

動作認識・解析に基づくスマートスーツの補助力最適化

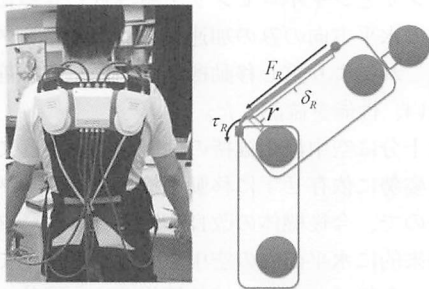
北海道大学 ○玉井 伸幸, 田中 孝之, 奈良 博之, 日下 聖, 金子 俊一
要旨

我々の研究において弾性材の張力を利用したセミアクティブ機構による軽労化装置“スマートスーツ”を開発している。スマートスーツは、センサにより得たデータを用い人間の姿勢を推定し、後背部に配置した弾性材の伸張量をアクチュエータにより制御することで人間の筋肉に対して一定の補助力を発揮するような機構を有する。今回の報告ではセンサにより推定した腰部屈曲角度を用いた弾性材伸張量最適制御手法について報告する。

1 はじめに

近年、日本は超高齢社会となり65歳以上の人口が3000万人を越え、総人口の24.1%をしめる状況となっており、介護労働者の需要が増加している。介護労働は肉体的な負担も大きい、特に腰部への負荷は日常生活にも支障をきたすため、できるだけ免荷したい。このような問題を解決する手法として、我々は装着負担が少なく装着者の動作を妨げない軽労化[®] “スマートスーツ” [1] の開発を行っている。スマートスーツの補助力設計法には、関節の角度・角速度より筋の負荷を推定するモーションベーストアシスト法 [2] を用いている。

本研究では、動作を3次元動作計測機で計測し、筋骨格シミュレータにより計算することで関節角度・角速度に対する筋肉の負荷トルク特性を導き、弾性材に期待する補助トルクを發揮させるために必要な弾性材伸張量制御系を構築することを目的としている。今回、腰部屈曲方向関節角度・角速度に対する脊柱起立筋補助のための弾性材伸張量制御系を構築したので報告する。



(a) 外形 (b) 補助力の作用
図 1: スマートスーツ

2 スマートスーツ

スマートスーツとは、弾性材（ゴムバンド）の張力を利用して身体の負担や疲労を軽減させることを目的とした軽労化[®]スーツである。後背下部に配置した弾性材をスマートスーツ上部に配置したモータユニットで巻き取り、伸張量を制御することで補助力の調整を実現する。Fig.1(a)にスマートスーツの外形を示す。Fig.1(b)に示すように、腰部に対して脊柱の進展方向に補助トルクを加えるため、立位を基準として考えると、補助力は姿勢復元力として働くことになる。これにより、姿勢維持に要する腰部の負担が軽減されると考える。

3 屈曲動作解析

まず、屈曲動作を作成する。直立姿勢から屈曲する動作と屈曲姿勢から起き上がる動作について動作時間 T_m を変えながら作成した。動作の作成には変形正弦曲線を用いた。

筋骨格シミュレータを用いて後背部の筋肉にかかる負荷トルクについて解析する。対象とする筋肉は脊柱起立筋（腰方形筋、腰腸筋、胸最長筋）である。解析結果より求められた腰部屈曲方向関節角度 θ_{wp} と腰部筋肉負荷トルク τ_m との関係を図 2, Fig. 3 に示す。

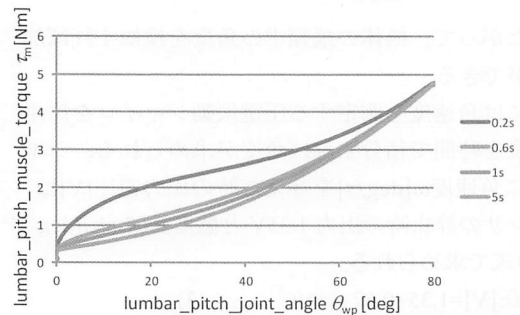


図 2: 曲げ動作時の筋發揮トルク

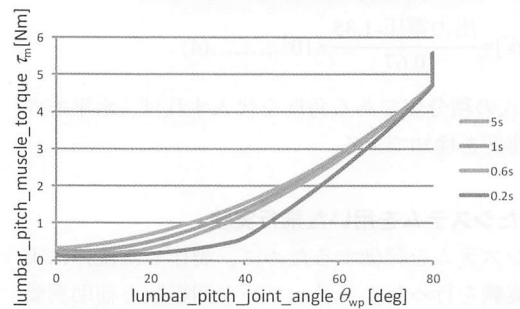


図 3: 起き動作時の筋發揮トルク

4 弾性材伸張量制御式

以上を用いて、スマートスーツが制御すべき弾性材伸張量の導出を行う。まず、筋發揮トルク τ_m に補助率 α をかけ、スマートスーツの弾性力により腰部屈曲方向関節角度に対して發揮すべきトルク τ_R を

$$\tau_R = \alpha \cdot \tau_m \quad (1)$$

と求める。 τ_m と弾性材伸張量 δ_R との関係は弾性係数 k とモーメントアーム r を用いると

$$\tau_R = F_R \cdot r = k \cdot \delta_R \cdot r \quad (2)$$

となる。ここで、 F_R は弾性力である。 r については筋骨格シミュレータより求められる動作に対する筋肉のモーメントアームを r_{SIMM} 、一般的な皮膚の厚みを r_{SKIN} とすると、

$$r = r_{SIMM} + r_{SKIN} \quad (3)$$

と求められる。 k については先行研究により以下のような特性を持つことがわかっており、今回使用している弾性材においては係数 $A=60$ である。

$$k = A/\sqrt{\delta_R} \quad (4)$$

よって、式(3)に式(4)を代入すると、

$$\begin{aligned} \delta_R &= \{\tau_R/(rk(\delta))\}^2 = \delta_A + \delta_H \\ \delta_A &= \{\tau_R/(rk(\delta))\}^2 - \delta_H \end{aligned} \quad (5)$$

