

ファジィ推論に基づく電動アシスト車いすのユーザ操作特性学習型走行制御

User Characteristics Learning Type Driving Control for Power-Assisted Wheelchair Based on Fuzzy Inference

関弘和 (千葉工大)

Hirokazu SEKI, Chiba Institute of Technology

Abstract: This paper describes a novel drive control scheme of power-assisted wheelchairs based on fuzzy learning of human operation characteristics. The "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, some handicapped people with paralysis of muscles of one side of the body cannot maneuver wheelchairs as desired because of the difference of right and left input force. Therefore, this study proposes a driving control of power-assisted wheelchairs with a fuzzy variable design of human operation characteristics. The proposed fuzzy system infers the desired destination coordinate points based on the human input torque information. Some driving experiments will be provided to confirm the effectiveness of the proposed control system.

Key Words: power-assisted wheelchair, driving control, operability improvement, fuzzy inference

1. はじめに

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。Fig.1 に示すヤマハ製JWI⁽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。社会的インフラのバリアフリー化を目指すだけでなく、車いす自体のハイテク化、高機能化によりバリアを乗り越え、健常者と同じように行動できるようにすることも重要であり、利用者の自由度やコストの点において良いとも考えられる。

高機能化を目指した電動アシスト車いすの制御システムに対し、基本的なアシスト機構や制御法の開発⁽²⁾⁽³⁾、加速度の変化率であるジャークを考慮した制御法により乗り心地向上を目指した研究⁽⁴⁾⁽⁵⁾、人間の入力する力をトルクセンサレスで推定しアシスト走行を実現する手法⁽⁶⁾、安定で確実な直進旋回走行を実現する制御法の開発⁽⁷⁾、安全な段差越えを実現する走行制御法の開発⁽⁸⁾なども行われている。



Fig. 1 Power-assisted wheelchair.

電動アシスト車いすは筋力の衰えた高齢者や障害者でも利用できるが、実際の走行場面における問題点として、操作者が片麻痺やその他の障害、身体的特徴、癖や怪我などによりハンドリムを漕ぐための上肢の左右のバランスが崩れる場合には、意思通りの直進や旋回ができないことが多

く、また片側の駆動トルクが小さくなるため一漕ぎでの走行距離が進行方向ごとに異なり、方向によっては操作者に多くの負担を強いることになる。そのため、左右輪のアシストトルクのバランスをとると共に、進行方向に応じてアシスト比を調整し、直進性や旋回性を向上する必要がある。具体的には、操作者の左右輪入力トルク情報から、目標とする進行方向や走行距離への関係を非線形写像ととらえ、この非線形特性を、あらかじめ取得した入力トルク情報から学習し、その結果を走行制御に反映することが考えられる。

その一つの手法として筆者らが先に検討した走行制御法⁽⁹⁾では、非線形特性をニューラルネットで学習することにより操作性の向上を実現しているが、ローカルミニマムや学習回数、計算量などの問題があった。一方、制御ルール設計や変更が容易なファジィ推論を用いて操作者の特性を学習・設計し、推定方向への適切な走行制御を行う手法も検討された⁽¹⁰⁾。しかしこれらの研究では、操作者の意思として走行方向角度のみを推定し、走行距離は一定と仮定していた。そこで本論文では、入力トルクの強弱によって変化するべき走行距離も考慮し、操作者の一漕ぎに対する目標到達地点を2次元平面座標点として推定し、その地点への走行制御を行う手法を提案し、実験的な検討を行う。

2. 電動アシスト車いすの走行制御

電動アシスト車いすの走行制御法については一次遅れ系を用いるもの⁽³⁾や、車輪角度や速度のフィードバック制御を用いるもの⁽⁴⁾⁽⁵⁾などいくつか考えられる。本研究では車いすが望みの到達地点へ走行できるよう制御を行うため、後者を適用する。この制御システムの構成図を Fig.3 に示す。左右の車輪角速度 $d\theta_r/dt$, $d\theta_l/dt$ をフィードバックしてPID制御し、その指令値を適切に生成する。



Fig. 2 Configuration of power assisting control system.

