

電動アシスト車いすの路面外乱推定による適応型走行制御法

Adaptation Driving Control for Power-Assisted Wheelchair Based on Road Disturbance Estimation

○ 深田 翔 (千葉工大) 関弘和 (千葉工大)

Sho FUKADA, Chiba Institute of Technology

Hirokazu SEKI, Chiba Institute of Technology

**Abstract:** This paper describes a novel driving control scheme of electric power-assisted wheelchairs for assistive driving on various large disturbance roads. The "electric power-assisted wheelchair" which assists the driving force by electric motors is expected to be widely used as a mobility support system for elderly people and disabled people; however, there are lots of large disturbance roads such as uphill roads and rough roads and operators need to push the hand-rims with the larger power load on such roads in order to obtain the enough driving velocity. Therefore this study proposes a road disturbance estimation and velocity model based adaptive control scheme in order to realize the assistive driving without the operator's power load on large disturbance roads. The proposed control system determines the variation of the assistance ratio and inertial time constant using the previous driving results such as driving velocity, inertial driving time and road disturbance. Some driving experiments are provided to confirm the effectiveness of the proposed control system.

1. 緒言

本論文は、Fig.1 に示す電動アシスト車いすの多機能走行制御法の一つとして、上り坂や不整地などの高外乱路面に侵入した際にも十分な走行距離や速度を実現するための適応走行制御法を提案するものである。



Fig.1 Power-assisted wheelchair.

多機能化や操作性向上において重視すべき重要な要素の一つとして、Fig.2 に示すような走行の妨げとなる大きな外乱を有する路面への対応が挙げられる。もし人間の入力トルクの数倍のアシストトルクを生成するだけのシンプルなアシスト機能の場合には、平坦で滑らかな低外乱路面に比べれば Fig.2(a)のような上り坂路面では重力の影響で、また Fig.2(b)のような芝生やその他砂利道などの不整地でも車輪を通して受ける大きな外乱によって走行距離や速度が低下する。つまりこれらの路面では低外乱路面と比較して、同じ距離を進むのに必要な操作者の負担も増加することとなる。



(a) uphill road (b) grass road

Fig.2 Examples of large disturbance roads.

本研究では、これら大きな外乱を有する路面においても操作者の負担を軽減した快適な走行を実現するために、路面進入後にその走行状況を基にアシスト制御系のパラメータを適応的に変化させていき操作者の負担を軽減させる手法を提案し、いくつかの実験を通して検証を行う。

2. 電動アシスト車いすの走行制御システム

電動アシスト車いすの走行制御法については車輪角度や速度のフィードバック制御を用いたもの<sup>(1)</sup><sup>(2)</sup>など、いくつか考えられるが、ここではシンプルな手法の一つとして、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<sup>(3)</sup>に注目する。この制御システムの構成図をFig.3 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  $\tau_a$  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、 $\alpha$  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  $\theta$ 、あるいは移動距離  $x$  が制御系の出力となる。

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

$$\tau_a = \begin{cases} \tau_f & \frac{dT_h}{dt} \geq 0 \\ \tau_s & \frac{dT_h}{dt} < 0 \end{cases} \dots\dots\dots(2)$$

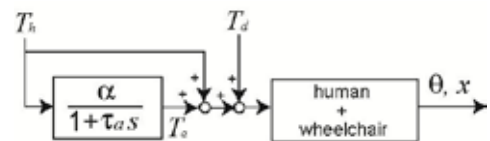


Fig.3 Configuration of power assisting control system using Low-Pass-Filter.

時定数  $\tau_a$  の設計については式(2)のように、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 ( $\tau_a = \tau_f$ , 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 ( $\tau_a = \tau_s$ , これを惰性時定数と呼ぶこととする) 惰性走行を生み出す。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。走行実験結果の一例をFig.4 に示す。

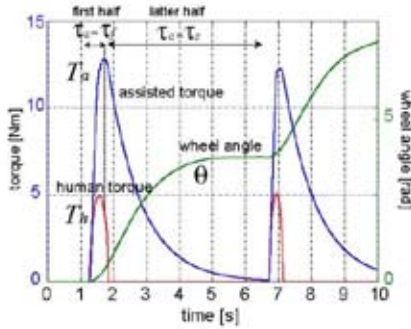


Fig.4 Example of the driving experimental result.

