

電動アシスト車いすの外乱レベル適応型走行制御法

Disturbance Level Adaptation Driving Control Method of Power-Assisted Wheelchair

- 山根 亮佑 (千葉工大) 實川 晃宏 (千葉工大)
- 瀬野 孝志 (千葉工大) 正 関 弘和 (千葉工大)

Ryosuke YAMANE, Chiba Institute of Technology
 Akihiro JITSUKAWA, Chiba Institute of Technology
 Takashi SENO, Chiba Institute of Technology
 Hirokazu SEKI, Chiba Institute of Technology

Abstract: This paper describes a driving control scheme of power-assisted wheelchairs for comfortable driving on large disturbance roads. This study constructs the individual optimal driving parameter maps in advance in order to realize the comfortable driving which depends on users and disturbance roads. The proposed control system estimates the driving disturbance level and determines some driving parameters based on optimal maps. The optimal assistance ratio and target driving distance are selected and the wheelchair is controlled by fuzzy inference. Some experiment results are provided to show the effectiveness of the proposed driving control system.

Key Words: Power-Assisted Wheelchair, Fuzzy Algorithm, Drivability

1. はじめに

日本の高齢者人口(65歳以上)は年々増加し続け、2015年で3296万人にのぼり、過去最高の水準となっている。これは総人口の約25.9%にあたり、日本人の4人に1人以上が高齢者ということになる。この割合は今後も上昇し、2035年には日本人の3人に1人が高齢者になると見込まれている[1]。そこで、高齢者や障がい者が人のサポートなしで移動できる車いすの需要が高まると予想される。そのため、本研究では腕力の衰えた高齢者や障がい者でも使用しやすい電動アシスト車いすに着目し、走行制御によるアプローチで走行の安全性、搭乗者の負担の減少を図る。

電動アシスト車いす[2]は、搭乗者が入力した力に電気モータによる補助を加えて走行する移動支援機器であり、高齢者や障がい者等の力の弱い人でも容易に走行させることができる。図1に示すヤマハ発動機製電動ハイブリット化ユニット JW-II [2]が有名であるが、実際の走行においては、搭乗者の入力に対して一定のアシスト比でしか補助を行わないことから、急発進や前輪の浮遊など搭乗者の意図しない走行を起こしやすく、坂道等の高外乱路面では走破性が著しく低下するという走行制御に関する課題も多く存在する。そこで本研究では、これらの課題を解消するために路面外乱の大きさに合わせてアシスト比や目標距離を変化させ快適な走行を実現する、外乱レベル適応型走行制御法を提案し、その有効性を実験検証する。



Fig. 1 Electric power-assisted wheelchair (JW-II)

2. 電動アシスト車いすのアシスト制御法

2.1 アシストの走行制御法

一般にパワーアシスト機器のアシスト制御法は、その指令地として何を生成するかによって、力・トルク制御ベース法と位置・速度制御ベース法に分類することができる。

本研究で用いたのは力・トルク制御をベースとした電動パワーアシスト車いすのアシスト制御法である。この制御法は、一次遅れ系を介することで人間が手を離れた後に惰性走行を生み出すアシスト手法を実現されている。

2.2 一次遅れ系によるアシストの走行制御法

一次遅れ系によるアシストの走行制御法[3]の構成図を図2に示す。トルクセンサから得た人間の左右の入力トルク 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、式(1)のように設計する。

一般の車いすのような自然な走行を実現するため、入力トルクがなくなった後もアシストトルクを生成する必要がある。車いすが惰性走行を行うために、搭乗者の入力トルクに対して一次遅れ系を介して、入力トルクの状況に応じて式(2)のように τ_a を変化させている。搭乗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 τ_a を小さくして ($\tau_a = \tau_f$) アシストトルクの早い立ち上がりを実現し、ハンドリムから手を離して入力トルクが減少している間は時定数を大きくして ($\tau_a = \tau_s$) 緩やかな惰性走行を生み出している。

