

自転車漕ぎ補助用スマートスーツの補助力制御のための運動解析

北海道大学 ○内藤 葉月 北海道大学 田中 孝之
北海道大学 金子 俊一 釧路工業高等専門学校 梶原 秀一

要 旨

自転車漕ぎ運動における脚部負担軽減を目的としたセミアクティブ筋力補助装置の制御法を作成するために、自転車漕ぎ運動を解析した。自転車漕ぎ運動をモデル化し、運動方程式を解くことでシミュレーションを行い、ゴムの弾性率の違いが運動に与える影響を解析した。また、実験を行い実際にはペダルにどのような力が加えられているのかを確認した。そして、開発中のセミアクティブ筋力補助装置の概要も紹介する。

1. 序論

近年、環境に対する負荷が低いことや健康的であることから自転車による移動が見直され、電動アシスト自転車のアシスト制御設計の研究や、中高年の運動不足解消や筋力増強用の、自転車エルゴメータ負荷制御などの研究もなされている。我が研究室では「農業用スマートスーツ」というものを開発し、腰と膝の補助に成功した [1]。このスマートスーツはモータの出力を直接ではなく、ゴムを介して補助力としているため安全性が高い。さらに、ゴムの弾性力を用いるため、大きなモータが不要となり、小型軽量である。このノウハウを活かし自転車漕ぎ補助用スマートスーツを開発することで小型軽量、安全であり、さらには自転車を降りた後の補助も期待できるまったく新しい筋力補助システムを作ることが出来ると考えている。

2. スマートスーツの概要

Fig.1は今回、開発したスマートスーツである。

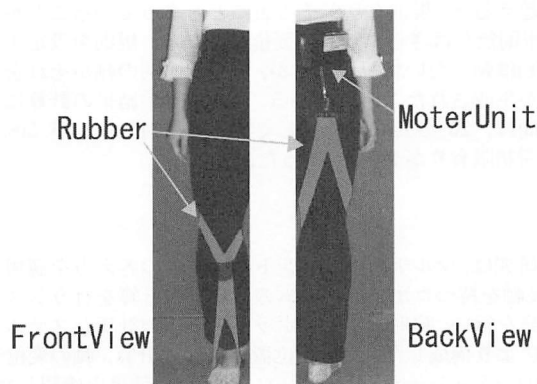


Fig. 1: Smart Suit for Cycling

ゴムが膝下で交差するように、八の字型に配置され、足の裏と腰をむすんでいる。ゴムはずれないよう膝下に取り付けられた紐の輪をくぐらせている。左右2つのモー

タユニットがそれぞれのワイヤーを巻き取ることで、右足と左足それぞれ別々に補助力を与えられるようになっている。また、膝に曲げセンサを取り付けることで状態を推定する。

3. ゴムの硬さによる補助率の変化

自転車をモデル化して運動方程式を導出し、ゴムの硬さの影響をシミュレーションにより調べた。

ヒトは比例制御を行い速度を調節していると仮定し、目標速度を与えたとき、遅い場合は速度の差に比例したトルクをかけ、速くなってしまった場合は摩擦により減速することとした。そのときの速度を、運動方程式から4次のルンゲクッタ法を用いて求め、再び目標速度と比較し次の瞬間のトルクを決める。これを1msごとに繰り返しトルクの時間変化を求めた。目標速度は3m/sとした。

まず、ゴムの弾性率 $k = 0$ の場合、つまりゴムを用いず通常通り自転車を漕ぐ場合と、 $k = 1000$ の場合を比較した。Fig.2がそのシミュレーション結果である。

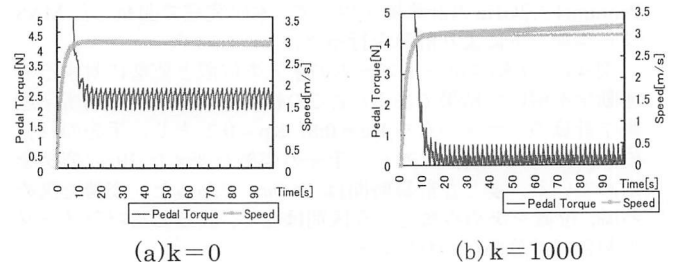


Fig. 2: Influence of Stiffness

漕ぎ始めから自転車が目標速度に到達するまでは共に非常に大きなトルクが必要となっている。しかし一度目標速度に到達した後は、 $k=0$ の場合は 1.9~2.7N 程度、 $k=1000$ の場合は 0~0.7N の入力で、等速運動を実現できることがわかる。 $k=1000$ の場合はトルクが $k=0$ の場合