3. ファジィ推論に基づくユーザ特性学習型走行制御

3-1 走行到達地点の定義

以前の研究では車いすの走行方向のみに焦点をあて、前進方向を30~150度で30度刻みで5方向を定義していた⁽¹⁰⁾。しかし走行方向のみを決定するのでは不十分であり、距離も考慮するべきであるため、Fig. 3のように走行到達地点として定義することとする。その場での旋回動作や後進動作などは今回考慮しない。

~ の10個の地点を定義し、これらの地点に到達しようとする際に操作者が入力するトルクデータを事前に収集・学習設計し、これに基づき10点の中間範囲も補間しながら全ての地点を推定するようにする。

この10点はユーザ操作特性を抽出するための代表点である。これが多すぎると学習データ取得作業においてユーザの負担が増えるが、少なすぎると走行意思の推定の精度が落ちるため、今回は10点としている。

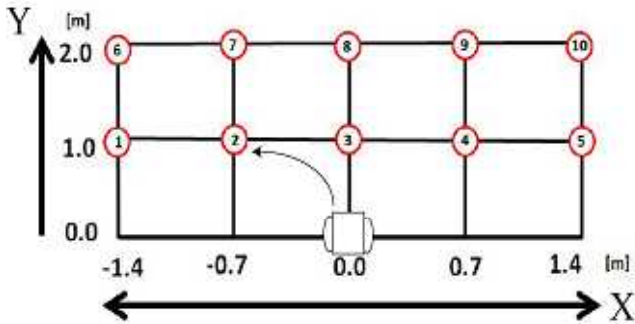


Fig. 3 Definition of wheelchair's destination coordinate.

3-2 提案手法の概要

提案手法の概要を Fig. 4 に示す。前節で示した10地点へ走行するつもりで入力した左右輪入力トルクデータを事前に収集しておき、この一漕ぎでの入力トルクの積分値の和と差の情報を用いて、操作者の到達したい地点の二次元座標 X, Y をファジィ推論する。10地点はあくまで学習に用いる代表点であり、それらの間のあらゆる地点もファジィ推論により補間して推定される。入力トルクが減少し始めた時点で推定を行い、その後、車いすがその地点まで移動・到達するよう左右の車輪の角速度制御を行う。

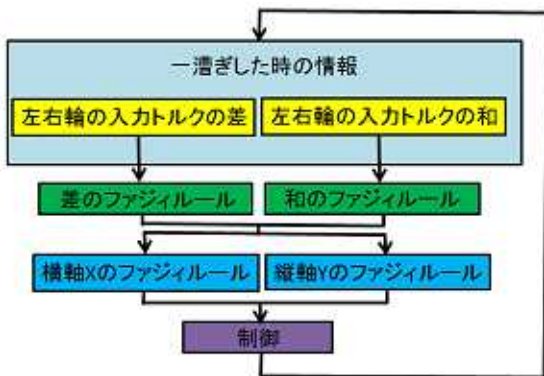


Fig. 4 Proposed control system.

3-3 ファジィ変数とルールの設計

操作者の左右輪への一漕ぎでの入力トルクの積分値 T_r , T_l の和 (T_r+T_l) と差 (T_l-T_r) をファジィ推論の入力情報として、目標到達地点座標を推定する。まず入力トルク和と差については、SS(Small-Small), S(Small), M(Middle), B(Big),

BB(Big-Big)の5つによりファジィ化する。また、推定出力である X, Y 座標についてはシングルトン型ファジィ変数を用い、X 座標については(SS, S, M, B, BB)=(-1.4m, -0.7m, 0m, 0.7m, 1.4m), X 座標については(SS, S, M, B, BB)=(0m, 0.5m, 1m, 1.5m, 2m) として設計する。

これらのファジィ変数を基にしてルールに基づき推論を行う。左右の入力トルクの和と差を用いたファジィルールを Fig. 5 と Fig. 6 にそれぞれ示す。これは対称的なルールであり、使用者の特性に関係なく設定する。図中の N は起こりえないものを表している。

和 \ 差	SS	S	M	B	BB
SS	N	N	SS	SS	SS
S	N	S	S	S	S
M	M	M	M	M	M
B	N	B	B	B	B
BB	N	N	BB	BB	BB

Fig. 5 Fuzzy rules for X-coordinate estimation.