このアシスト制御法を左右輪それぞれに適用することで、パワーアシスト車いすの走行が実現される。

$$T_a = \frac{\alpha}{1 + \tau_a s} T_h \tag{1}$$

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

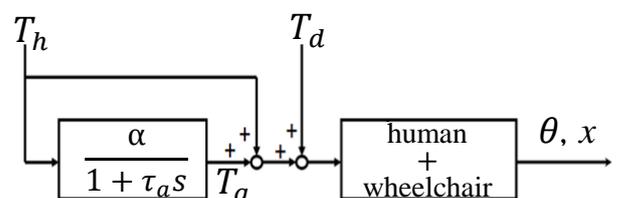


Fig. 2 Configuration of power assisting control system

3. 外乱レベル適応型走行制御法

3.1 概要

外乱レベル適応型走行制御法は，路面外乱の推定，適切なアシスト比の決定，目標距離の推定，ファジィ推論を用いたアシストトルクの減少率調整を組み合わせた制御法で，1 漕ぎ目は 2.2 節で述べた一次遅れ系による走行制御で走行している路面の外乱推定を行い，2 漕ぎ目以降からは外乱推定に基づいてその路面に合った最適値のアシスト比，目標距離，減少率に変化させて走行を行う。

3.2 制御構成

2 漕ぎ目以降の立ち上がり走行時のブロック線図が図 3 である。立ち上がり走行時は，1 漕ぎ目で推定した外乱レベル T_d を最適走行パラメータマップの結果より，最適なアシスト比 α に変化させるといった制御構成になっている。

2 漕ぎ目以降の惰性走行時のブロック線図が図 4 で，惰性走行時は入力トルクの積分値 T_{int_total} から目標距離 d_model を推定，目標距離 d_model と 1 漕ぎでの実際の走行距離 d の差 d_gap よりファジィ推論を用いてアシストトルクの減少率 R を調整するという制御構成になっている。 k は制御周期(1ms)である。

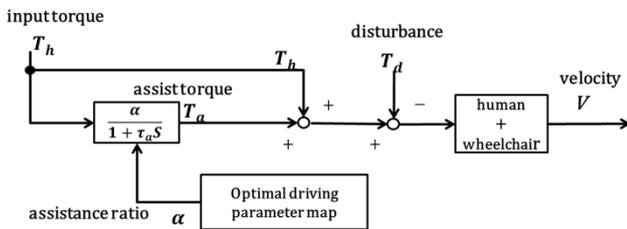


Fig. 3 Block diagram of acceleration driving

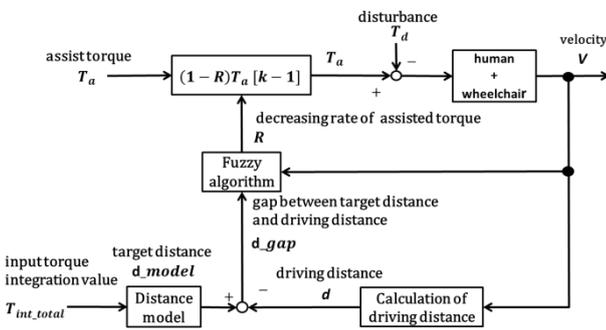


Fig. 4 Block diagram of inertial driving

3.3 路面外乱のレベル分け

路面の違いにより車いすの進みにくさは変化し，搭乗者の負担も変化する．そのため，搭乗者の負担を軽減するには，アシストを路面外乱の大きさに合わせて変化させる必要がある。

そこでまず，図 5 に示す外乱オブザーバを用いて路面外乱の大きさを数値として計測した．入力を入力トルク T_h とアシストトルク T_a であり，出力は車輪が回転するのに用いられたトルクである．この入力と出力の差が外乱を打ち消すために用いられたトルクであり，この差を路面外乱の推定値 \hat{T}_d とした。

