

生体信号に依らないロボットスーツと装着者運動の 同調制御システムの開発

Control System Design for Wearable Robot Suit Working in Phase with
Human Motion Without Biological Signal Measurement

2031015



研究代表者

山口大学大学院理工学研究科

准教授

藤 井 文 武

〔研究の目的〕

近年、身体に装着して利用し、随意運動の補助やリハビリテーションの支援を行うリハビリテーションロボティクスと呼ばれる分野の発展が目覚ましい。ロボット技術を応用したリハビリテーション支援では、装置を装着した人の運動意図を如何に検出し制御に活用するかが重要な課題であり、表面筋電位（sEMG）の利用が提案されているが、妥当なアシストトルクを提供するためには、個々人によって異なるsEMGと筋活動量の関係を学習することが必須となり、従って計算負荷の高い制御系の実装が不可欠と考えられる。

一方、農林業など従事者に高齢者が多く、肉体的労働が負荷となりうる方の軽度な運動支援や、介護・建設等の肉体的に過酷な労働の労働負荷を軽減化する目的のロボットスーツも活発に研究開発がなされている。それらの装置では、装着されているアクチュエータの駆動を手動操作（呼吸、体姿勢の検出など）で行うものや、装着者が意図する運動を行った結果として得られる外界とのインタラクションの結果（床反力、筋肉の変形量など）を検出してアクチュエータの動作指令値決定にフィードバック利用するものが多い。これらの信号には、EMGを利用する場合のような学習過程が不要であるが、装置装着者の当初の運動意図と、測定信号フィード

バックの結果として生じるアクチュエータによるアシストの間には相応の位相遅れが含まれ、それが装着者の自然な運動を阻害する場合がありますと懸念される。そこで本研究では、装着者の運動意図をsEMGなどの生体信号によることなくできる限り速やかに検出し、ロボットスーツの動作支援に活用することで、装着者の運動と同調したアシストを提供することが可能となるアシストスーツ制御系を考案し、試作装置を用いた初期評価実験を行うことで、アイデアの有効性の検証を行う。

〔研究の内容・成果〕

2.1 関節角加速度推定システムの構築

我々は、従来の身体装着型ロボットによる動作支援で従来用いられている「動作結果のセンサによる検出とフィードバック」に代わり、動作筋起の段階での動作意図と強度の推定に、動作を起こす起源となる力・トルクとほぼ同相の信号であると期待される関節角加速度を利用することが有効であるとの考えから、各動作補助対象関節において独立に関節角加速度推定機構を実装しそれをアクチュエータの制御に活かすことを考えた。肘関節についてその装置構成を模式的に表したのが図1である。

各関節に、その回転角度を検出するためのポテンシオメータと、回転角速度を検出するため

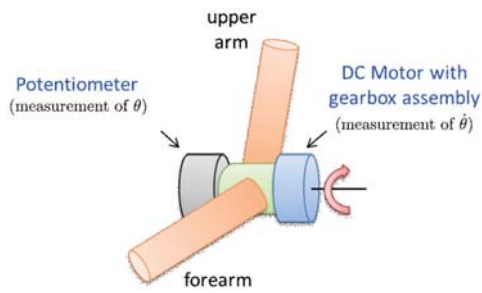


図1 関節角加速度推定のための測定機構

のDCモータを装着した。DCモータは、将来的な実用化を視野にタコジェネなど高感度な回転速度センサの安価な代用品として利用したものであるが、その構造上リップルと呼ばれる電圧の脈動がタコジェネより大きく表れる。人体運動に伴う関節の運動角速度は高くないと考えられるため、DCモータを直接関節に接続した場合の関節回転による起電力もさほど小さくなく、そこにリップルが乗れば回転角速度の測定精度は著しく劣化すると懸念される。そこで、関節軸に関して小型ギヤボックスを増速方向に接続し、起電力の増加とリップルの相対的な影響低減を図ることとした。

