

O2-7

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

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

関弘和, 田之畑直希, 木曾淳 (千葉工大)

Hirokazu SEKI, Naoki TANOHATA, Atsushi KISO, 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 and a redesign system for the human characteristic change. Some driving experiments will be provided to confirm the effectiveness of the proposed control system.

Key Words: Support for Elderly People and Disabled People, Power-Assisted Wheelchair, Driving Control, Operability Improvement, Fuzzy Inference

1. 緒言

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 JWII⁽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、操作者が片麻痺などの症状、あるいはその他の身体的特徴や癖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、操作者の左右入力トルク情報から、目標とする進行方向や方向ごとの適切なアシスト比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先に検討された走行制御法⁽⁹⁾では、非線形特性をニューラルネットワーク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。さらに、操作者の漕ぎ方は症状の回復、進行等により常に一定ではなく変化しうるため、アシスト制御系もそれに適応的に変化すべきであると考えられるが、先の研究では検討されていない。そこで本論文ではこれらの問題点や新しい課題に対し、制御ルールの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抽出し、また操作特性の変化に応じて再設計する手法を提案し、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車輪角度や速度のフィードバック制御を用いたもの⁽⁴⁾⁽⁵⁾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⁽³⁾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 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。

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

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

時定数 τ_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.

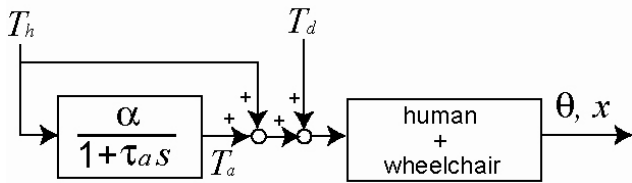


Fig. 2 Configuration of power assisting control system using Low-Pass-Filter.

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 走行方向の定義

本研究では Fig.3 に示すように車いすの前進方向を 30 度方向から 30 度刻みで 5 方向定義をする. その場での旋回動作や後進動作などは今回考慮しない.

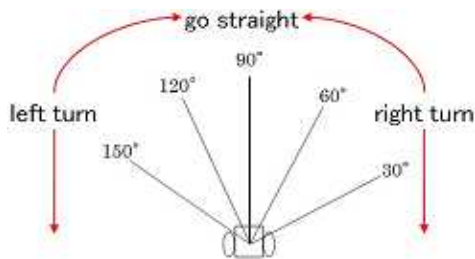


Fig. 3 Definition of wheelchair's driving direction.

3-2 提案手法の概要

提案手法の概要を Fig.4 に示す. 最初に, 操作者の左右輪入力トルクの差を利用して目標走行角度 O をファジィ推論(A)により推定し, 同時にアシストトルクの左右輪への配分比を決定する. 次に, 推定された目標方向角度 O から, 片麻痺等による駆動トルクの減少を補うための最適アシスト比をファジィ推論(B)により推定する. 今回は両推論とも前件部を三角型変数, 後件部をシングルトン型変数として設計する.

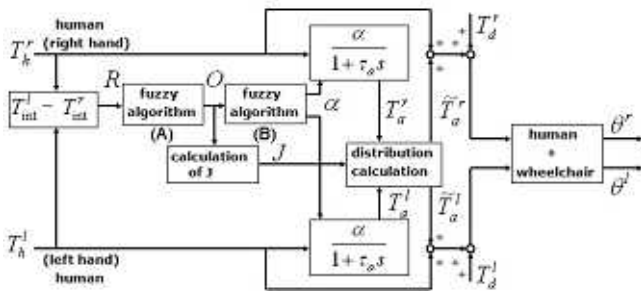


Fig. 4 Configuration of the proposed control system.

3-3 ファジィ変数の設計

最初にファジィ推論(A)における, 人間の入力トルク情報に基づく目標走行角度 O の推定方法について述べる. 入力トルク情報については, 一漕ぎの動作について左右輪それぞれで入力トルクの積分値 T_{int}^r, T_{int}^l を求めている. 人間

が左右輪を漕ぐタイミングがずれることがあることから, 入力トルクの瞬時値ではなく積分値を用いることとする. さらに, 人間の入力トルクは必ず間欠的となるので入力トルクが零となる時間が存在し, 加えて人間の意志を読み取れるのはトルクを入力し始めてからその力が減少し始めるまでの間だけであることを考慮し, トルクを入力し始めてからその力が減少し始めるまでの間だけ積分値を計算し, 入力トルクの差 R を求めている.