そして，外乱オブザーバを用いて推定した路面外乱の大きさを 4 段階にレベル分けすることで，路面外乱に適したアシストに変化させた．今回はそのレベルの代表例としてレベル①を平面，レベル②を図 6(a)の人工芝，レベル③を坂 3.8 度，レベル④を図 6(b)の坂 6.4 度とした。

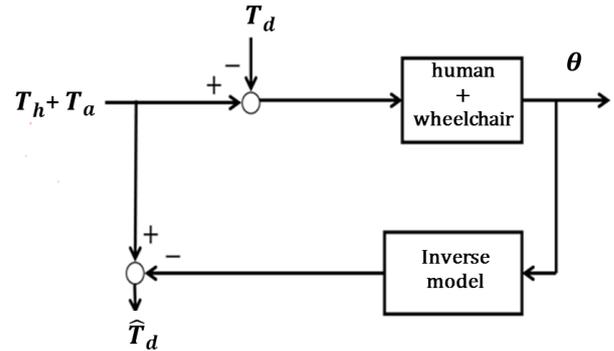


Fig. 5 Block diagram of disturbance observer



(a) Artificial turf (b) 90-degree slope

Fig. 6 Example of disturbance road

3.4 最適なアシスト比の決定

3.3 節で定めた外乱レベルを想定した路面で，アシスト比と惰性時定数を変えて走行し，図 7 に示すように，搭乗者が主観的に「良い」，「いまひとつ」，「悪い」の三段階で評価して，安全で乗り心地の良い走行ができているかを記述した最適走行パラメータマップを搭乗者ごとに事前に作成する．そして，良い走行だと評価された範囲で式(3)の走行効率 DE が最も高いアシスト比と惰性時定数をその外乱レベルで搭乗者にとって最も安全で乗り心地の良い最適値とした。 d は 1 漕ぎでの走行距離であり， T_h は左右の入力トルクの和である。

$$DE = \frac{d}{\int T_h dt} \quad (3)$$

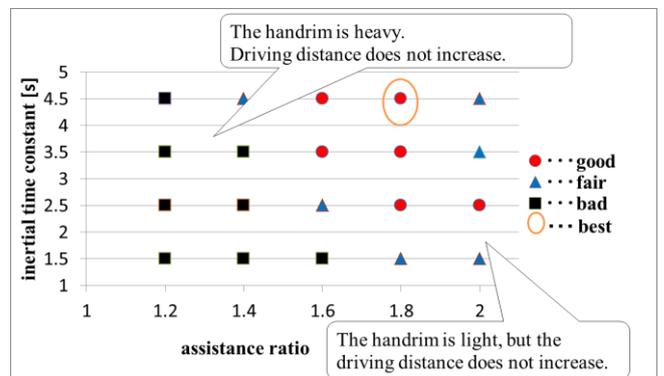


Fig. 7 Optimal driving parameter map

3.5 目標距離の推定

3.4節の最適マップを用いて、各レベルの目標距離を作成する。目標距離とは、1漕ぎでどれだけの距離を走行するのを入力トルクに応じて決定するものである。目標距離の作成は図8に示すように、各レベルの路面をレベルにあった最適値を用いて30回走行し、そのときの走行距離とトルクの大きさを回帰分析を行い、その関係を一次関数として表すことで作成する。今回は、直進走行のみを考慮しているため、目標距離は直進したときの距離とする。

さらに、何らかの影響で入力トルクが大きくなってしまった場合に、目標距離が大きくなりすぎて走行距離が伸びすぎるのを防ぐために、図9に示すように目標距離の上限を設定した。目標距離の上限は、図7の走行距離が伸びすぎていまいひとつと評価した点を用いて、各レベルの路面を数回走行し、その中の最小値より決定した。