ここで、 δ_H は人間の皮膚の伸びによる弾性材伸張量であり、 δ_A はアクチュエータの巻き取りによる弾性材伸張量である。 δ_A が制御の目標値となる。得られた目標値より、実際にモータで弾性材伸張量を制御するために本研究では、以下のような制御式を提案する。

$$\delta_A = K_P \theta_{wp} + K_D \dot{\theta}_{wp} \Big| T_m + C \quad (6)$$

K_P , K_D はそれぞれ腰部屈曲方向関節角度 θ_{wp} 、角速度 $\dot{\theta}_{wp}$ に対する制御ゲインである。 C は定数である。 T_m は動作時間である。係数 K_P , K_D および定数 C の値は重回帰分析を用いて求める。重回帰分析により求めた決定係数は0.97、最大の誤差は約30mmである。Fig. 5に目標値と近似式との関係のグラフを示す。

ここで、動作時間 T_m の求め方について述べる。 T_m とは、直立姿勢から屈曲姿勢もしくは、屈曲姿勢から直立姿勢への一連の動作にかかる時間である。以下に式を示す。

$$T_m = \dot{\theta}_{wp}|_{T_m=1s}(\theta) / \dot{\theta}_{wp} \quad (7)$$

分子はセンサにより得た関節角度 θ_{wp} に対応する $T_m = 1.0s$ の場合の関節角速度 $\dot{\theta}_{wp}|_{T_m=1s}$ である。分母はセンサにより得た関節角速度 $\dot{\theta}_{wp}$ である。これを計算することにより動作時間 T_m を得ることができる。

求めた制御式を使用できるかどうかの確認のため、3次元動作計測機によるデータを元に計算を行った。

動作時間 $T_m=0.6[\text{sec}]$ 、で曲げ起き往復の動作(計1.2[sec])を行ったときの腰部屈曲方向関節角度 θ_{wp} と腰部屈曲方向関節角速度 $\dot{\theta}_{wp}$ の関係をFig. 8に示す。また、そのときに求めたアクチュエータによる弾性材伸張量の制御値と目標値との関係をFig. 9に示す。

Fig. 9より弾性材伸張量制御をセンサにより得られるデータをもとに行えることが確認できた。

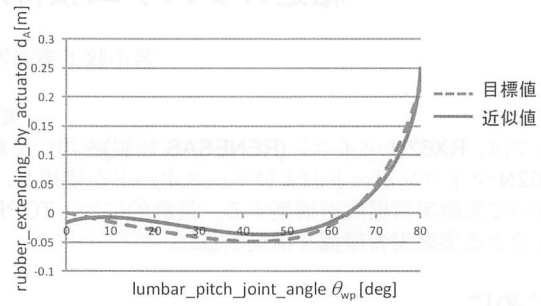


図 4: 弾性材伸張量の目標値と近似値

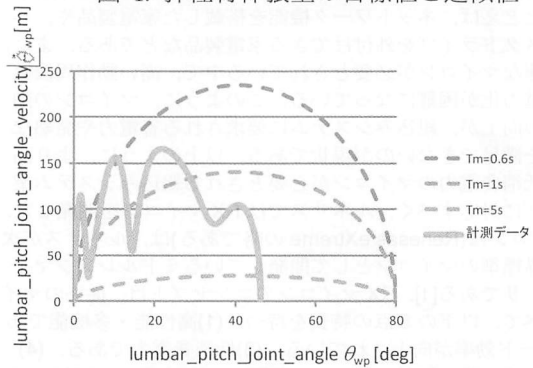


図 5: 速度軌跡と計測データ

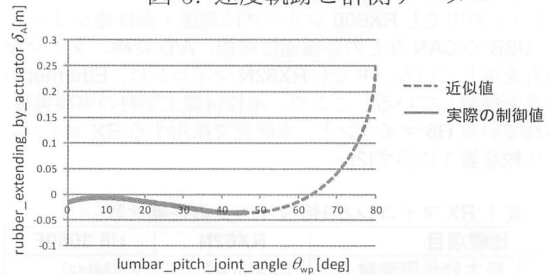


図 6: アクチュエータによる弾性材伸張量

5 結論

今回、腰部屈曲方向関節角度・角速度に対する後背部筋肉の補助のためのスマートスーツ弾性材伸張量制御系を構築することができた。今後スマートスーツ実機に開発した制御側を搭載して実験を行い、導出した制御式による制御が期待する効果を発揮するかの確認をする。

参考文献

- [1] T.Tanaka, et al, Smart Suit: Soft Power Suit with Semi-active Assist Mechanism, Proc. of ICROS IC-CAS2008, 2002-2005 (2008).
- [2] 今村ほか:” モーション・ベースド・アシスト法による除雪作業用スマートスーツの設計”, 日本機械学会 2009 年度年次大会講演論文集, Vol.7, pp.287-288 (2009)