低消費電力化を目的とした電動アシスト車いすの ファジィ推論型走行効率向上制御

Fuzzy Inference Type Driving Efficiency Improvement Control of Power-Assisted Wheelchair for Low Power Consumption

○学 深田 翔 (千葉工大) 非 小笠 義幸 (千葉工大)
非 村上 博紀 (吉野工業所) 正 関 弘和 (千葉工大)

Sho FUKADA, Chiba Institute of Technology, s0822284BA@it-chiba.ac.jp
Yoshiyuki OGASA, Chiba Institute of Technology
Hiroki MURAKAMI, Yoshinokogyosho Corporation
Hirokazu SEKI, Chiba Institute of Technology, seki.hirokazu@it-chiba.ac.jp

This paper describes a fuzzy driving control scheme of power-assisted wheelchairs for the low power consumption. The proposed fuzzy system suppresses the maximal assisted torque and keeps the low torque for inertial driving based on the human input torque and driving velocity information. Long distance driving experiments comparing with the manufactured wheelchair shows the effectiveness of the proposed control system.

Key Words: Power-assisted wheelchair, Driving control, Low power consumption, Fuzzy inference, Driving efficiency

1. 緒言

本稿では電動アシスト車いすの多機能・高性能走行制御の一つとして、同じ距離を走行するのにより低消費電力となるような新しいアシストトルク生成法を提案し実験的検討を行うものである。

電動アシスト車いすは、搭乗者の入力した力に対し電気モータにより補助し、その増幅された力で駆動するものである。筋力の落ちた高齢者、障害者でも利用でき、行動範囲を広げるものとして期待は大きい。ヤマハ製 JW-II[1]が有名であるが、実際の走行場面においては、段差の踏破、坂道や不整地での走行、操作性向上など様々な問題点も存在する。多機能化・高性能化の研究例として回生ブレーキ制御[2]や高外乱路面走行制御[3]なども行われている。

電動車いすはバッテリーが唯一のエネルギー源であり、もし外出中にバッテリーが切れると使用者にとって大きな負担となるため、例えば同じ距離を走行するのにも、乗り心地なども考慮しながら、できるだけ消費電力を抑えることが重要となる。そこで本研究では、走行距離あたりの消費電力がより低くなるようなアシストトルク生成をファジィ推論によって行う新しい走行制御法を提案し、実験用車いすと製品版車いすを用い検証を行う。

2. 電動アシスト車いすの制御

電動アシスト車いすのシンプルな走行制御法の一つとして、筆者らによって提案されている一次遅れ系によるアシスト走行制御法がある。この制御システムの構成図を図1に示す。トルクセンサから得た人間の入力トルク T_h に対して一次遅れ系を介し、その時定数 τ_a を切り替えている。 T_a はアシストトルク出力、 T_d は外乱トルク、 α はアシスト比であり、 T_a は式(1)のように表現できる。車輪の回転角度 θ 、あるいは移動距離 x が制御系の出力となる。時定数 τ_a の設計については、操作者がハンドリムを握り入力トルクを増加させている間は時定数を小さくして ($\tau_a = \tau_p$ 、これを立ち上がり時定数と呼ぶこととする) アシストトルクの速い立ち上がりを実現し、手を放し入力トルクが減少して以降は時定数を大きくして ($\tau_a = \tau_s$ 、これを慣性時定数と呼ぶこととする) 慣性走行を生み出す。このようなアシスト制御法を左右輪それぞれに適用しアシスト

車いすの走行が実現される。なお左右輪で区別するため各変数の右上に r, l の添え字を加える。

$$T_a = \frac{\alpha}{1 + \tau_a s} T_h \quad (1)$$

Fig. 1 Assist control system with LPF

本研究ではこの手法を従来手法 (LPF モード) とし、次章の走行効率検証や提案手法との比較検証に用いる。なおアシスト比と時定数は $\alpha = 1.2$, $\tau_s = 0.5[s]$, $\tau_p = 0.05[s]$ とするが、これは製品版の車いすに近い走行となるよう設定している。

3. 走行パターンと走行効率の検証

3.1 走行効率の定義

本研究では同じ距離を走するのにできるだけ消費電力を抑制した走行を実現することを目指す。そのために、これを定量的に評価する指標を定義する。

まず消費電力 $P[W]$ について今回は車輪に搭載されている直流モータにおける銅損のみに着目し、巻線抵抗 $R[\Omega]$ と左右輪のモータ電流 $I_r, I_l[A]$ を用いて計算し、これを時間積分したものを消費電力量 $Q[W \cdot s]$ とする。モータ電流は電流センサにより計測する。

$$Q = \int (RI_r^2 + RI_l^2) dt \quad (2)$$

また自動車における燃費と同様の考えにより、消費電力量 Q に対する走行距離 $d[m]$ の割合を「走行効率」 $D[m/W \cdot s]$ と定義する。

$$D = \frac{d}{Q} \quad (3)$$

3.2 アシストトルクパターンによる走行効率検証

モータ電流を抑えることが消費電力抑制につながるが、モータ電流はアシストトルク指令と比例関係にあるため、アシストトルクを様々に調整することで消費電力低下の実現が期待できる。ここでは前章で述べた従来手法を用い、各パラメータを様々に変化させることで消費電力低下の可能性を探る。