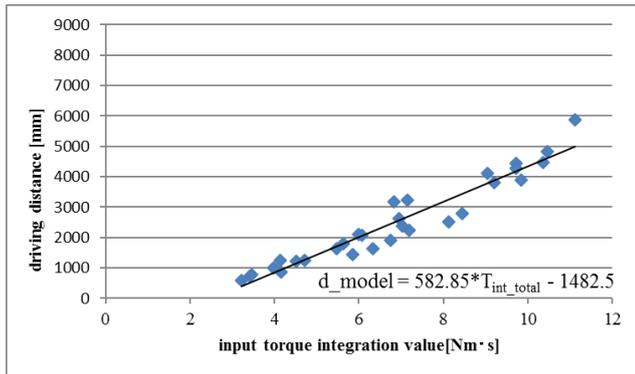


Fig. 8 Target distance design by regression analysis

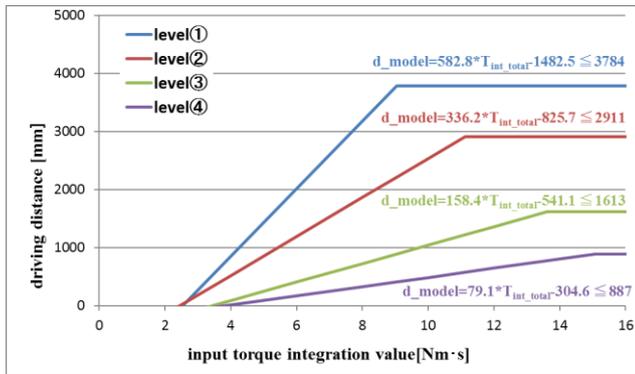


Fig. 9 Target distance design with upper limit

3.6 ファジィ推論を用いたアシストトルクの減少率調整

ファジィ推論を用いることでアシストトルクの減少率の調整を行う。ファジィ推論は、人間のあいまいな感覚や経験的な知識を自動制御の制御則として反映することができるという利点があり、本研究は搭乗者の感覚を重要視しているため、ファジィ推論を適用した。

今回ファジィ推論は、目標距離と走行距離との差 d_{gap} と走行速度 V から推論を行い、減少率 R を調整する。 d_{gap} はあとどれだけの距離を走行するべきなのかを示しており、その差 d_{gap} と走行速度 V からアシストトルクの減少率 R を決定することで、目標距離通りに走行できるようにした。

4. 実験による検証

4.1 検証方法

被験者は被験者1, 2, 3の3名で、図6にあるような外乱レベルを想定した路面で検証を行う。1漕ぎ目を市販機を想定した一次遅れ系制御(適応制御なし)、2漕ぎ目以降を

外乱レベル適応型走行制御(適応制御あり)として、各路面を10回走行する。そのときの、適応制御ありの制御性能の確認と、適応制御ありと適応制御なしの走行効率を比較して、提案した手法の有用性を確認した。

4.2 検証結果

図10, 図11, 図12に人工芝, 図13, 図14, 図15に坂6.4度の走行実験結果を一例として示す。図10, 図13は被験者1の入力トルクとアシストトルクの波形, 図11, 図14は被験者1の速度の波形を示している。また, 図12, 図15は3名の被験者の10回行った走行実験の1漕ぎ目と2漕ぎ目, それぞれの走行効率を示している。

図10より2漕ぎ目は外乱推定によりアシスト比が変化することで、アシストトルクが増加していることがわかる。さらに、目標距離、減少率も変化していることよりアシストトルクの減少が緩やかになっている。また、図11において2漕ぎ目の速度は1漕ぎ目より大きくなっていて、速度の出ている時間も伸びている。そのため、適応制御ありの方が1漕ぎごとのインターバルが大きくなっていることがわかる。さらに、図12から走行効率も上昇している。

図13, 図14より、坂6.4度でも2漕ぎ目のアシストトルク、速度の変化は、坂6.4度に適した値で人工芝の場合と同様な変化をしていることが読み取れる。図15より、人工芝の場合と同様に、坂6.4度でも走行効率は上昇したことがわかる。

