

電動アシスト車いすのユーザ特性対応型走行制御と 視覚フィードバック型操作訓練システム

User Characteristic Adaptation Driving Control of Power-Assisted Wheelchair
and Operation Training System by Visual Feedback

○ 倉本 達矢(千葉工大) 正 関 弘和(千葉工大)

Tatsuya KURAMOTO, Chiba Institute of Technology

Hirokazu SEKI, Chiba Institute of Technology

Abstract: The number of Japanese elderly people is increasing every year and the demand for wheelchairs is also increased. Power-assisted wheelchairs are effective for the daily life of elderly people and handicapped people, however, the users with unbalanced force of right and left arms by injury or disease are difficult to drive as expected. Therefore, this paper proposes a drive control system with the estimation of the desired driving target position from the right and left pushing torque and an operation training system by visual feedback to improve the user's operation ability. Some experiment results are provided to show the effectiveness of the proposed driving control system and training system.

Keywords: Power-Assisted Wheelchair, Fuzzy Inference, Driving Control, User Characteristics

1. 諸言

日本の高齢者人口(65歳以上)^[1]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。総務省統計局によると、この割合は今後も上昇し続け2060年には約39.9%となり、将来的には日本人の2.5人に1人が高齢者になると見込まれている。また、少子化の影響で介護者の不足、介護者自身の高齢化等のような介護側の問題も危惧される。このことから、介護を必要とする人の人口も増加することが考えられ、これに伴って介護福祉機器の需要増加も見込まれる。そこで本研究では介護福祉機器の1つである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定性、搭乗対象者の拡大を図る。

2. 電動アシスト車いすとその制御

図1に示すような電動アシスト車いす^{[2],[3]}は漕いだ力をモータによってアシストすることで筋力の衰えた高齢者や障害者でも容易に操作でき、行動範囲を広げるものとして期待されている。また、実際に漕いで操作することからリハビリにも大変有効である。しかし、市販の電動アシスト車いすの制御系は左右が等しいアシスト比で固定されているため、事故や病によって片半身麻痺の障害を持ってしまった場合(頸椎損傷や脳梗塞の後遺症など)、漕ぐ力が左右非対称となることから左右の力の差を更に大きくしてしまい、車いすの操作をより困難にしてしまう可能性がある。これは事故等の原因にも繋がるため大変危険である。

そこで本論文では、漕いだ左右の入力トルクの情報を基にユーザ特性に応じた事前学習を行い、ファジィ推論によって目標位置を推定し走行する軌道推定型走行制御手法を提案する。またユーザの意思と推定軌道が合致する精度を向上させるための視覚フィードバック型操作訓練システムについても提案し考察を行う。



Fig.1 Power-Assisted Wheelchair

図2に示す従来型走行制御では、アシスト比 α によってアシストトルク T_a を決定し入力トルク T_h をモータで補助している。なお、 T_d は外乱トルクである。それに対し、図3に示す提案手法は左右輪への入力トルク T_r 、 T_l からユーザの考える目標位置を推定し、その目標位置への軌道に追従するような前進速度 V と姿勢角速度 ω を出力する自動走行制御である。ファジィ推論による目標位置推定については3章、仮想インピーダンス制御及び追従制御を用いた車いすの走行制御については4章で解説する。