今回はアシスト比と惰性時定数を変化させることにより、どのようなアシストトルク生成が低消費電力を実現するかを検証する。惰性時定数については図 2 のようにアシストトルクのピーク値を 100%とした際にこれを 4 分割した時間帯それぞれで値を設定し、詳細な変化まで検証する。

Fig. 2 Control parameters

アシスト比 α 、惰性時定数 τ_{s1} , τ_{s2} , τ_{s3} , τ_{s4} を様々に変化させ検証を行った結果、アシストトルクは「できるだけ最大値を抑え、その後速やかに減少させ、低い値で惰性を維持する」とした場合に走行効率が向上する傾向が見られた。

この考えに基づき、一漕ぎでの走行距離を 1.5[m], 2.5[m], 3.5[m], 4.5[m]と設定し、それぞれの距離を実現するような α , τ_{s1} , τ_{s2} , τ_{s3} , τ_{s4} の組み合わせを作成し走行実験を行った。これらの走行効率の結果を図 3 に示す。いずれの距離においてもアシスト比を小さくしてトルクの最大値を抑制し惰性を伸ばし走行距離を得ることで走行効率が向上できることがわかる。

Fig. 3 Driving efficiency validation

アシスト比と時定数の調整で低消費電力の実現もある程度可能であるが、いくつかの問題点も浮かんた。例えば、アシスト比を低くするとトルクの最大値は低下するが、加速の程

度も遅くなり操作者にとってハンドリムを漕ぐ負担が増加してしまう。また、すでに速度が出ている二漕ぎ目以降のトルク生成にも柔軟に対応しなければならないが、これらのパラメータだけではトルク調整に限界があると言える。

4. ファジィ推論に基づく低消費電力走行制御法

4.1 提案手法の概要

本研究では、操作者がハンドリムを漕ぐ動作をしている前半と、手を離して惰性走行を行う後半のそれぞれに対し、ファジィ推論を適用し、低消費電力を実現するアシストトルクを生成する手法を提案する。提案する制御手法の全体構成を図 4 に示す。

Fig. 4 Block diagram of proposed control system

ハンドリムを漕いでいる前半は、入力トルクの傾き（微分値）が正であることで判断し、負であれば手を離れた後半と判断する。前半は式(4)に従い、パラメータ X (X^r , X^l)を推論することで立ち上がりのアシストトルクを生成する。後半は式(5)に従い、パラメータ Y (Y^r , Y^l)を推論することで惰性のためのトルクを生成する。 k 制御周期目のアシストトルク指令値は以下のように表現される。

$$T_a^{r,l}[k] = (1 + X^{r,l})T_h^{r,l}[k] \quad (4)$$

$$T_a^{r,l}[k] = \frac{T_a^{r,l}[k-1]}{1 + Y^{r,l}} \quad (5)$$

4.2 ファジィ推論の設計

まず前半の立ち上がりのトルク生成については、操作者の入力トルク T_h^r , T_h^l 、走行速度 V の二つの情報を用い、加速時のアシストトルクを決めるパラメータ X を推論する。これらはいずれも三角型メンバシップ関数によりファジィ変数設計を行い、それぞれSS(Small-Small), S(Small), M(Middle), B(Big), BB(Big-Big)の各グレード値を求める。これらを基に、図 5 のルールに従って推論する。図 6 は推論出力のシングルトン型ファジィ変数である。入力トルクが小さい、つまり漕ぎ始めのときにはアシストトルクの立ち上がりを大きくし、その後徐々に弱めていく。また速度情報も用い、すでに速度が出ている二漕ぎ目以降にはあまりアシストトルクが大きくならないようにルールを設計している。

