

筋電信号を用いた車椅子のパワーアシスト制御

大西 祐介, 呉 世訓, 堀 洋一 (東京大学)

A New Control Method for Power-assisted Wheel Chair based on Surface Myoelectric Signal

Yuusuke Oonishi, Sehoon Oh, Yoichi Hori (The University of Tokyo)

Research on the power-assist control of the electric wheelchair is one of the most interesting topics in the field of welfare engineering and there exist many ongoing projects. In this paper, the surface electromyography(EMG) of adductor pollicis muscle are measured to extract the rolling and grip force on the handrim of the wheelchair and proposed a new power-assist method of both acceleration and deceleration. At the acceleration phase, we assist wheelchair earlier than the driver's action by combining filtered myoelectric signal and estimated human torque signal calculated by the disturbance observer. On the other hand, when driver want to stop wheel chair, we step down assist torque according to the degree of urgency estimated by the filtered myoelectric signal. Experimental results validate that the proposed power-assist method realize early, stable and smooth acceleration and safe deceleration.

キーワード：車椅子, パワーアシスト制御, 外乱オブザーバ, 筋電信号

Keywords: wheelchair, power assisting control, disturbance observer, electromyogram

1. 序 論

少子高齢化および医療技術の進歩により、身体機能の低下によって歩行が困難になった際の移動手段として車椅子を必要とする人が増加している。自走型車椅子に電機モータを取り付けたパワーアシスト車椅子⁽⁴⁾(図1)は、単に操縦者の負担を軽減し、操縦者自身の現有能力を維持およびリハビリテーションの効果もあるという点で広く普及している。また、福祉工学という観点から見ても人間のハンドリムを通して加えられる力とモータ出力を協調して制御するという事は興味深い分野である。しかし、市販製のパワーアシスト車椅子は、操縦者のハンドリムを漕いだ力を単純に増幅してアシストするだけであり、改善の余地が大いにあると考えられる。そこで、より操縦者に優しい操作感覚を求めて、様々なアシスト手法が提案されてきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。本論文では、車椅子のハンドリムを操縦する際に行われる「握る」と「漕ぐ」という二つの動作に着目し、筋電センサーを用いることにより従来の角度を検出するセンサーでは実現できなかった「漕ぐ」と「握る」の動作を抽出し、それぞれの動作に応じた加速と減速のアシストをすることにより、より快適性に優れたパワーアシスト手法を提案する。ここで、筋電信号を持ちいる利点を以下に3点挙げる。

- (1) 遅れのない制御が可能
- (2) 角度の出ない動作の力の入れ具合も検出可能
- (3) 握力の出にくい場合でもアシスト可能

本論文は、これらの筋電信号の特徴を用いることで車椅子の加速と減速のパワーアシストする手法を提案している。



図1 Power-assisted wheelchair as an experimental tool (YAMAHA JW II)

ただし、ハンドリムを漕ぐ動作における筋電信号は操縦者の個人差があるという点やセンサーの取り付け位置や皮膚の状態などによって再現性が難しいという点から、単純に操縦者の入力トルクと筋電信号が比例関係にあると判断することは難しい。従って、漕ぐ段階の力の推定には外乱オブザーバを用いている。そして、筋電信号と外乱オブザーバからの信号という人間と機械から生じる二つの信号の両方を組み合わせることにより、人間と機械の協調した車椅子のパワーアシストを行う手法を提案している。

2. 筋電信号の信号処理

筋電図とは筋肉の収縮を引き起こす筋線維の活動電位を記録したもので、筋電図から得られる情報は、リハビリテーション医学、体育科学、人間工学など多くの分野で活用されている⁽⁵⁾⁽⁶⁾⁽⁷⁾。本論文では、非侵襲的かつ比較的簡便に筋電図を導出できるという点で、乾式表面電極型の筋電センサー MES01 (マイクロキューブ) を用いた。図3に