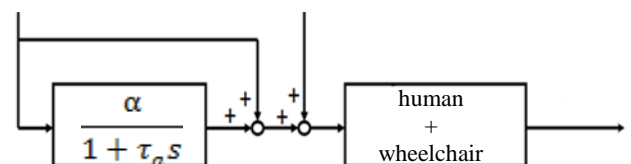


Fig.2 Conventional driving control system

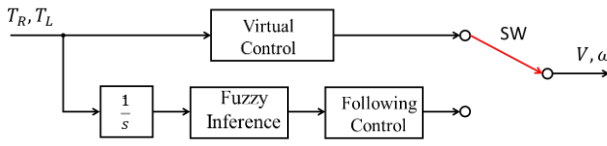


Fig.3 Target position estimation type driving control

$$w = \frac{\sum_{r=1}^m w_r S_r}{\sum_{r=1}^m S_r} \quad (1)$$

3. ファジィ推論による目標位置の推定
3.1 走行目標の基準位置

1 漕ぎで進む距離はユーザによって様々だが，ここでは図4に示すように奥行き 3.0m，横幅 2.8m のエリアで目標位置基準点を設定した．また，各基準点は初期位置からの距離が 3.0m 未満となるように配置されている．これは一般的な人の歩行速度が 5.0km/h を基準とし，その歩行者と車いすが並走したときと同等の力で車いすが1漕ぎしたときに進む距離が約 3.0m であったためである．この9点の基準位置は代表点であり，この9点へ漕いだときの入力トルク情報を使って車いすに事前学習を行い，エリア内のどの位置へ走行したいのかを推定する．

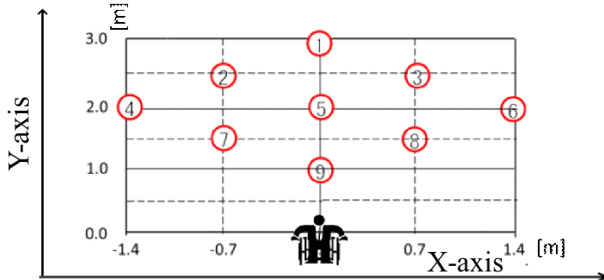


Fig.4 Target position

3.2 ファジィ推論を用いた目標位置推定

ファジィ推論とは人間の主観的感覚である「曖昧さ」を数量的に扱わせるための手法である．また，事前学習を図5に示すような IF-THEN 形式のファジィルールで表現することで人間の感覚的特性を反映させやすい特徴を持っている．更に，ニューラルネットと比べて学習内容を人が見て容易に理解できるため，事前学習後の簡単な補正も可能である．本研究では，左右のトルクの積分値の和と差の情報を「とても弱い(SS)，やや弱い(S)，普通(M)，やや強い(B)，とても強い(BB)」の5つのグレード値によって評価を行う．この演算を行うメンバシップ関数には図6に示すようなII型関数を使用した．

目標位置はX座標とY座標で表し，ファジィルールは「トルク和がBBかつトルク差がMならば，X座標はMかつY座標はBB」のような2段のファジィルールとする．従って，事前学習で作成されるファジィルール数の合計は25パターンとなる．ただし，ファジィルール内でもメンバシップ関数と同様にSS, S, M, B, BBを用いるがX座標のファジィルールでは(-1.4, -0.7, 0.0, 0.7, 1.4 [m])，Y座標のファジィルールでは(1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0 [m])のように異なる重みをもっている．

メンバシップ関数によって得られたグレード値からファジィルールに従って1つの値を確定させる演算を非ファジィ化という．その演算手法はいくつかあるが，今回は代数積-加算-重心法^[4]を採用した．これは，グレード値の積から各ルールに対応する適合度を求め，その和を推定値とする手法である．ここでは，トルク和とトルク差のグレード値の積に対応するルールの適合度 S_r ，ルールで定められた値を重心 w_r とすると式(1)によって全体の重心 w を求めることができ，これが推定結果となる．