ファジィ推論(A)の前件部については, 操作者が各進行方向に進むつもりで複数回漕いだ入力トルクのデータから設計する. 5 つのファジィ変数を, $LL_H, L_H, ST_H, R_H, RR_H$ とし, 各方向に進もうとした際の入力トルク差の平均値を R_0 とすれば, $R=R_{30}$ のとき RR が 1, その他も同様に対応させ, 例え Fig.5 のように三角型ファジィ変数を設計する. R の値に応じて各変数が 0 から 1 までのグレード値をとるが, 最大でも二つの変数が値をもち合計値は常に 1 となるようにしている. なお Fig.5 は後述の実験結果の一例であり, 左片麻痺を模擬しているため当然対照的ではない歪な形となる. Fig.6 は後件部に相当する, 目標走行角度のシングルトン型ファジィ変数であり, 対照的な変数として設計する. O の値に応じて, RR, R, ST, L, LL の各変数が 0 から 1 までのグレード値をとる. 推論においては, 前件部で得られた 5 つの値をそのまま $LL=LL_H$ のように代入していき, これら 5 つのグレード値の重心を求めたものが目標走行角度 O の推定値となる.

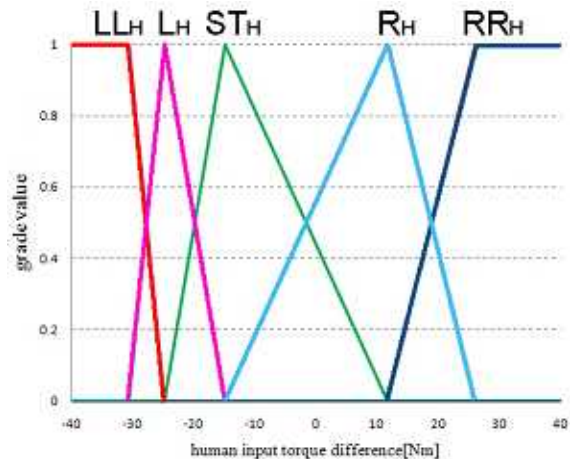


Fig. 5 Triangular fuzzy variable of R .

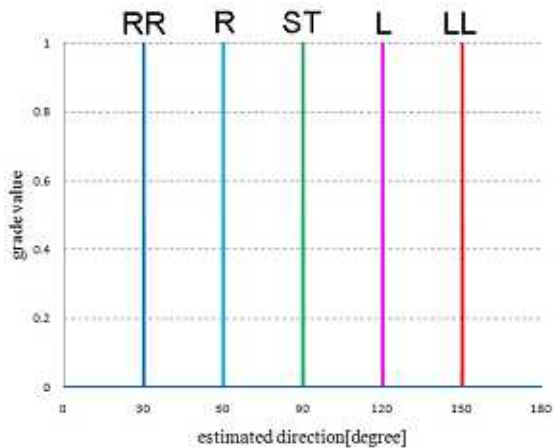


Fig. 6 Singleton-type fuzzy reasoning of O .

次に, ファジィ推論(B)における, 目標走行角度 O に基

づく最適アシスト比の推定方法について述べる。Fig.7 はファジィ推論の前件部に相当する目標走行角度 O の三角型ファジィ変数であり、対照的な変数として設計する。推論(A)により目標走行角度 O が決定されているため、この前件部で5つの変数 RR, R, ST, L, LL の値も決定される。次に後件部に相当するアシスト比のシングルトン型ファジィ変数の設計を、ファジィ推論(A)の前件部と同様に入力トルクデータから設計する。5つのファジィ変数を、 $LL_A, L_A, ST_A, R_A, RR_A$ とする。後件部は、複数回漕いだ入力トルクデータから各方向に対する最適なアシスト比 α_θ ($\theta = 30, 60, 90, 120, 150$) を求めることにより設計する。具体的には、直進(90度)のときの車いすの推進力に、その他全ての進行方向での推進力が揃うようにアシスト比を導く。 RR_A は30度方向を意味するため α_{30} の値に配置し、その他も同様に配置し、例えば Fig.8 のように設計する。Fig.8 は後述の実験結果の一例であり、左片麻痺を模擬しているため当然変則的な配置となる。推論においては、前件部で得られた LL~RR の5つの値をそのまま $LL_A=LL$ のように代入していき、5つのグレード値の重心を求めたものが最適アシスト比 α の推定値となる。

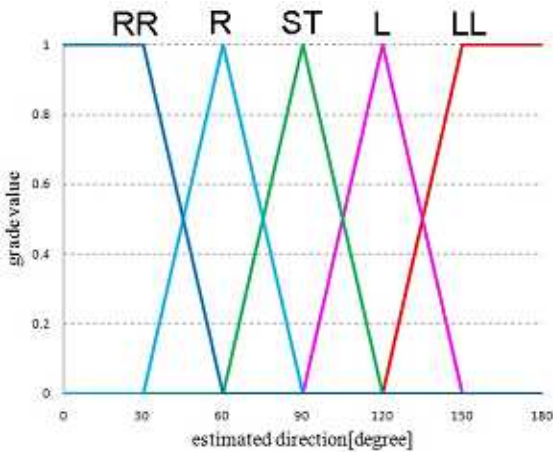


Fig. 7 Triangular fuzzy variable of O .