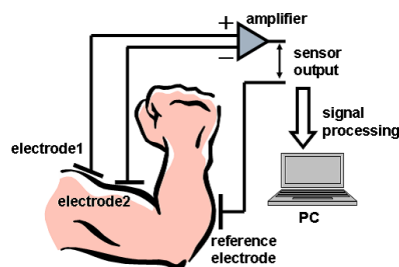


図2 Sensor system

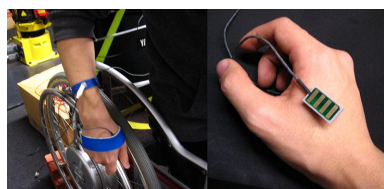


図3 EMG sensor

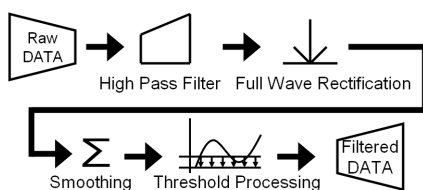


図4 The block diagram of the filter component

示すように、腕に基準電位 2.5V を貼り付け、手の母指内転筋の部分に筋電センサーを取り付けて計測を行った。図3のように皮膚上に貼り付けられた電極を用いて計測したEMGを表面筋電信号 (surface electromyogram:sEMG) といい、表面電極が貼り付けられた皮膚下にある多くの筋線維の活動電位が時間的空間的に重畳して計測されるため、筋全体の電氣的活動状況を把握するのに適している。皮膚表面で測定される sEMG は数 μ ~ 数 mV 程度の微弱な信号であるため、電極間の差動増幅器により 1200 倍に増幅され 12bit 分解能の AD 変換器を通してサンプリング周波数 1 kHz で得られる。被験者は 23 歳健康者 (男性) である。

筋電図の信号処理に関しては、まず筋電センサーから得られた sEMG に信号の変化分を強調するため、100Hz のハイパスフィルターを通す。その後、信号を信号の大きさを全波整流して過去 50ms 分のデータの平均を取り、閾値以下のデータは 0 にするという処理を行っている。図4にフィルタ構成のブロック図を示す。

車椅子を二回漕いだ際の筋電信号に対して、この信号処理を行った結果を図5に示す。

図5よりトルクセンサーから得られる入力トルクが出る

前からハンドリムを握る部分の信号が筋電信号から抽出されているのがわかる。ハンドリムを強く握るほど、信号の大きさは大きくなり、この大きさに応じてアシストトルクを決めればよいとわかる。しかし、ハンドリムを漕ぐ際の信号は振動的な信号になっていて、トルクセンサーを解して得られる入力トルクの大きさと関連性があるとはいえない結果となっている。そこで、外乱オブザーバーを用いて操縦者の入力トルクを推定し、その結果と信号処理した筋電信号を組み合わせることによりパワーアシストする手法を次章で述べる。

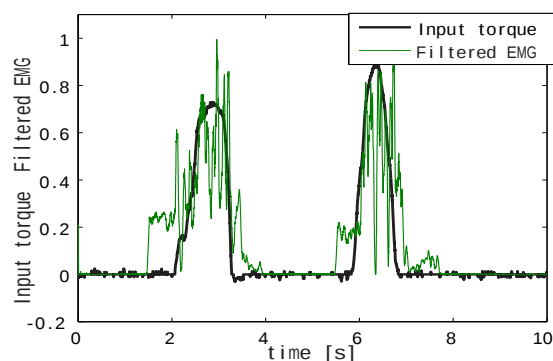


図5 Comparison between filtered EMG signal and input torque via the torque sensor

3. 提案加速手法の紹介

加速に関する提案手法の前に、従来型の加速手法について述べる。従来型のパワーアシスト車椅子のアシスト手法は、ハンドリムの固定軸に発生する人間の入力したトルクをトルクセンサーで計測し、その力に応じて電気モータにより走行を補助するものである。その際のアシスト比は式(1)に示される。

$$\tau_{assist} = K \frac{\omega}{s + \omega} \tau_{human} \dots\dots\dots (1)$$

ここで、 K は比例定数、 ω は

$$\omega = \begin{cases} 10 & \dot{\tau}_{human} > 0 \\ 2 & \dot{\tau}_{human} < 0 \end{cases} \dots\dots\dots (2)$$