紙面の都合上、平面の場合、坂3.8度の場合の図は省略するが、平面の場合では外乱の影響が少ないため、アシスト比が変化しないことから適応制御なしと適応制御ありで大きな違いは生じなかった。坂3.8度の場合では、人工芝、坂6.4度の場合と同じく高いアシストトルクで緩やかな減少をしていき、1漕ぎごとのインターバルが大きくなり、走行効率は上昇していた。

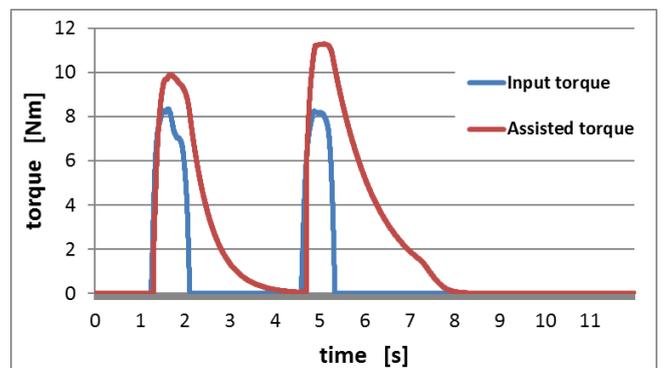


Fig. 10 Waveform of input torque and assisted torque (level②)

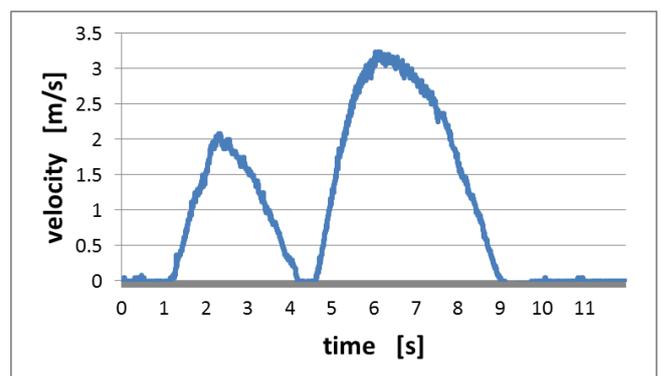


Fig. 11 Waveform of velocity (level②)

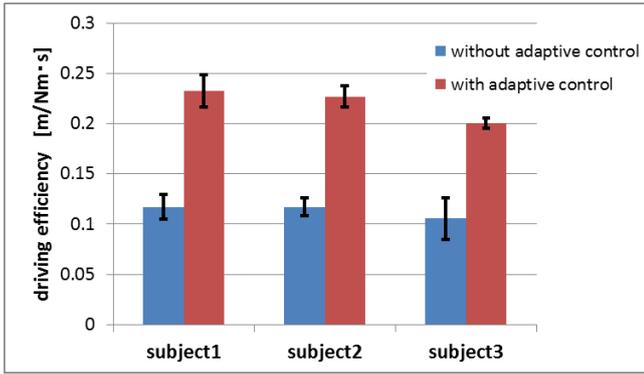


Fig. 12 Driving efficiency (level②)

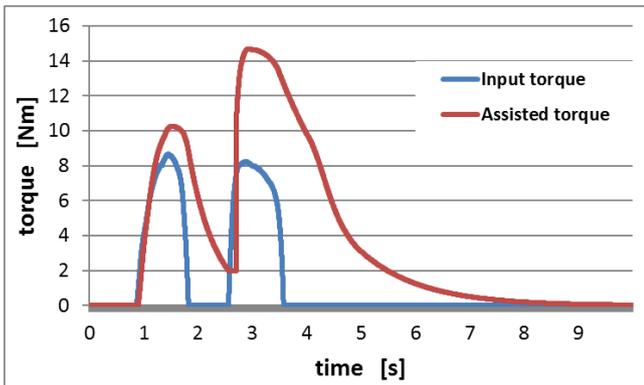


Fig. 13 Waveform of input torque and assisted torque (level④)