和 \ 差	SS	S	M	B	BB
SS	N	N	M	B	BB
S	N	M	B	BB	BB
M	S	M	B	BB	BB
B	N	M	B	BB	BB
BB	N	N	M	B	BB

Fig. 6 Fuzzy rules for Y-coordinate estimation.

ファジィ推論の入力であるトルク和とトルク差のファジィ変数については、操作者が10個の基準点に向かって走行することを想定して操作したときの左右輪入力トルクデータを、事前に取得して設計することとする。ここで例えば、左腕は右腕より力を入れにくく左右アンバランスであることなどのユーザ操作特性は、トルク和とトルク差のファジィ設計に反映される。10地点それぞれのトルク和と差のデータを確認し、Fig5, Fig.6のルールに合致するようにメンバーシップ関数を設計する。

後述の実験において、事前に取得した入力トルクデータに基づいて設計したファジィ変数設計例を Fig. 7, Fig. 8 に示す。特にトルク差については、左右対称ではない歪なメンバーシップ関数となっていることがわかる。

推論には Min-Max 法を用いる。各ルールにおいて和と差のグレード値の小さい方が選ばれていき (Min 法)、出さなかった25個の値に対し、同一変数中で最大値を代表とする (Max 法)。これにより SS から BB の5つの変数値が決まり、これをシングルトン型ファジィ変数として適用し、重心値を計算することで推定出力が得られる。

$$X = \frac{(-1.4)SS + (-0.7)S + 0 \times M + 0.7B + 1.4BB}{SS + S + M + B + BB} \quad (1)$$

$$Y = \frac{0 \times SS + (-0.5)S + 1 \times M + 1.5B + 2BB}{SS + S + M + B + BB} \quad (2)$$

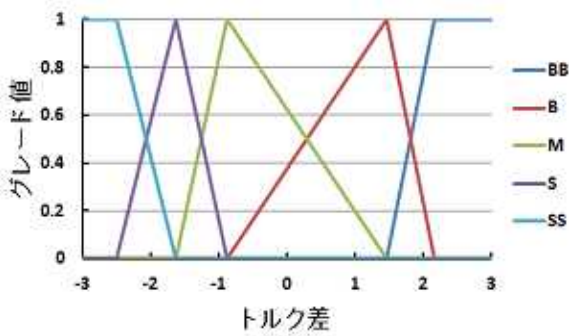


Fig. 7 Fuzzy variable design of torque difference.

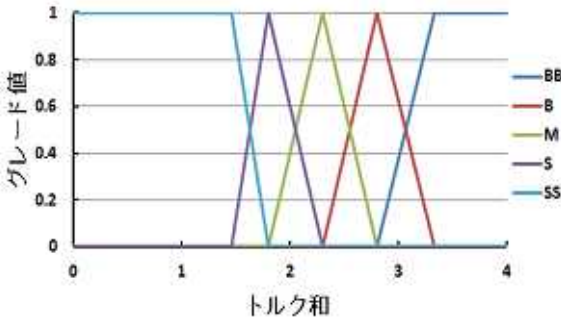


Fig. 8 Fuzzy variable design of torque sum.