としている。このアシスト手法による走行実験結果を図6に示す。実験環境は、ヤマハ製 JWII をベースに ARTLinux を搭載した小型 PC およびロータリエンコーダを取り付け、リアルタイム制御を行っている。図6(a)より式(1)のような一次遅れ形を介する事で人間が手を離れた後にも慣性走行を生み出していることがわかるが、図6(b)より実際にはハンドリムを漕ぐことによりアシストトルクが加わり速度が増すまでには若干時間がかかり、また速度の立ち上がりが急であるため車椅子に乗り始めた人にとっては快適性よりも危険を感じてしまうという問題がある。

そこで、提案手法では従来のトルクセンサーを用いるの

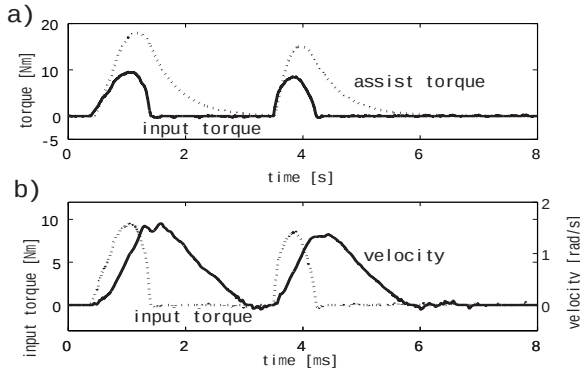


図6 Power-assist result of the conventional method

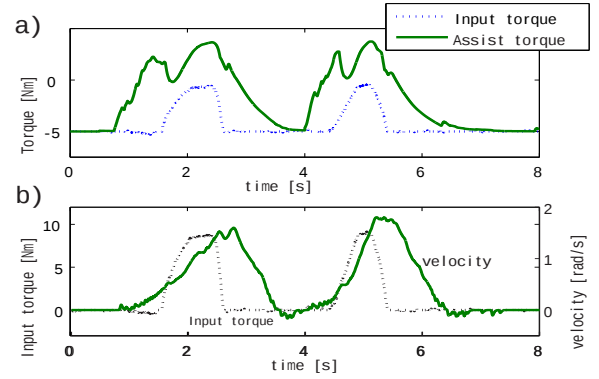


図8 Power-assist result of the proposed method

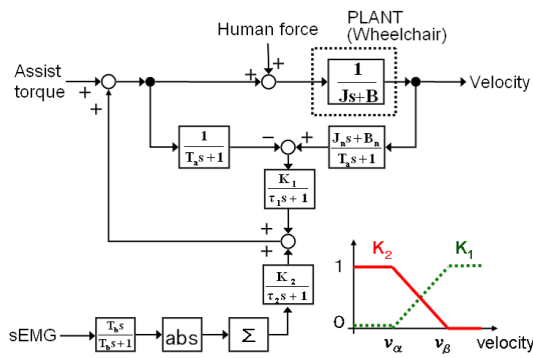


図7 Block diagram of the proposed method

ではなく筋電センサーと外乱オブザーバーを組み合わせ図7に示すようなブロック図に基づいたパワーアシストを行う。

図7の上部が外乱オブザーバーであり、 J_n, B_n はノミナル値、 T_a は外乱オブザーバのLPFのカットオフ周波数をあらわしている。これによりアシストトルクの指令値とノミナルモデルの逆プラントから出力とのずれを操縦者の漕ぐ力とみなしてやることにより、操縦者の入力トルクを推定することができる。一方、図7の下部は前章で述べた筋電信号の信号処理の部分である。そして、この二つの信号が K_1, K_2 を介して組み合わせられアシストトルクとなる。ここで、 K_2 は筋電信号の影響度の大きさであり、 K_1 は外乱オブザーバーからの推定入力トルク信号の影響度の大きさであり、これらは車輪回転速度に応じて変化する。車輪回転速度が閾値 v_α 以下であれば、ハンドリムを握っている状態であり筋電信号を基にしたアシストを行うため、 K_2 の値を大きくして K_1 の値を小さくしている。そして、車輪回転速度が閾値 v_β 以上になると、ハンドリムを漕いでいる状態であり外乱オブザーバーからの推定入力トルクを基にしたアシストを行うため、 K_2 の値を小さくして K_1 の値を大きくしている。車輪回転速度が v_α から v_β の状態では、二つの信号を組み合わせることで速度が増すほど徐々に K_1 の値が大きくなり K_2 の値が小さくなるように設定することによって滑らかな加速を実現するようにしている。この