測定した関節角度 θ と関節角速度 $\dot{\theta}$ は、 $x = [\theta, \dot{\theta}, \ddot{\theta}]^T$ を状態とする関節運動を支配するシステムにおける測定出力である。これをもとに $\ddot{\theta}$ を推定するカルマンフィルタを設計し、 $\ddot{\theta}$ の推定値を計算する。

2.2 駆動アクチュエータの選定と動特性モデル化について

身体装着型ロボットスーツにおいて、将来の実用化を考えればアクチュエータの選定も重要な検討課題である。研究代表者は本助成による研究課題の開始前より、アクチュエータ自体のコンプライアンスが重要なアプリケーションでよく用いられる空気圧人工筋肉（マッキベンアクチュエータ：PAM）の利用を前提に、制御のための検討を行ってきた。前節で述べた「加速度推定値をトリガとするアシストの実施」はアクチュエータをPAMに限る技術ではなく、

他のアクチュエータに対しても適用可能なものであるが、今回は制御によらないコンプライアンス特性を重視してPAMを利用することとした。

PAMへの空気圧入力に対する応答は、負荷の大きさにより変化することが知られており、その特性の厳密なモデル化は極めて難度の高い作業となる。しかし、精密位置決め用途と異なり、ロボットスーツでの利用には特徴を定量的に表現できるモデルがあれば十分であるとの考えから、できるだけ簡素なモデルの構築を目指して検討を行い、アクチュエータの外部スレッドの飽和型非線形弾性を表現する項を含む

$$m\ddot{x} + c\dot{x} = (a_1x + a_0)P - k\sqrt{x} - F_L$$

なる形の簡易な二次非線形モデルを提案した。ここで x はアクチュエータの収縮量、 c , k , n , a_1 , a_0 はアクチュエータの特性を表す物理パラメータであり、 m および F_L は外部負荷の質量及び力相当量である。実際に使用するアクチュエータを対象に、負荷をけん引する実験を行ってパラメータ同定を実行し、得られたモデルを用いて計算したアクチュエータ応答と実験での実測値を重ねてプロットしたのが図2となる。低圧域で多少差が観察されるものの、全般的に良好に実験値と一致していることがわかる。

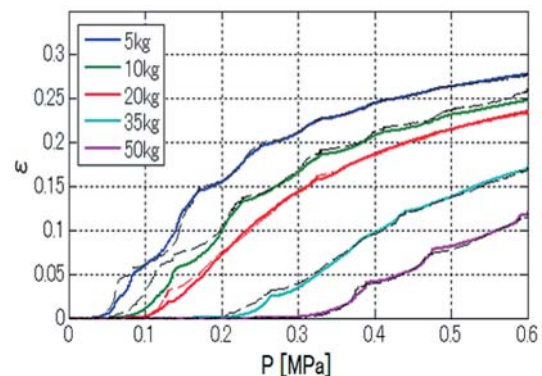


図2 空気圧人工筋肉モデルの応答シミュレーションと実測値の比較

2.3 身体装着型動作支援装置の試作

今回構築する制御系を評価するために、身体装着型のロボットスーツを試作した。介護作業において、ケアワーカーの身体的負荷が最も大きいのは、被介護者が寝たきりやそれに近い状態になっている場合の移動・移乗である。図3は、前傾姿勢からベッドに寝たきりになっている被介護者を抱き起す動作を行った際に腰・肩・肘の各関節に必要なトルクを数値計算したものであるが、特に動作の初期（腰の前傾角 θ_1 が大きい場合）において非常に大きなトルクが必要となっていることがわかる。この大きな負荷が日常的に作用した結果として腰痛・背筋痛や腱鞘炎の発症につながるものと考えられる。

そこで、腰の引き起こしと両肩と両肘を使った抱きかかえ動作に補助トルクを与えることが出来るよう、図4の模式図に示される5つの能動関節を有するスーツを製作した。両腕の肩・肘関節の駆動用に1本、背中の引き起こし動作用には負荷が大きいことを考慮して2本のアク