3. 規範モデルによる外乱適応走行制御

(3.1) 提案手法の概要

本研究では、アシストトルク全体の大きさを決めうるアシスト比 $\alpha$ と、ハンドリムを放した後のアシストトルクの継続性を決めうる慣性時定数 $\tau_s$ に注目し、これらを一漕ぎごとの走行結果から適応的に変化させる手法を提案する。つまり  $k$  回目の漕ぎにおけるアシスト比 $\alpha[k]$ と慣性時定数 $\tau_s[k]$ はそれぞれの変化量 $\Delta\alpha[k]$ と $\Delta\tau_s[k]$ を用いて次式で表される。

$$\alpha[k] = \alpha[k - 1] + \Delta\alpha[k] \quad \dots\dots\dots(3)$$

$$\tau_s[k] = \tau_s[k - 1] + \Delta\tau_s[k] \quad \dots\dots\dots(4)$$

立ち上がり時定数 $\tau_f$ も加速を決めうる重要なパラメータではあるが、パラメータを様々に変化させて行っていくつかの予備実験の結果から、主に $\alpha$ と $\tau_s$ が全体の走行距離や速度に影響を与えることがわかったため、今回は $\alpha$ と $\tau_s$ に注目する。 $\alpha$ と $\tau_s$ の変化量を決めるために必要な情報は直前の一漕ぎの走行結果であり、それがすなわち平坦路面における規範モデルと外乱オブザーバからの出力となる。本研究では直前の走行結果から三つの重要な情報を抽出する。

一つ目の情報は、外乱オブザーバにより推定された外乱推定値である。芝生や上り坂などの高外乱路面では外乱推定値が大きくなると考えられる。直前の一漕ぎによる外乱推定値を $\hat{d}$ と定義する。

二つ目の情報として、規範モデルにおける最大速度 $V_{mp}$ と実際の速度データにおける最大速度 $V_{rp}$ の割合である。この割合から目標となる速度を決定する。直前の一漕ぎによる割合を $V_g$ と定義する。

三つ目の情報として、規範モデルにおける慣性走行時減速度 $D_m$ と実際の速度データにおける慣性走行時減速度 $D_r$ の差分である。この差分から目標となる減速度を決定する。直前の一漕ぎによる差分を $D_g$ と定義する。

本研究では、高外乱路面に進入した場合において、前述した直前の一漕ぎの走行における $\hat{d}$ と $V_g$ と $D_g$ の情報から $\alpha$ と $\tau_s$ を随時適応的に調整していくことで、低外乱路面での走行状態に近づけるような適応型走行制御を実現する。提案手法の制御ブロック図を Fig.5 に示す。

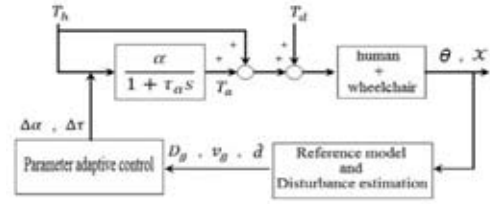


Fig.5 Proposed adaptive driving control based on disturbance estimation and velocity model.

(3.2) 低外乱路面における規範モデルの設計

規範モデル型制御を用いた(4)(5)(6)を参考とし、低外乱路面における規範モデル作成のために平地で走行実験を行い入力トルク積分値と速度のデータを取得し、最小二乗法を用いて低外乱路面における規範モデルを決定した。ある被験者における規範モデルを Fig.6 に示す。

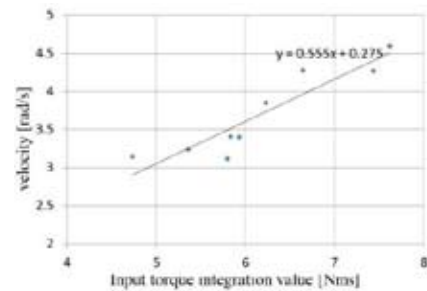


Fig.6 Velocity model.