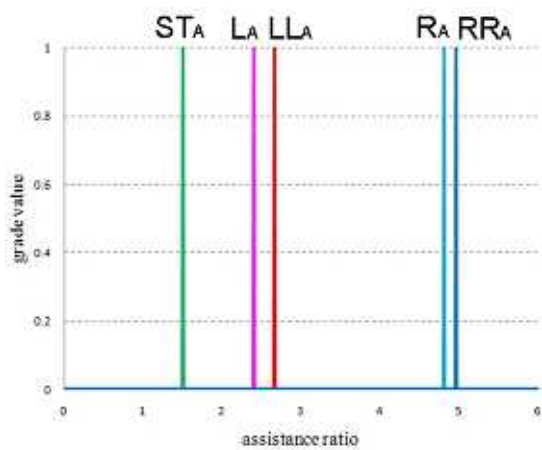


Fig. 8 Singleton-type fuzzy reasoning of α .

3-4 ファジィ変数の再設計法

最後に、一度設計されたファジィ推論に対し、走行結果を随時利用することで再設計していく手法について述べる。

再設計を行うには、操作者が目標とする方向へ走行できた際の走行角度とトルクデータが必要である。目標方向へ走行できたかどうかを自動的に判定することは難しいが、

ここでは一つの判定基準として、漕ぎ出しや漕ぎ直しを含めた一連の操作系列が終了し、車いすがほぼ停止状態になった時点を目標方向へ走行できた場合であると判定する。例えば一漕ぎ目で目標方向からずれた場合には、操作者は車いすがまだ速度をもっている慣性走行時にすぐに漕ぎ直しを行うと考えられるため、今回はこのような判定基準を設ける。具体的な処理として、アシストトルクが 0.1Nm 以下になった時点を手いすがほぼ停止した状態と判断し、その時点までの車いすの走行角度とトルクデータを用いて再設計を行う。トルクデータについては、その時点までの入力トルク差の平均値を用いる。

今回は強化学習の一種であるモンテカルロ法を用いることとし、その構成図を Fig.9 に示す。操作者がハンドリムを漕いだ一連の操作の入力トルクの差 R の平均値を用いて前節の初期学習と同様の考えでファジィ変数を再設計する。ここで、車いすが最終的に向かった方向 O' は常に 30 度刻みの値とは限らず中間値もとりうる。そこで、0 から 1 までの値をとる ε_θ ($\theta = 30, 60, 90, 120, 150$) を用意する。図は省略するが Fig.7 のような三角型ファジィ変数で設計し、 $O'=30$ のとき ε_{30} が 1、その他同様に $O'=60$ のとき ε_{60} 、 $O'=90$ のとき ε_{90} 、 $O'=120$ のとき ε_{120} 、 $O'=150$ のとき ε_{150} が 1 となるようなメンバーシップ関数を設計する。 ε_θ を用いてファジィ変数再設計用のデータを、 $R_\theta + \varepsilon_\theta r (R_\theta^{ave} - R_\theta)$ 、 $\alpha_\theta + \varepsilon_\theta r (\alpha_\theta^{ave} - \alpha_\theta)$ で与えることにする。 ε_θ をこのように与えたのは、例えば車いすが 45 度方向に向かったとき ($O'=45$) に、再設計用のデータが 30 度方向と 60 度方向で同じ割合で変更されるようにするためである。ここで α_θ, R_θ はそれぞれ今まで使われていた入力トルク差、最適アシスト比のファジィ変数の値である。 r は学習率で、今回は 0.1 としている。

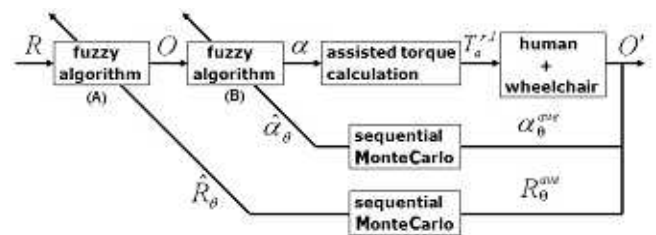


Fig. 9 Configuration of the proposed fuzzy redesign system.