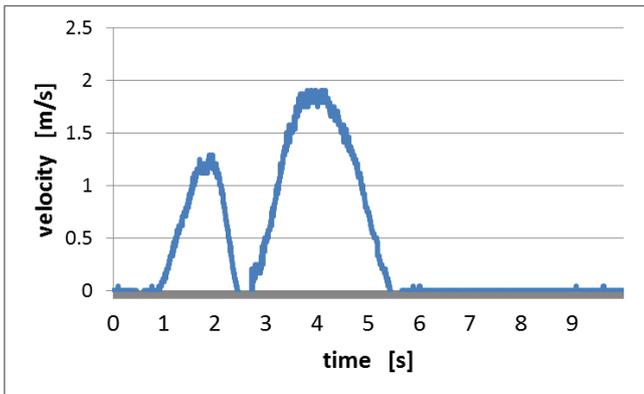


Fig. 14 Waveform of velocity (level④)

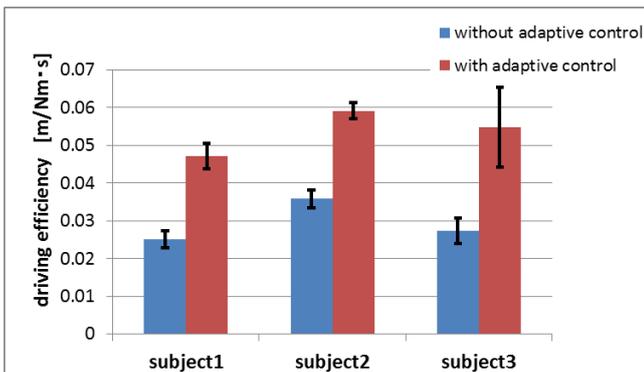


Fig. 15 Driving efficiency (level④)

4.3 制御性能の確認

外乱レベル適応型走行制御を適用して走行した場合の被験者ごとの d_{gap} より求めた走行距離の相対誤差 RE の平均が表 1 である。すべての被験者で一番大きい割合でも 8.9% となっており、走行距離の長さから考慮すると、この相対誤差は小さいものといえる。このことから、ファジィ推論に用いたパラメータの調節が適切な値となっており、目標距離通りの走行できていることが確認できた。相対誤差は式(4)より算出した。

$$RE = \left| \frac{error}{target\ distance} \right| \times 100 \quad (4)$$

Table 1. Relative error (%)

	Level①	Level②	Level③	Level④
Subject1	6.7	6.1	5.4	5.9
Subject2	6.1	3.8	4.3	4.3
Subject3	8.9	6.7	3.9	3.9

5. まとめと今後の課題

本論文では、電動アシスト車いすの外乱レベル適応型走行制御法を提案し、実験による検証を行った。外乱レベル適応型走行制御を用いた場合、すべての路面、被験者で走行効率が上昇した。このことより、同じ距離を走行する場合、一次遅れ系制御よりも外乱レベル適応型走行制御を用いた方が、漕ぐ回数が少なくなり搭乗者の負担を減らすことができた。また、最適走行パラメータマップで定めたアシスト比や惰性時定数、目標距離の推定より安全で乗り心地の良い、搭乗者にとって快適な走行が実現できた。

今回提案した外乱レベル適応型走行制御法では、最適走行パラメータマップや目標距離を作成する際に、様々な路面で何度も走行しなければならないため、手間や時間が大きくかかってしまう。そこで、シミュレーションシステムを作成できれば、常に同じ場所で測定でき、搭乗者の負担を少なくすることができると考えられる。また、今回は直進走行のみを考慮した手法であるため、今後は旋回走行を考慮した走行制御を検証したいと考えている。

参考文献

- [1] 総務省統計局: 高齢者の人口(2015)
- [2] 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.
- [3] 関弘和, 梶直輝, 小安雄一, 堀洋一, "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, Vol.124-3, pp.318-323, 2004.