v_α, v_β の値を操縦者の特性に応じて変える事によって操縦者に合った加速を実現できると考えられる。

3.1 提案加速手法による実験結果 提案手法のパワーアシストにおいて、ハンドリムを2回漕いだ際のアシストトルクおよび車輪速度の実験結果を図8に示す。

図6(a)と図8(a)を比較すると、従来手法では、操縦者の入力トルクを増幅する形でアシストトルクが立ち上がり入力トルクの傾きが負になると、ゆっくりとアシストトルクも減少していく。これに対して提案手法では、操縦者がハンドリムを握る段階から筋電信号を基にしたアシストトルクが働き始め、漕ぐ段階になると外乱オブザーバーからの推定トルクを基にしたアシストトルクが働いているのがわかる。次に、図6(b)と図8(b)を比較すると、従来手法の場合には、操縦者がハンドリムを漕いでから若干遅れて車輪速度が急激に立ち上がっているのに対して、提案手法では、ハンドリムを握った状態から少しずつアシストが加わっているため漕ぐ段階よりも早い時期から緩やかに速度が立ち上がっているのがわかる。

4. 提案減速手法の紹介

次に、減速手法について紹介する。人間が危険を感じる時に起こす行動の典型例として、手をぎゅっと握る行為がある。この事は車椅子に乗る際にも同様であり、パワーアシストによる加速中に前方に障害物などがあり急停止したい場合にはハンドリムを強く握ることにより車椅子を停止させる動作を行う。ここで、従来手法でのハンドリムを1回漕いでから停止するまでの様子を図9に示す。

図9より従来法では、トルクセンサーにより計測した入力トルクを定数倍したアシストトルクを加えるのであるが、停止の際には操縦者が停止をしたいにもかかわらず実際には、正と負のアシストトルクが交互に加わるようになってしまう。その結果、停止までに長い時間がかかると同時に、停止の際に車椅子が揺れてしまい乗り心地が悪くなるという問題点が発生していた。また、パワーアシストによる走行中に車椅子を止めるためには非常に大きな力が必要であ

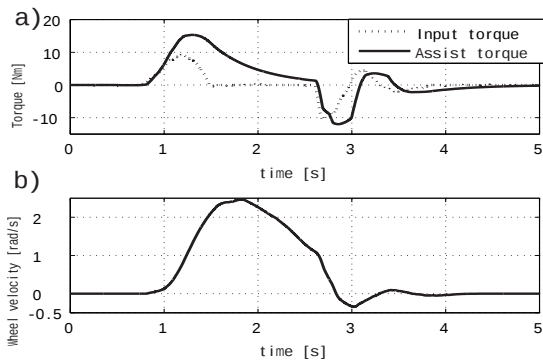


図9 Experimental result of the conventional method

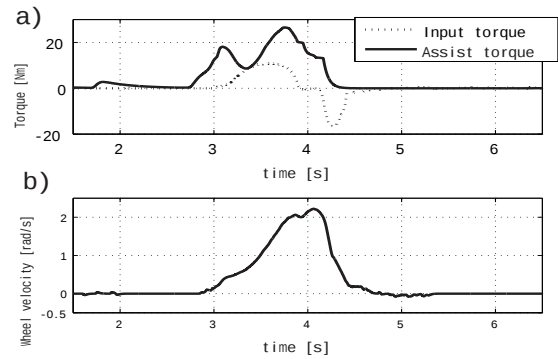


図10 Experimental result of quick stop by use of proposed method

り、高齢者などのように握力が弱った方たちには重い負担となってしまうという問題点もある。従って、安全性の観点を考慮すると障害物などがあった場合に少ない力で速やかに停止するアシスト機能が求められていると考えられる。