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.11 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した。

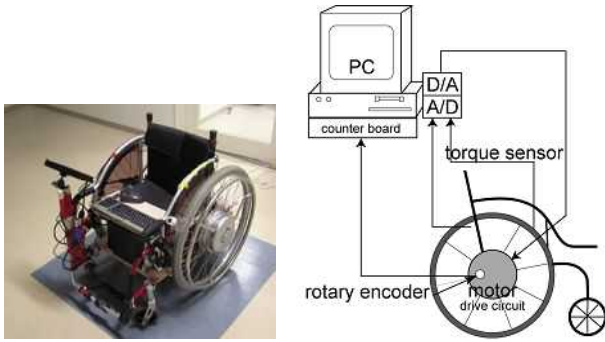


Fig. 10 Experimental setup of power-assisted wheelchair.

4-2 実験結果

最初に，操作者に各進行方向に進むつもりで5回ずつ漕いでもらい学習用のトルクデータを得てファジィ推論を設計する．その結果は Fig.5, Fig.8 のようになった．これにより直進走行実験を行った結果を Fig.12 に示す．Fig.11 は提案手法を用いない場合の結果である．Fig.11 では左右輪の入力トルクが単に増幅されたアシストトルクが生成されるだけであるが，Fig.12 では，右入力トルクが大きいにもかかわらず左アシストトルクのほうが大きく生成され左片麻痺による左側トルク不足を補っていることがわかる．

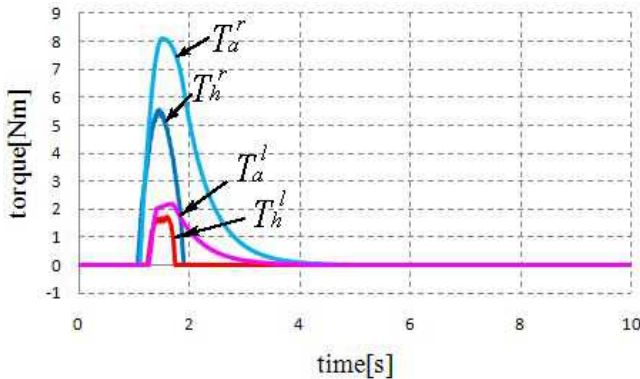


Fig. 11 Experiment results without the proposed control.

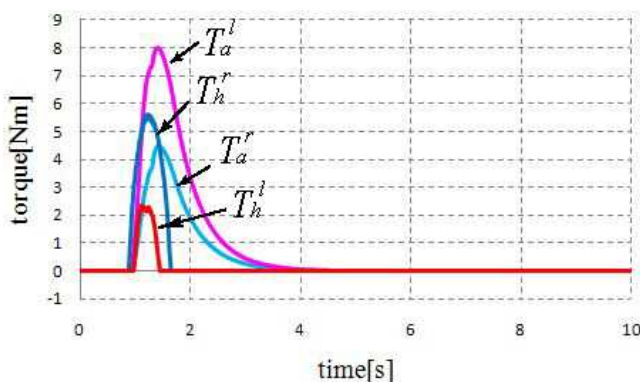


Fig. 12 Experiment results with the proposed control.

次に，提案したファジィ再設計法の有効性を確認するため，健常者で初期学習を行った状態から高齢者疑似体験教材を装着した状態への再設計実験を行った．今回は5つの各進行方向へそれぞれ30回ずつ漕ぐことにより再設計を行った．左片麻痺状態で，再設計前と再設計後の制御系それぞれにおいて走行を行った結果を Fig.13 に示す．図は各方向へ漕ぎ動作をして停止した位置を示している．再設計後では，走行方向と走行距離ともに補正されていること

がわかる．

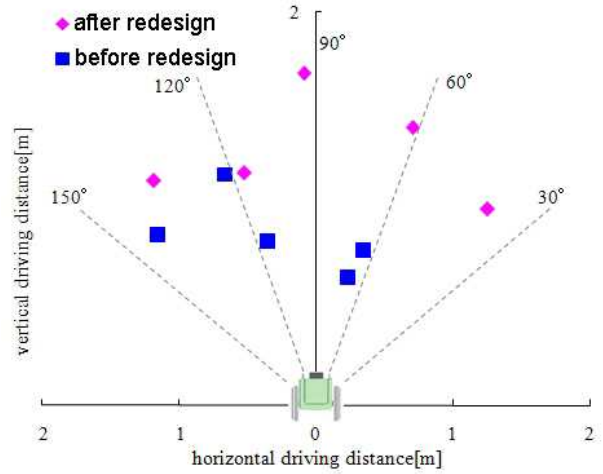


Fig. 13 Driving distance and direction.

5. 結言

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が可能であり，またファジィ変数再設計法によりユーザ操作特性の変化にも対応できることを実験的検討により示した．今後はさらに多くの被験者や実際の障害者による評価実験などを交えて手法の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.