

研究論文

装着可能な腕外骨格パワーアシストスーツの開発†

劉暢, 朱赤*, 千葉遼平, 小川尚幸

Development of a Wearable Lightweight Exoskeleton
for Upper-extremity Power Assistance

Chang Liu, Chi Zhu*, Ryohei Chiba and Naoyuki Ogawa

As the focal point of this paper, we introduce the development of a light and wearable exoskeleton controlled by force signals for upper extremity augmentations to support the elbow and shoulder joints. In order to avoid hindering the wearer and completely achieve all intended upper limb movements when wearing the exoskeleton, 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 to validate the degrees of freedom of the exoskeleton and verify its power assistance using surface myoelectric potential.

Key words: Light and Wearable, Upper Extremity Exoskeleton, Power Assist

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スーツの開発が盛んである¹⁾。

本研究室は腕型の外骨格パワーアシストスーツを開発し、筋電信号を用いたパワーアシストを実現した²⁾。しかし、筋電センサは電極の貼り付けなどの手間を必要とする。電極の場所や汗によるずれ、筋電に個人差があり、量産化に向いていないといった問題点がある。そこで本研究は、外骨格に直接取り付けられる小型な3軸力覚センサを用いた制御手法の開発を行った。

2 外骨格ロボットの構成

開発した外骨格ロボットの構成と実機をそれぞれ Fig. 1 に示す。装置の開発コンセプトは以下の通りである。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て持つ。次に、外骨格は全自由度のパワーアシストを行わず、最も必要な動きに対してパワーアシストを行う。更に、外骨格の軽量化、低コスト化、着脱を容易にすることを目指している。

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回内・回外動作、肘の屈曲・伸展動作



Fig. 1 Completed exoskeleton

作の合計4自由度を持つ外骨格を設計した。このような自由度により、装着者の腕の動作を妨げないことが実現できた。そのうち、肩と肘の屈曲・伸展の自由度に2つの小型軽量なモータを用いてパワーアシストが可能な駆動関節にし、ギアとプーリーを組み合わせる必要な出力トルクを実現した。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。

外骨格の調整機能は個人差を考慮し、それぞれの装着者の腕の長さや肩幅の調節機構を取り入れた。

† 原稿受理 平成31年2月28日 Received February 28, 2019

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

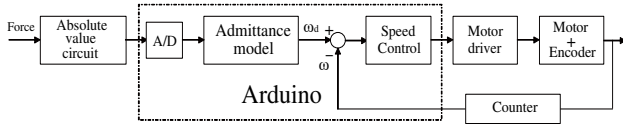


Fig. 2 System configuration

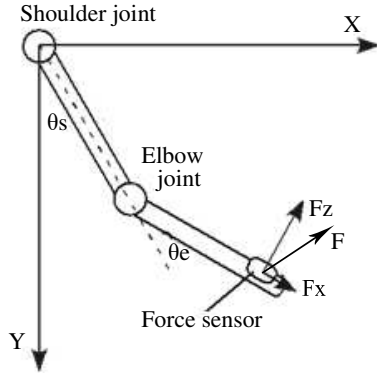


Fig. 3 Installation of force sensor

3 外骨格ロボットの制御

本研究のパワーアシストスーツは、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し、本研究ではセンサを最小限にするため、1腕1力覚センサに抑える。また、小型のマイコンでパワーアシスト技術を実現できるように、信号処理と制御が行われる。

3・1 信号処理

Fig. 2 に装置の制御システムの構成を示す。力センサからの力情報は直接マイコンに読み取られるため、肘肩のトルク情報を算出してから制御信号として使用する。マイコンは制御信号によりアドミッタンス制御で目標回転速度を算出し、モータードライバを経由してモーターを制御する。また、モーターに付いているエンコーダで角度情報を検出し、カウンタ回路を通してマイコンにフィードバックする。