そこで、強くハンドリムを握るほど緊急性が増している状況で早く停止したいという経験則より、提案減速手法では、式(3)のようにアシストトルクを決定する。

$$\tau_{assist} = \tau_{stop} \exp^{-s_{EMG}t} \dots\dots\dots (3)$$

ここで τ_{stop} は外乱オブザーバーからの入力トルク推定値が負の閾値を超えた時のアシストトルクであり、その時の筋電信号のフィルター後の信号の強さが s_{EMG} である。入力トルク推定値が一定値以上の負の値になると、式(3)に従って、筋電信号の大きさが減衰定数の役割を果たし、アシストトルクを漸次的に減少させていく。これにより、ハンドリムを握る際の筋電信号が大きいほどアシストトルクは速やかに0となりすばやく停止することになり、筋電信号が小さい場合には徐々にアシストトルクを下げることでよりゆっくりと減速するというように、操縦者の意思に沿った減速を可能にしている。

4・1 提案減速手法による実験結果 提案手法による減速の実験結果を図10に示す。実験では、車椅子を一回漕いで一定時間経ってからハンドリムを握ることによって車椅子を停止させる動作を行っている。図10より、停止の際にはアシストトルクが速やかに0となり、車輪回転速度も0に収束している。そして停止の際には、従来法の図9と比べて停止の際の速度の振動が大幅に低減されているがわかる。

5. 結 論

本研究では、車椅子の加速・減速でのパワーアシストの際に筋電信号の特性を用いることによって、従来よりも快適かつ安全なアシストを行う手法を提案し、実験を行うことによってその有効性を確かめた。加速の際には、車椅子を握る段階からアシストすることによって始動の際の力の

負担を軽減し、ゆっくりとした加速を実現する手法を提案した。そして、操縦者の特性に応じた加速を実現できることを示した。また、減速の際にはハンドリムを握る力の入れ具合に応じてアシストトルクを下げることによって、安全な停止を実現できる手法を提案した。そして、従来手法で停止の際に生じる無駄な振動を低減し、乗り心地の良い減速停止を実現した。

今後、少子高齢化社会が進むにつれ介護者の不足という状況が考えられ、車椅子利用者がより自立して移動できる支援が工学的に求められている。本研究では、筋電信号を用いることによって人間と機械との協調したパワーアシストを可能にし、重い障害を持った方にも車椅子に乗ることができるとなると期待できるものと考えられる。

文 献

- (1) Sehoon Oh, Naoki Hata, Yoichi Hori: "Integrated motion control of a wheelchair in the longitudinal, lateral and pitch directions", Proc. of AMC-2006, 2006.3.27-29, Istanbul
- (2) Takeaki Sugimoto, Hirokazu Seki, Susumu Tadakuma: "Rectilinear Driving Improvement of Power Assisted Wheelchair Based on Disturbance Estimation of Right and Left Wheels", Japan Industry Applications Society Conference 2004, Y-35, 2004.
- (3) 開田 有紀子, 村上 俊之: "電動車椅子における人の入力トルクのセンサレス検出とパワーアシスト", 平成 16 年電気学会産業応用部門大会, pp.419-424, 2004
- (4) 垣本 映: "高齢者の移動支援のための制御技術", 計測と制御, 40, 5, pp.357-362, 2001-5
- (5) Yuichi Kurita, Mitsunori Tada, Yoshio Matsumoto, Tsukasa Ogasawara: "Simultaneous Measurement of the Grip/Load Force and the Finger EMG :Effects of the Object Weight", Proceedings of IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics (SMC2002), TP1B6, Tunisia, 2002.10.
- (6) Kyuwan Choi, Makoto Sato, Yasuharu Koike: "A new, human-centered wheelchair system controlled by the EMG signal", WCCI2006, 2006 7.
- (7) 梶谷 勇, 樋口 哲也: "絶縁物電極を用いた筋電センサの開発", 電子情報通信学会技術研究報告, WIT2006-13, pp.71-76, 2006.