の 1/4 と小さくなっており、ゴムの補助力により負担が軽減されていることがわかる。また、等速運動を続けている際に入力振動しているが、この周期はペダルの回転周期と合致しており、何らかの関係があると思われる。

次に、Fig.3 はゴムの弾性率によって必要となるトルクがどのように変化するかをグラフに示したものである。横軸には時間を、縦軸にはその時刻までにペダルに加えたトルクの合計をプロットした。

漕ぎ始めに必要なトルクにはゴムの弾性率による変化は

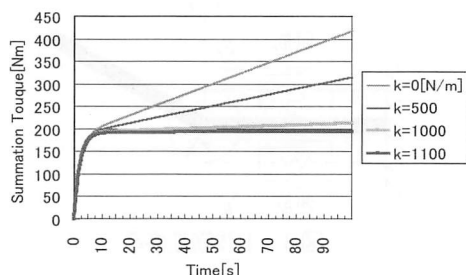


Fig. 3: Compare Influence of Stiffness

見られないが、等速運動を維持するために必要となるトルクがゴムの弾性率によって変化していることがわかる。弾性率 $k > 1100$ のゴムを使用した場合、ペダルの回転周期がゴムの固有振動に一致し目標速度を維持できずに発散してしまった。現実でこのような状態になった場合は下肢がゴムに引っ張られないように力を発揮し、発散はしないもの下肢に負荷がかかると予想される。この境界となる弾性率は、摩擦などのパラメータにより変動してしまうため、設計する際に注意が必要となる。

4. ペダルトルク測定実験

実際にペダルを漕いだときにどのような力がかかっているのかを測定するために、クランクにひずみ計を取り付け、歪からペダルにかかるトルクを測定した。まず、ひずみ計のキャリブレーションを行うために、片足分のクランク長、クランクを垂直にした時の歪、クランクを水平に保ちつつペダルに既知の錘を吊るした時の歪を測定し、これらの結果から力と歪の関係とクランク自体の重さを求めた。次に、ペダルを漕いだときのトルクを測定した。トルクは加速度により変化するため、できるだけ一定の速度になるように気をつけながら 10 回転ペダルを漕いだ。ペダルの角度はジャイロセンサを用いて測定した。キャリブレーションの結果を用い歪の値をトルクへと変換し、その値の平均をペダル角ごとに求めた。それをプロットしたものが Fig.4 である。

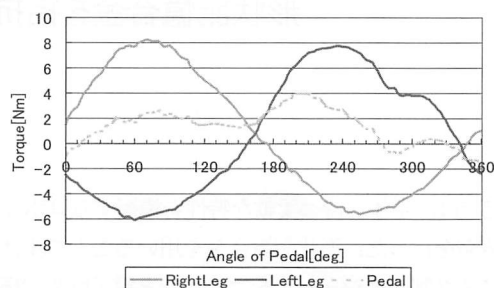


Fig. 4: Pedaling Torque

ペダルが持ち上がる際それぞれのペダルに負のトルクが生じている。つまり、漕ぎ足でない足はペダルの回転を妨げる力を生じさせている。これは、足の自重により生じていると考えられ、漕ぎ足がもう一方の足の自重も支えていることが予想される。

しかし、左右のトルクの合計はほとんど正であることから、推進力は与え続けられていることも分かる。

また、足がペダルに与えているトルクは一定ではなく、漕ぎ足が変化する時にトルクは減少し 180 度周期の山形になることが分かった。

5. 結論

自転車こぎ動作をモデル化し、運動方程式をたてた。

運動方程式を用いたシミュレーションを行い、ゴムの弾性率が高いほど下肢の負荷が軽減されるが、ゴムの弾性率が高すぎると自転車の速度がゴムの固有周期に引きずられることが分かった。

また、実験でペダル角とペダルトルクの間関係を測定し、左右のペダルが加えるトルクの合計は常に回転方向を向いているが、片足だけを取り出してみると回転を妨げる方向のトルクが生じていることが分かった。

今後、シミュレータを用い各関節がどのようなトルクを発揮しているのかを定式化すると共に、各関節トルクの負荷にならないような制御式を作る。そして実機を作成し、評価していこうと考えている。

参考文献

[1] 佐藤悠太, 田中孝之, 金子俊一, 鈴木善人, 坂本直久, 関修治: “農業用スマートスーツ”, SICE SI2006 CD-ROM.