diff \ sum	SS	S	M	B	BB
SS	M	S	SS	SS	SS
S	M	M	S	S	S
M	B	M	M	S	M
B	B	M	M	M	M
BB	B	B	B	B	BB

X coordinate fuzzy rule

diff \ sum	SS	S	M	B	BB
SS	SS	S	M	M	B
S	SS	S	B	B	BB
M	M	S	M	M	BB
B	S	M	M	B	BB
BB	S	M	B	B	M

Y coordinate fuzzy rule

Fig.5 Example of fuzzy rules

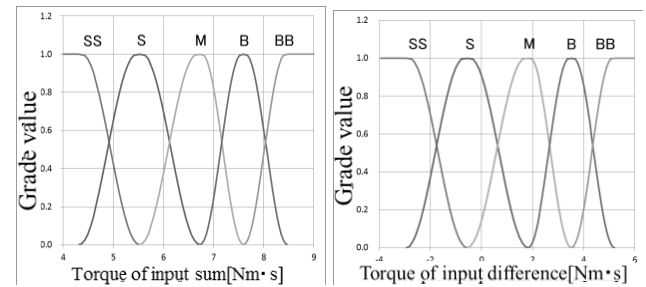


Fig.6 Membership function

3.3 学習データの補正

図7に示すように各目標地点へ走行しようとしたときの学習データが基準点[4, 7]，[5, 9]のように接近している点が現れるケースがある．そうなったとき意思通りの推定を行うことが難しくなる．そこで図8のように距離を離す補正を加え学習データに反映させることで意思通りの推定を容易にするかつ，操作訓練にも適用させることで操作性の精度向上を目指す．

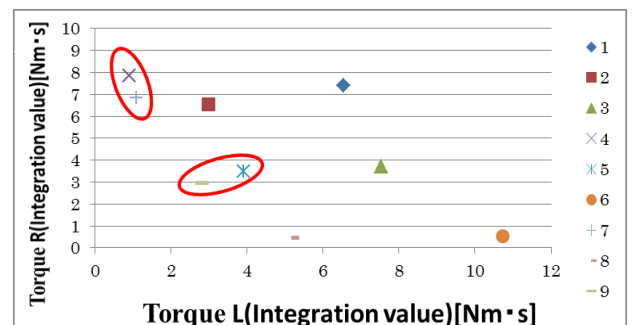


Fig.7 Learning data of subject (before revision)

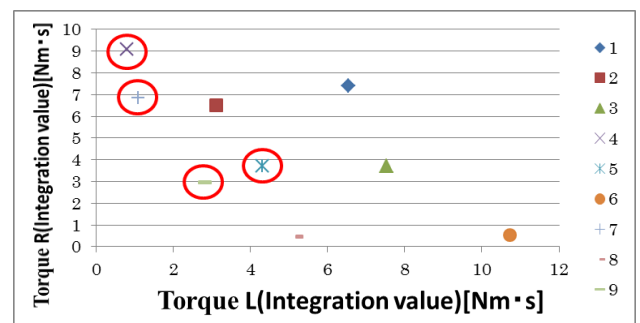


Fig.8 Learning data of subject (after revision)

前述の補正を行う際、まず全ての目標位置基準点への学習データの2点間距離を算出する。その後被験者に応じたしきい値を設定、2点間距離が設定したしきい値よりも接近している場合、最低でもそのしきい値よりも離れるように2点間の直線上で距離を離していく。ステップを有限で設け（本論文では15～30ステップ）1ステップで離れる距離はX座標に依存させ、本研究では0.1とした。理想的であるのは、より小さな値で離していくことだが、人の意思で操作できる範囲でないかと判断したため0.1を採用した。

4. 目標位置への速度・姿勢制御

4.1 制御概要

車いすの走行制御は、漕いでいる状態 (STATE1) と漕ぎ終わり惰性で進んでいる状態 (STATE2) に分けて行う。STATE1 ではファジィ推論のための情報収集を行い、STATE2 では得られた推定結果からの走行軌道生成と追従制御^[5]を行う。

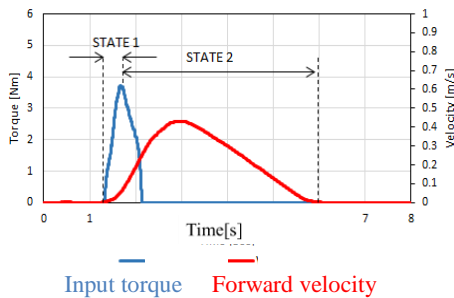


Fig.9 Driving state switching

4.2 STATE1 : 仮想インピーダンス制御

漕いでいる間は目標位置の推定ができないので、その間だけ入力トルクから速度指令を出力しなければならない。ここで用いる仮想インピーダンス制御とは車いす走行時の粘性抵抗と慣性抵抗を仮想的に設定し、式(2)に示すように左右の入力トルク T_R, T_L から左右の指令速度 V_R, V_L を算出、そして、その指令速度に追従させる制御手法である。ただし、 B, M はそれぞれ仮想粘性係数、仮想慣性係数である。