(3.3) パラメータ増減量の決定

規範モデルにおける一漕ぎでの最大速度 $V_{mp}$ と実際の走行時における最大速度 $V_{rp}$ から式(5)により $V_g$ を決定する。同時に規範モデルにおける一漕ぎでの慣性時減速度 $D_m$ と実際の走行時における慣性時減速度 $D_r$ から式(6)により $D_g$ を決定する。また外乱オブザーバにより推定された外乱値 $\hat{d}$ を式(7)に代入することで外乱路面の状態に応じた値に目標値 $M$ を調整し、規範モデルの何%を目標とするかを決定する。 $M_0$ は目標値の調整値であり本研究では $M_0 = -0.06$ である。 $d_h$ は低外乱路面における推定外乱値の平均であり本研究では $d_h = 8$ である。

$$V_g = \frac{V_{mp} \times M}{V_{rp}} \quad \dots\dots\dots(5)$$

$$D_g = (D_r - D_m) \times M \quad \dots\dots\dots(6)$$

$$M = \exp(M_0 * (\hat{d} - d_h)) \quad \dots\dots\dots(7)$$

次に $\Delta\alpha$ と $\Delta\tau_s$ を式(8), (9)に式(5), (6)により求めた $V_g$ ,  $D_g$ を代入することで決定する。

$$\Delta\alpha = (\Delta\alpha_0 * V_g) \quad \dots\dots\dots(8)$$

$$\Delta\tau_s = (\Delta\tau_0 * D_g) \quad \dots\dots\dots(9)$$

また $\Delta\alpha_0$ と $\Delta\tau_0$ は増減量の調整パラメータである。

〈3・4〉 走行効率の定義

操作者や走行環境の変化の際においても、本手法が有効に作用しているかを定量的に評価するために走行効率  $DE$  を式(10)のように定義する。 $DE$  は走行距離を人間の入力トルク積分値で割った値であり、自動車における燃費と同様の考え方である。また  $d$  は走行距離であり、 $T_h^r$  は右輪の入力トルクである。

$$DE = \frac{d}{\int T_h^r dt} \dots\dots\dots(10)$$

4. 外乱路面における走行実験

〈4・1〉 実験装置の概要

本手法の制御実験を行うため、ヤマハ発動機(株)製電動アシスト車いす JWII をベースに Fig.7 のような実験装置を構成した。車いすフレームや左右輪のモータは JWII のものを使用し、モータ駆動回路等を新しく作成するとともに、車輪の回転角度を測定するロータリエンコーダを装着し、ART-Linux を搭載した計算機に取り込み制御を行う。本実験では制御周期を 1[ms]としている。また走行速度は車輪回転角度情報の差分計算により計算している。



Fig.7 Experimental setup of electric power-assisted wheelchair.

以下の走行実験においては直進走行のみに限定し、実験結果については簡単化のため右輪に関するデータのみを示している。さらに  $\alpha$  と  $\tau_s$  の値はそれぞれ  $\alpha=1.2$ ,  $\tau_s=0.5[s]$ , また  $\tau=0.05[s]$  を初期値として走行を開始することとする。

〈4・2〉 走行実験結果

今回の走行実験では、走行路面は全て Fig.8 に示すような屋外の上り坂で行い、提案手法を用いない場合と提案手法を用いる場合の比較を行う。提案手法を用いる場合では、各調整値を  $\Delta\alpha_0 = 0.1$ ,  $\Delta\tau_0 = 0.9$  とする。さらに提案手法を用い、かつ  $M = 1.0$  とし路面状況の変化に因らず規範モデルの 100%の走行を目指す場合での走行実験も行い比較する。この場合の各調整値は  $\Delta\alpha_0 = 0.3$ ,  $\Delta\tau_0 = 1.1$ , である。



Fig.8 Photograph of uphill road.

Fig.9 に提案手法を用いない場合での走行実験結果を一例として示す。それぞれ入力トルクとアシストトルク、走行速度を示す。Fig.9 から上り坂に対応できず走行速度が常に低いことが確認できる。

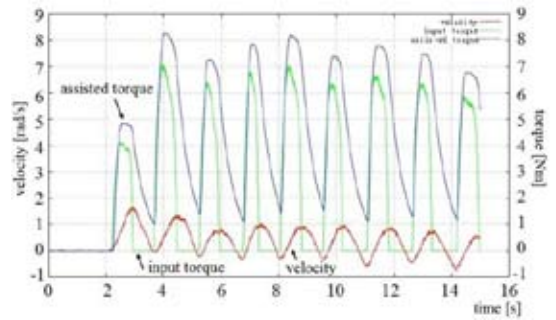


Fig.9 Driving experimental results

(driving velocity and human input torque and assisted torque).