3・2 制御手法

本装置は、肘と肩の屈曲・伸展の運動のみ補助するため、屈曲・伸展自由度における2次元の平面上の力が制御に必要である。Fig. 3 のように、力覚センサは外骨格の手先に取り付ける。使用者が外骨格を装着したら、力覚センサは人の腕と外骨格の腕の間に置き、締めベルトを通して装着者が外骨格に作用する力を検出する。力覚センサで、前腕と垂直方向の力 F_z と前腕と延長方向の力 F_x を検出する。ヤコビアン行列 J を用いて、肘と肩が必要なトルクとして τ_e と τ_s を式(1)で算出する。 θ は外骨格の関節角度を用いる。

$$\begin{bmatrix} \tau_s \\ \tau_e \end{bmatrix} = J^T(\theta) \begin{bmatrix} F_z \\ F_x \end{bmatrix} \quad \dots (1)$$

関節角度はモータのエンコーダを用いて計測する。算出された肘と肩のトルクにより、それぞれ拡張アドミッタンス制御を用いて外骨格の目標角度速度を算出する。制御式は式(2)で表せる。

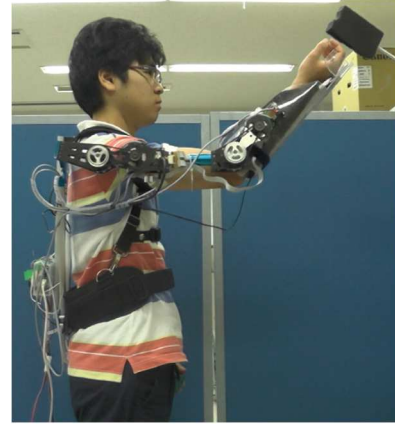


Fig. 4 Verification experiment to detect motion intention

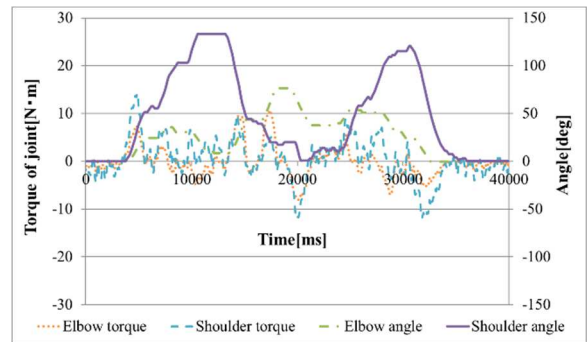


Fig. 5 Results of detecting motion intention

$$\tau_h - \tau_0 = I\dot{\omega}_d + D\omega_d \quad \dots (2)$$

ここで、式(2)の τ_h は、式(1)の力情報の計算で得られた τ_e と τ_s を代入して、それぞれ肘と肩の外骨格の目標角速度より得られる。 τ_0 は負荷重量の補償値で、モード切り替えのしきい値として使用する。 I は仮想慣性モーメント、 D は仮想ダンピング係数であるため、設定により装着者に異なる運動中の負荷感覚を与えることが可能になる。 $\dot{\omega}_d$ は関節の目標角加速度、 ω_d は求める関節の目標角速度になる。そこで、

- $\tau_h > \tau_0$ の時 $\Rightarrow \dot{\omega}_d > 0$: 持ち上げモード
- $\tau_h = \tau_0$ の時 $\Rightarrow \dot{\omega}_d = 0$: 維持モード
- $\tau_h < \tau_0$ の時 $\Rightarrow \dot{\omega}_d < 0$: 持ち下げモード

上記のような τ_h と τ_0 の関係により、1つの制御則から持ち上げ、維持、持ち下げの3つのモードを切り替えることができる。 τ_0 は、装着者が負荷を持って姿勢を維持する時に必要な最大トルクの30%とし、姿勢を維持した時に正確な負荷情報のフィードバックと負担軽減ができるようにする。

4 パワーアシストの実験

外骨格パワーアシストスーツを用いて、運動意図の追従、および実際の負荷荷物を持ち上げるパワーアシストに関する実験を行った。ここではまず、運動意図の追従



(a):The Experiment without Assistance (b):The Experiment with Assistance

Fig. 6 Experimental landscape

実験を紹介する。

4・1 肘肩連動の追従実験

前述の制御手法を用いて、Fig. 4 に示すように、装着者が負荷荷物を持たせずに、屈曲・伸展動作における平面に任意の目標位置を指定する。装着者が外骨格の腕とともに手先を目標位置まで移動する。外骨格が目標位置まで届いたら、被験者に次の目標位置を連続的に指す。装着者が次に目標位置までに移動する。