T_h^r, T_h^l	SS	S	M	B	BB
SS	BB	BB	B	M	S
S	BB	B	M	M	S
M	BB	B	M	S	SS
B	B	M	M	SS	SS
BB	B	M	S	SS	SS

Fig. 5 Fuzzy rules for control parameters for parameter X

Fig. 6 Singleton-type fuzzy reasoning for parameter X

次に後半の惰性トルク生成については、入力トルクの最大値 T_{hmax}^r, T_{hmax}^l , アシストトルク T_a^r, T_a^l の二つの情報を用い、現在のアシストトルクを減少させる割合を決めるパラメータ Y を推論する。これらも先ほどと同様に三角型メンバシップ関数により SS, S, M, B, BB の各グレード値を求める。これらを基に、図 7 のルールに従って推論する。図 8 は推論出力のシングルトン型ファジィ変数である。現在のアシストトルクが大きいほど減少率を大きくし、アシストトルクを下げ、また入力トルクの最大値によってもこれらを変化させている。

T_{hmax}^r, T_{hmax}^l	SS	S	M	B	BB
SS	M	B	BB	BB	BB
S	S	M	BB	BB	BB
M	S	S	M	BB	BB
B	SS	SS	S	BB	BB
BB	SS	SS	SS	B	B

Fig. 7 Fuzzy rules for control parameters for parameter Y

Fig. 8 Singleton-type fuzzy reasoning for parameter Y

5. 実験による検証

5.1 実験装置の概要

本提案手法の有効性を示すために実験による検証を行う。ヤマハ発動機(株)製の電動アシスト車いす JW-II をベースに製作した実験装置の外観を図 9 に示す。電流センサによるモータ電流測定や車輪角度の計測, 全体の制御などは ART-Linux を導入した PC により行う。制御周期は 1[ms] である。

Fig. 9 Experimental setup

5.2 基礎的検証実験

本提案手法の有効性を示すため最初に、一漕ぎから三漕ぎ程度の短距離走行実験により従来手法と提案手法の比較検証を行う。屋内の平坦な廊下において、一漕ぎで 1.5[m], 2.5[m], 3.5[m], 4.5[m] 走行する実験、三漕ぎで 8.5[m] 走行する実験を行うが、両手法に対し同じ力で漕ぐように統一する。

これらの実験の一例として、三漕ぎで 8.5[m] を走行する実験について、従来手法と提案手法の比較結果を図 10, 11, 12 に示す。提案手法においては、アシストトルクのピーク値を抑え、その後の惰性を低いトルクで維持するような制御となっており、その結果、従来手法と比較して加速が弱まり惰性が伸びる走行となっていることが速度波形からもわかる。

Fig. 10 Driving results with proposed control system (input torque and assisted torque)

Fig. 11 Driving results without proposed control system (input torque and assisted torque)

Fig. 12 Driving results (velocity)

一漕ぎと三漕ぎの各実験における走行効率の比較結果を図13に示す。いずれの実験でも提案手法の効率は向上しており、特に三漕ぎという連続的な漕ぎ動作の際には効率が大きく向上することがわかる。

Fig. 13 Driving efficiency results

5.2 長距離走行実験

次に、従来手法と提案手法に加え、製品版のアシスト車いす（ヤマハ発動機（株）製 JW-II）も比較対象とし、約 1[km] の長距離走行実験を行う。製品版には電流センサを両車輪に取り付けデータロガーを用いて消費電力を測定する。これら三者の制御法に対し、同様の力で漕ぎ直線平坦路面を往復することですべて約 1[km] の走行を行い、走行効率を比較する。

図 14 にその比較実験結果を示す。提案手法では約 0.35[m/W・s] となり、基礎的検証実験の際よりも連続的に漕ぐ動作が多く走行効率が向上した。他の手法と比較すると、従来手法よりも 93%、製品版よりも 40% の効率向上が確認でき、提案手法の有効性が示された。

Fig. 14 Driving efficiency results

6. 緒言

本稿では電動アシスト車いすの低消費電力走行を実現するためのファジィ推論形走行制御法を提案し、実機による検証を行った。ファジィ推論により適切なアシストトルク生成を行うことで、同一距離を走行するための消費電力を大きく抑制することが可能となり、特に製品版との比較実験では 40% もの消費電力削減が可能であるという顕著かつ画期的な成果が得られた。今後は不整地や傾斜路面などの外乱路面での走行性能との両立などを検討していく。

文 献

- [1] 内山敦, 福井巧, "パワーアシスト車椅子の制御システム," 日本機械学会シンポジウム講演論文集, pp.204-208, 1997.
- [2] H. Seki, K. Ishihara and S. Tadakuma, "Novel regenerative braking control of electric power assisted wheelchair for safety downhill road driving," *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol.56-5, pp.1393-1400, 2009.
- [3] H. Seki and N. Tanohata, "Fuzzy control for electric power-assisted wheelchair driving on disturbance roads," *IEEE Trans. on Systems, Man, and Cybernetics-Part C*, vol.42-6, pp.1624-1632, 2012.