Fig.10, Fig.11, に提案手法を用いる場合での走行実験結果を一例として示す。それぞれ入力トルクとアシストトルク、走行速度、アシスト比、時定数を示す。Fig.10 から二漕ぎ目から操作者の入力トルクに対するアシストトルクが増加し外乱路面に適応した走行が行えていることが確認できる。また Fig.11 では徐々に変化していく  $\alpha$  と  $\tau_s$  の波形が示されており、それぞれ四漕ぎから五漕ぎで数値が収束していることがわかる。

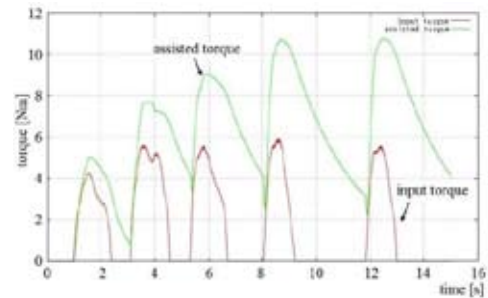


Fig.10 Driving experimental results

(human input torque and assisted torque).

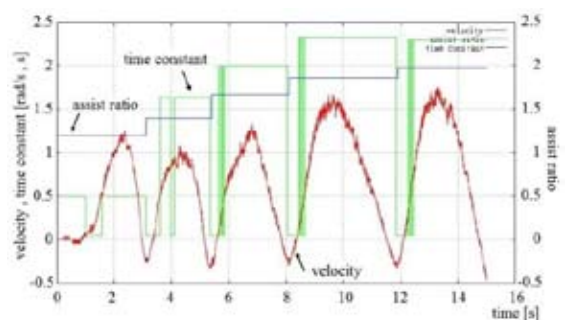


Fig.11 Driving experimental results

(driving velocity and assist ratio and time constant).

Fig.12, Fig.13, 規範モデルの 100%の走行を目指す場合での走行実験結果を一例として示す。それぞれ入力トルクとアシストトルク、走行速度、アシスト比、時定数を示す。Fig.12 から 2 漕ぎ目から操作者の入力トルクに対するアシストトルクが増加し外乱路面に適応した走行が行えていることが確認できる。しかし Fig.13 におけるアシスト比は四漕ぎ目で 3.2, 五漕ぎ目で 4.29 であるが、この値はこの後も上昇するためモータが操作量飽和に至る可能性が高く、上り坂としては速度が速くなりすぎ前輪浮上の可能性が高まり操作者にとって危険である。これは  $M = 1.0$  とし規

範モデルの 100%の走行を行おうとしたためである。このことから外乱の変化に対応した規範モデルに修正するために目標値を設定する必要性が確認できる。

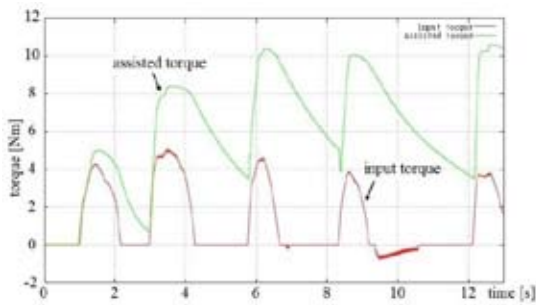


Fig.12 Driving experimental results  
(human input torque and assisted torque).