3-4 車いすの走行制御

前節までで目標の到達地点が推定されたとすれば、後はその地点へ車いすを走行制御させるだけである。ただし、ファジィ推論の入力であるトルク和とトルク差については、漕ぎ終わるまでは計算できないため、何らかの方法で走行をし始めておく必要がある。そこで本研究では、漕ぎ始めてから漕ぎ終わるまでの期間は仮想インピーダンス制御を用いて左右輪の角速度指令値を生成し、漕ぎ終わった時点からは、その地点から推定到達地点へ直線で結んだ軌道を追従する制御に切り替える手法を提案する。

前半の仮想インピーダンス制御については、左右輪の角速度指令値は

$$\dot{\theta}_{r,l}^{ref} = \frac{1}{Ms + B} T_{r,l} \quad (3)$$

と計算される。後半の軌道制御についても、左右の車輪角速度制御を基本とする。軌道追従制御においては、並進速度 v と姿勢角速度 ω を扱うため、車輪半径 R と車輪間距離 W を用いて式(4)のように車輪角速度指令値に変換する。

$$\begin{pmatrix} \dot{\theta}_r^{ref} \\ \dot{\theta}_l^{ref} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{1}{R} & \frac{W}{2R} \\ \frac{1}{R} & -\frac{W}{2R} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v^{ref} \\ \omega^{ref} \end{pmatrix} \quad (4)$$

並進速度の指令値は、仮想インピーダンス制御から軌道追従制御への切り替え時点の速度から、停止時までを連続的につないで生成する。また、姿勢角速度については、修正量 $\Delta\omega(t)$ を式(3)のように、現在の角速度 $\omega(t)$ 、追従経路と車いすの進行方向のずれ $\Delta\theta(t)$ 、追従経路と車いす位置との垂直距離 $\Delta d(t)$ と、それぞれに対応するゲインを用いて決定する。

$$\Delta\omega(t) = -K_{\Delta\theta}\Delta\theta(t) - K_{\omega}\omega(t) - K_{\Delta d}\Delta d(t) \quad (5)$$

4. 実験による検証

4-1 実験装置

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 JW をベースに Fig.9 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 JW 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。また今回の実験では、ある健康者が左腕に高齢者疑似体験教材を装着することで左片麻痺の操作者を模擬することとする。走行路面は屋内の平坦な場所である。

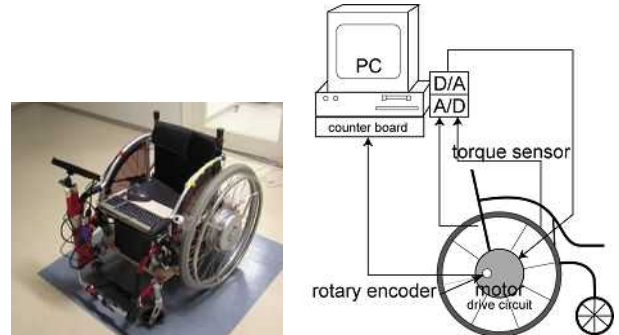


Fig. 9 Experimental setup of power-assisted wheelchair.

4-2 実験結果

Fig. 10 は被験者が模擬装置を装着せずに、通常の操作性で学習し、走行制御を行った到達位置の結果である。各基準点への走行が実現できていることがわかる。Fig. 11 は左腕に模擬装置を装着し、Fig. 10 の際の学習モデルのもとで走行実験を行った結果である。左麻痺を模擬しているため、右前方への走行が難しく、意図する到達位置を推定できていないことがわかる。Fig. 12 は左麻痺の模擬状態のもとで学習し、それに基づき走行実験を行った到達位置の結果である。各基準点に対し適切に推定することができており、またその地点への走行制御もできていることがわかる。

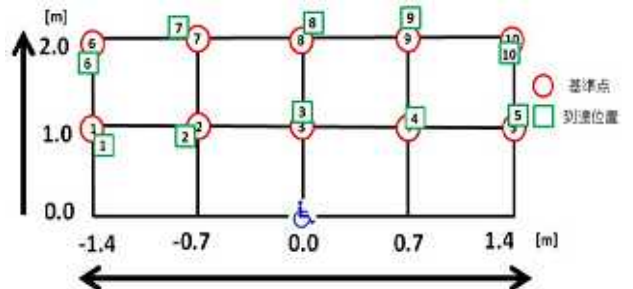


Fig. 10 Experiment results without imitation materials.