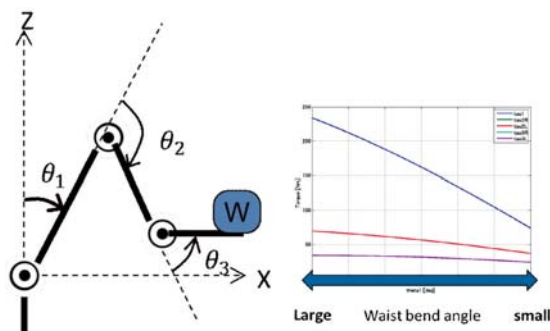


図3 抱き起し作業に必要な関節トルクのシミュレーション結果

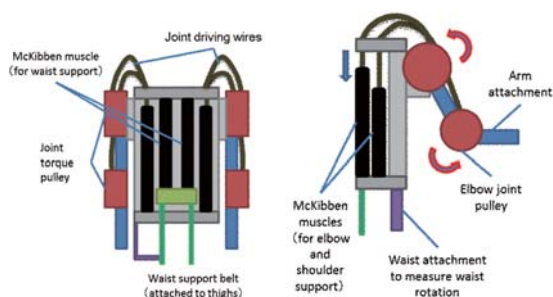


図4 試作ロボットスーツ構造の背面図（左）と側面図（右）



図5 試作ロボットスーツ

チュエータを並列に利用することとした。実際の装置の写真を図5に示す。

2.4 制御システムの構築

ロボットスーツの制御系の構成において最も重要な性能指標は装着者の身体運動との「同調」である。身体運動と同調することで、ロボットスーツは拡張された身体の一部となり、装着者はロボットスーツを装着していることを意識することなく自然な動作が可能となると期待される。今回のシステムではこれを実現するために、ロボットスーツを駆動する信号として制御系に与える「目標値信号」を装着者の運動意図から遅れないものにする、フィードバック制御系の目標値変化に対する速応性を十分なものとするを目標に制御系の構成を考案した。しかし、速応性だけが設計の規範ではなく、必要十分なアシストトルクが適切な位相で供給されなければアシストスーツとしては機能しない。これら3つの要求を全て満足することを目標に、試作ロボットスーツに実装した制御系の全体図を図6に示す。

まず、人体運動意図と目標値信号の遅れがないということに関しては、前述のように各関節の運動加速度を推定し、これを関節運動補助の目標値として利用することで解決を図った。その場合、測定された関節角度および角速度と、

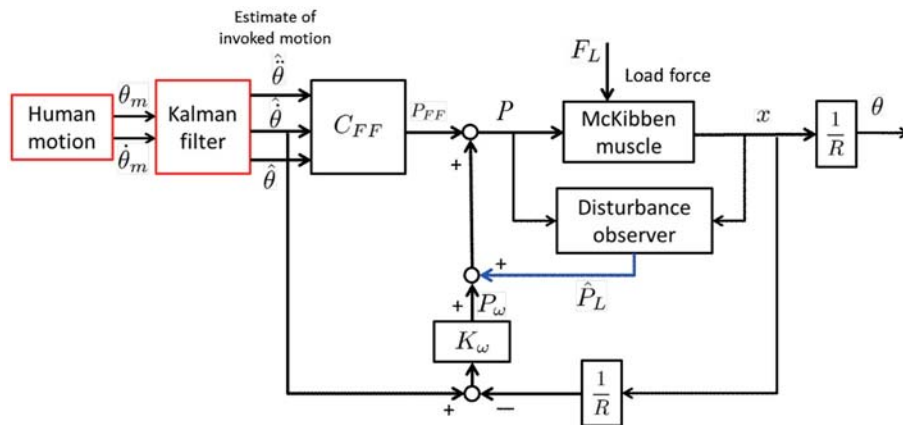


図6 フィードバック制御系の構成

推定された角速度と、アクチュエータの収縮による角度変化・角速度・角加速度が一致する必要がある。そのため、前述したPAMの提案モデルをフィードフォワード制御に利用して（図6中に C_{FF} ）、フィードフォワード供給圧力 P_{FF} を定めた。これが速応性向上のための対策である。

