くなったことが図からわかる。また、その方向の運動が制限されていることが確認できた。これは、今後の外骨格の開発に人間の動作においてより高い再現性を持つ外骨格パワーアシスト装置を開発するにあたって重要な指標となるだろう。

4 運搬動作のパワーアシスト実験

パワーアシストの評価は外骨格パワーアシスト装置の装着時と非装着時で、運搬作業を行う際の運動を計測し、比較することで評価を行った。具体的な実験風景は Fig. 7 に示す。地面に置いた箱を高さの調整可能な棚の上に乗せる運搬動作を行った。箱の重さは5 kg と 10 kg の2通りで、それぞれ地面から90 cm と 135 cm の棚へ運ぶ。

実験中に全ての動作がモーションキャプチャーを用いて記録され、被験者の肘関節および肩関節における運動を中心に計測した。さらに、計測結果から肘と肩関節の角度、角速度を算出した。また、筋電信号は直接人間の負荷トルクを反映するため、筋電信号を用いてアシスト効果の評価を行った。被験者が運搬動作を行う際に、腕の筋電信号を計測した。先行研究3)により、肘関節の負荷トルクについて、上腕二頭筋の筋電信号は一番変化

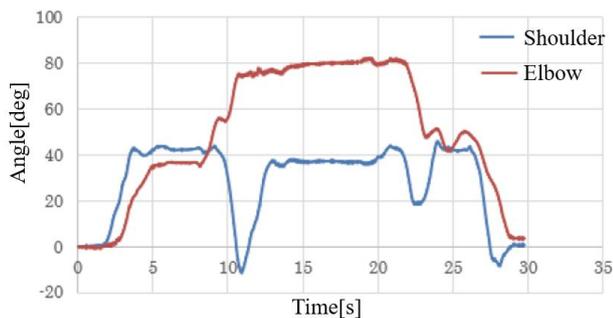


Fig. 8 Angle change of the arm with FEA2

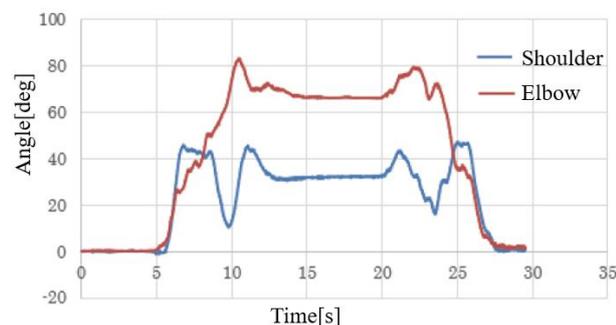


Fig. 9 Angle change of the arm without FEA2

が明らかとなり、評価として使用しやすいことがわかっている。

また、肩関節に対して、三角筋の筋電信号が一番変化が明らかとなる。そこで、本研究は上腕二頭筋と三角筋の筋電信号を選択し、アシスト効果の評価を行った。筋電信号では、DELSYS社製の筋電計を用いて表面近電位を1万倍に増幅し、全波整流、移動平均とローパスフィルタをかけて、使用する。

Fig.8, Fig.9に実験結果の一例として負荷10kg、目標高さ135cmの場合の角度変化結果、またFig.10, Fig.11に筋電の計測結果を示す。

装置を装着した角度の波形と装置を装着しなかった角度の波形を比べると、全体的に似た変化を示していた。他の実験での角度変化の結果でも今回示した実験結果と似た結果が得られ、動作する際の角度変化の傾向は一致していることが確認できた。また、角速度の変化を確認すると、動作する時の角速度の変化はおおよそ同一な波形を表していたことが確認できた。

上腕二頭筋と三角筋の筋電の計測結果を比較してみると、波形および平均筋電値は明らかに減少している。FEA2の非装着時の上腕二頭筋における平均筋電値は0.69V、三角筋の平均筋電値は0.90Vであり、FEA2の装着時の上腕二頭筋における平均筋電値は0.39V、三角筋の平均筋電値は0.71Vであった。上腕二頭筋については45%減少し、三角筋については23%減少しており、パワーアシスト効果を確認することができた。また、他の実験結果でも同様にパワーアシスト効果が確認できた。

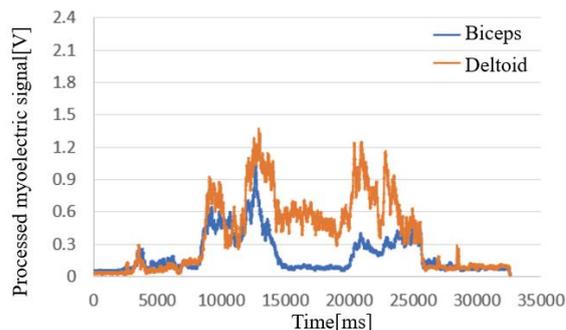


Fig. 10 EMG change of the arm with FEA2

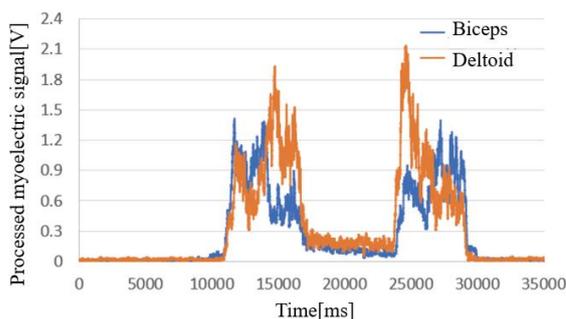


Fig. 11 EMG change of the arm without FEA2

5 まとめと今後の展望

本研究ではモーションキャプチャーを用いて外骨格パワーアシスト装置を装着した場合の可動範囲の評価を行い、人の日常動作を妨げず動作できることを確認した。また、計測結果と人間の可動範囲と比較し、FEA2を装着した時に手が届かない範囲を確認できた。今後の装置の改良に有用な成果となった。

また、運搬動作における肩関節と肘関節の角度・角速度変化及び上腕二頭筋と三角筋の筋電を計測した結果から、人の動きに対して十分追従し、パワーアシストできることを確認できた。

参考文献

- 1) Jun Ueda, Ding Ming, Minoru Shinohara, Tsukasa Ogasawara, "Individual Muscle Control using an Exoskeleton Robot for Muscle Function Testing", Neural Systems and Rehabilitation Engineering, pp. 339-350, 2010.
- 2) Gates, D. H., Walters, L. S., Cowley, J., Wilken, J. M., & Resnik, L, "Range of motion requirements for upper-limb activities of daily living. American Journal of Occupational Therapy", American Journal of Occupational Therapy, 70(1), 7001350010p1 - 7001350010, pp. 10, 2019.
- 3) Chi Zhu, "Power Augmentation of Upper Extremity by Using Agonist Electromyography Signals Only for Extended Admittance Control", IEEJ Transactions on Industry Applications, Vol.133 No.4, pp.1-10