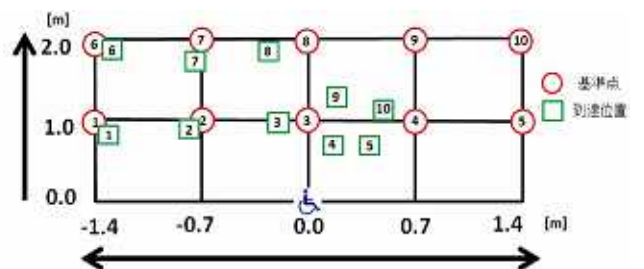


Fig. 11 Experiment results without the proposed control.

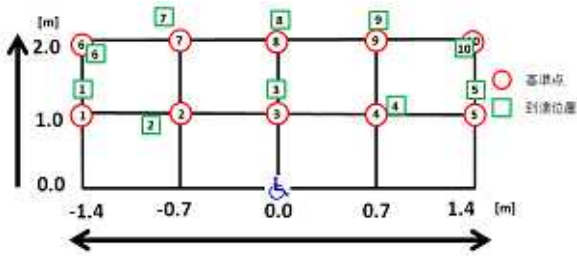


Fig. 12 Experiment results with the proposed control.

今回設計したファジィルールとメンバーシップ関数については柔軟性がないため、今後十分に検討の余地がある。より多くの操作特性について検証することで手法を確立していく必要がある。

5. おわりに

本稿では、ファジィ推論による電動アシスト車いすのユーザー特性学習型走行制御法を提案した。片麻痺などの障害をもつ人やその他様々な身体的特徴や癖をもつ人に対し意思が反映された適切な走行を実現する可能性があることを、検証例は少ないものの実験的検討により示した。しかし、ファジィルールとメンバーシップ関数の設計についてはまだ検証が不十分であり、より柔軟性をもつような設計法の検討が必要である。今後は、

- ・ 基準点の設定方法やファジィ設計の精査と精度向上
- ・ 仮想インピーダンス制御のパラメータ設計
- ・ 二漕ぎ目以降も含めた連続的な操作への対応
- ・ ユーザーの操作特性の変化に対するファジィ再設計
- ・ 実際の様々な走行路における実験検証
- ・ 多くの被験者や障害者による評価実験

などについて検討を進める予定である。

参考文献

- (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) R. A. Cooper, et al., Performance assessment of a pushrim-activated power-assisted wheelchair control system, IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 10, no. 1, pp.121-126, 2002.
- (3) 関弘和, 他, 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, no. 3, pp.318-323, 2004.
- (4) 関弘和, 他, 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, vol. 125, no. 7, pp.1133-1139, 2005.
- (5) 関弘和, 他, 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, vol. 18, no. 3, pp.19-25, 2006.
- (6) 開田有紀子, 他, 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, 電気学会論文誌D, vol. 126, no. 2, pp.137-142, 2006.
- (7) 村上博紀, 他, 姿勢角度を考慮したファジィアルゴリズムによる電動アシスト車椅子の操作性向上制御, 電気学会論文誌C, vol. 129, no. 6, pp.1077-1086, 2009.
- (8) 関弘和, 他, 走行モード切換えに基づく電動アシスト車いすの段差踏破制御法, ライフサポート, vol. 19, no. 3, pp.17-24, 2007.

- (9) 田之畑直希, 他, ユーザ操作特性のニューラルネットワーク学習に基づく電動アシスト車椅子の操作性向上制御, 電気学会論文誌D, vol. 130, no. 6, pp. 768-776, 2010.
- (10) 関弘和, 他, ユーザ操作特性のファジィ型学習に基づく電動アシスト車いすの走行制御法, 生活生命支援医療福祉工学系学会連合大会2011, O2-7, 2011.