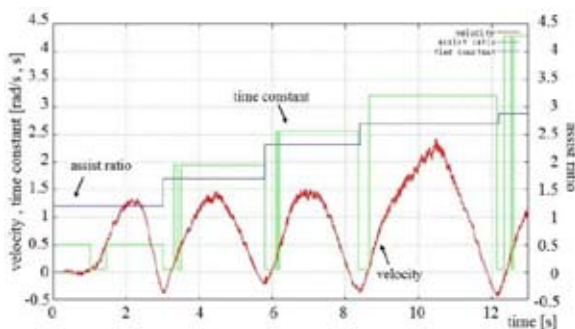


Fig.13 Driving experimental results  
(driving velocity and assist ratio and time constant)

#### (4・3) 定量的評価

今回の実験での一漕ぎ目から四漕ぎ目までのそれぞれの *DE* の結果を、提案手法を用いない場合が *without Adaptation Driving Control* とし青グラフ、提案手法を用いる場合が *with Adaptation Driving Control1* とし赤グラフ、規範モデルの 100%の走行を目指す場合が *with Adaptation Driving Control2* とし緑グラフで示す。Fig.14 における *DE* を比較すると、走行効率は提案手法を用いた場合と規範モデルの 100%の走行を目指す場合の方が大きく向上していることがわかる。この *DE* のみを見れば規範モデルの 100%の走行を目指す場合が最良のようにみえるが前述したように規範モデルの 100%の走行を目指す場合では無視できない問題が生じるため車いすの制御手法には適さないといえる。

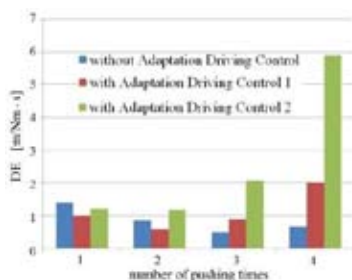


Fig.14 Driving efficiency.

## 5. 考察

本論文では、規範モデルと外乱推定を用いた外乱路面適応走行制御法を提案し実験的検証を行った。外乱路面の変化に応じた走行を達成でき、本手法の有効性を確認することが出来たが、下記のような今後解決すべき重要な課題も挙げられる。

- (1) 本手法における各種パラメータの増減式については、上り坂以外の場合でも、ある程度の効果を発揮すると考えられたが、操作者、路面の変化に規範モデルや各パラメータ増減式が、対応できなかったため、対応可能な規範モデルや各パラメータ増減式を考案し、今後検証していく必要がある。
- (2) 今回は走行速度情報に注目して路面適応制御を検討したが、この手法は一漕ぎ目を基に二漕ぎ目に入った時に  $\alpha$  と  $\tau_s$  が変化するため高外乱路面から低外乱路面へ進入する走行の際に  $\alpha$  と  $\tau_s$  の変化が遅れることが考えられるため、本手法がどの程度適応できるか今後検証を行う必要がある。
- (3) 本研究では屋外の上り坂にて実験を行ったが、さらに不整地を含めた多くの外乱路面、多くの被験者を用いて検討を行う必要もある。

## 6. 結言

本論文では、上り坂や不整地等の高外乱路面における電動アシスト車いすの規範モデル型適応走行制御法を提案し実験的検証を行った。本研究では、特に、実際の走行環境に近い路面での適応走行制御なしの場合と、適応走行制御ありの場合の比較検証を行うことで、従来手法では走行距離や速度が減少してしまうような高外乱路面においても、漕ぐ回数が増えるとともに適応的に制御パラメータが変化し、十分な走行距離や速度が生み出されることを実験を通して示した。今後は前章で述べたようないくつかの重要な課題に取り組む予定である。

### 参考文献

- (1) 関弘和・ほか2名、躍度最小軌道に基づくパワーアシスト車椅子の走行制御法、電気学会論文誌 C, 125-7 (2005), pp. 1133-1139.
- (2) 関弘和・ほか2名、加速度と加加速度制限を考慮したパワーアシスト車いすの速度パターン生成法、ライフサポート, 18-3 (2006), pp. 19-25.
- (3) 関弘和・ほか3名、パワーアシスト車椅子の後方転倒防止制御(その1)～アシストトルク調整法と被験者評価による検証～、電気学会論文誌 D, 124-3 (2004), pp. 318-323.
- (4) 馬場 道子 鳥毛 明 藤沼 康仁：「地形傾斜角度を考慮したパワーアシスト車いすの開発」ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2007
- (5) 森永 晴之 鳥毛 明 富樫 譲：「モデル規範型パワーアシスト車いすの開発」ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2008
- (6) 朝隈 優樹 鳥毛 明 星 貴之：「路面状態に応じたアシストを行うパワーアシスト車いすの開発」生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会 2011