その実験結果として、Fig. 5 に示す肘肩のトルクと角度から、連続かつ滑らかな連動動作ができることが確認された。これにより、力覚センサを用いた制御手法は人の運動意図に対して高い追従性を有している。

4・2 パワーアシストの実験

次にパワーアシストの実験として、20代の男性を装着者として5kgのダンベルを肘肩連動で持ち上げた。実験の様子をFig. 6に示す。外骨格の先端に取り付けた力覚センサで得られた力情報を制御信号として、上記の制御手法で外骨格をコントロールする。筋電信号は直接人にかかった負荷を反映するため、本実験の外骨格のアシスト効果は筋電信号を用いて評価した。

実験は、装着者がダンベルを指定された高さまで持ち上げた。そして、持ち上げた高さで約5秒間維持して下ろした。実験動作は、連続して2回行った。外骨格の動作情報とトルク情報をFig. 7に示す。その結果から、指定された高さまでは肘と肩が両方とも約40°を屈曲した。外骨格の動作は、トルク情報の変化に強く追従していることがわかった。

外骨格を装着しない時(Fig. 6-a)と、外骨格を装着してパワーアシストを行う時(Fig. 6-b)の筋電信号を計測した。計測筋電信号は、同様な処理手法³⁾をかけてから得られた。その結果をFig. 8に示す。筋電信号の平均値を導出すると、2つの筋電信号は両方とも約30%減少したことがわかる。筋電信号は直接負荷トルクの大さを反映するため、この結果から外骨格パワーアシストスーツを用いることで装着者の負担は約30%軽減できたと考えられる。

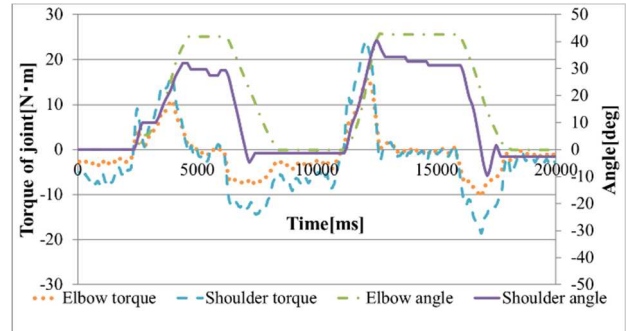


Fig. 7 Exoskeleton's data of power assisting experiment

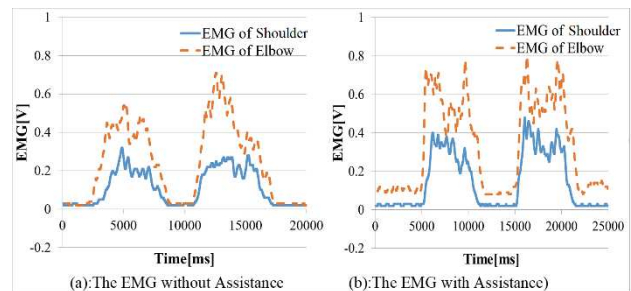


Fig. 8 Experiment evaluation using myoelectric signals

5 まとめと今後の展望

本研究は、力覚センサを用いて装着可能な軽量腕型外骨格パワーアシストスーツの制御手法を提案した。力覚センサに関連する機械、制御システムと回路を設計して作製した。提案した制御手法を用いて装着者の運動意図の追従、パワーアシストの実験検証を行った。

今後は力覚センサの取り付け方を改善し、使用者の手の拘束をしないように実用性を向上させる。

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) K. Kiguchi, S. Kariya, K. Watanabe, K. Izumi, and T. Fukuda, "An Exoskeletal Robot for Human Elbow Motion Support - Sensor Fusion, Adaptation, and Control", Proc. of IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. Part B: Cybernetics, Vol. 31, No. 3, pp. 353-361, 2001.
- 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.