一方、アクチュエータに十分な関節補助トルクを発生させるため、一般に外乱オブザーバーと呼ばれる仕組みをPAMのモデルを用いて実装している。PAMにある圧力の空気を供給した時にアクチュエータに収縮が見られなければ、それはその時点においてはアクチュエータが発している収縮力が負荷に対して十分ではないことを意味する。その場合

$$\hat{F}_L = (a_1 x + a_0) P - (m \ddot{x} + c \dot{x} + k \sqrt[n]{x})$$

は正の値を取ると考えられるので、それを P_{FF} に加えて供給圧を高めれば、ある段階で外的負荷に打ち勝つだけの空気圧に達し関節の運動が始まると考えられる。一度関節運動が始まった後、不必要に大きなトルクが与えられると装着者の意図を上回る速度の運動が発生することになり危険である。これを抑止するため、カルマンフィルタによって低域のリップルが低減化された速度信号を目標値と見なして角速度誤差の比例フィードバック制御を行っている。図6の

K_ω はそのゲインである。

紙面の都合で省略するが、以上の制御系を実装して軽いおもりを持ち上げる動作を補助するという基礎的な評価実験を行い、初期段階としては十分な応答性と身体運動への追従性を実現できていることを確認した。

[今後の研究の方向・課題]

生体信号をアシストのトリガに用いないロボットスーツ制御系の実現に関し、補助対象関節の関節角加速度推定値を用いる二自由度制御系を構成し、試作したロボットスーツに実装してその動作を確認した。応答性についても違和感はなく、機械的な機構の身体への装着を意識することなく運動を行うことが可能であった。

しかし、例えば寝たきりの人のベッドから車椅子等への移乗という作業一つを取ってみても、ケアワーカーの姿勢により各関節に掛かる負荷は時間的に変動するため、固定のパラメータを用いた外乱オブザーバーが推定する負荷は精度が高いものとは言い難い。これに対応するため外乱オブザーバーの機能向上を図る作業に現在着手している。また、図6では2つのフィードバック制御はともに比例フィードバックであり、この部分の補償器の設計にも性能向上の余地がある。これら制御ソフトウェア面の機能向上に加え、フレームの試作2号機を製作し、1号機

で問題となった点を解消しより本格的な性能試験と実フィールドに近い環境での評価・改善を行う必要がある。

[成果の発表・論文等]

[論文・国際会議発表]

1. F. Fujii *et al.*, "A Simple Phenomenological Modeling of McKibben Pneumatic Actuator and its Application to Control," Proceedings of 2013 IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics, pp. 4724-4730, 2013
2. Y. Hirose and F. Fujii, "Development of Joint Acceleration Based Control system for Wearable Assist Device," Proc. Int. Conf. Innovative Application Research and Education, 2013

3. F. Fujii *et al.*, "Use of Angular Acceleration and Velocity Estimates for Control of Pneumatic-Powered Wearable Motion Assist Device," Accepted for Presentation at the 23rd IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication (RO-MAN14), Edinburgh, UK, 2014

[学会発表]

1. 村田宏嘉, 廣瀬湧太, 藤井文武, "マッキベン型アクチュエータの動特性のモデリングに関する研究," 日本機械学会ダイナミクス・デザインコンファレンス(D&D 2013), 九州産業大学, 2013年8月
2. 村田宏嘉, 藤井文武, "マッキベン型アクチュエータを用いた関節アシストシステムの制御系の構成," 日本機械学会 2014 年度年次大会, 東京電機大学, 2014 年 9 月