$$V_{R,L} = \frac{1}{Ms + B} T_{R,L} \quad (2)$$

4.3 STATE2 : 追従制御

図10に示すように初期位置から推定された目標位置への直線上を走行経路とし、その経路に追従する制御を行う。走行する際の速度制御は、初めはSTATE2へ切り替わったときの一定速で走行、次に推定位置までの距離が1.5m以内になると三次関数で減速、推定位置へ接近(本論文では半径30cm以内)したら一定速度で減速し停止するようにした。車いすの姿勢角度は式(3)に従って、その直線との姿勢角度誤差 $\Delta\theta$ 、距離誤差 Δd 、姿勢角速度 ω の和からなる修正量 $\Delta\omega$ によって姿勢角度 θ を補正する。ただし、 $K_{\Delta\theta}, K_{\Delta\omega}, K_{\Delta d}$ は各値の比を決めるゲイン係数である。各ゲイン係数は車いすが直線に乗るまでの軌道、乗り心地を考慮して試行錯誤的に決定した。

$$\Delta\omega(t) = -[K_{\Delta\theta} \Delta\theta(t) + K_{\Delta d} \Delta d(t) + K_{\Delta\omega} \omega(t)] \quad (3)$$

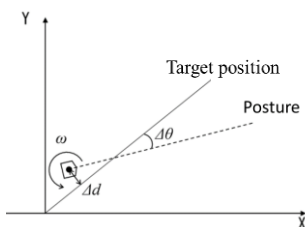


Fig.10 Following trajectory

5. 実験検証の概要

5.1 実験装置

本研究では車いす本体に、ヤマハ発動機株式会社の車いす補助ユニット JW-II を取り付けしたものを使用した。実験機の構成を図11に示す。ハンドリムには入力トルクを測定するトルクセンサ、車輪の回転軸には回転角度を測定するロータリエンコーダを取り付けている。さらに、ART-Linux を搭載したコンピュータを接続し、各所に取り付けたセンサからの情報の処理をリアルタイムに行って左右輪のモータを制御する。

実験は半身麻痺の障害者を想定し、被験者の腕に疑似半身麻痺体験スーツ(図12)を装着して肘や手首に力が入りにくいようにした。

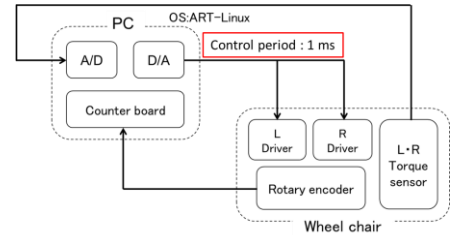


Fig.11 Structural view of experimental apparatus

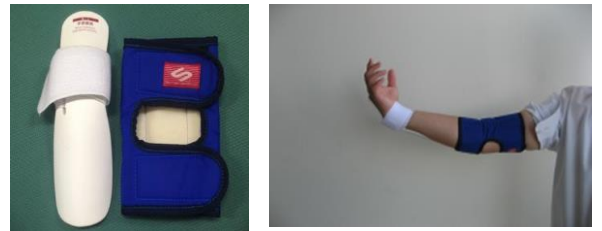


Fig.12 Virtual pseudo hemiplegia suit

5.2 事前学習

初めに、被験者Aには左半身麻痺患者を想定して各基準位置へ1漕ぎで向ってもらう。そのときの左右輪への入力トルクの和と差の積分値を記録する。これを各点で3回ずつ行ってその平均値を学習用データとし、メンバー関数とファジィルールを設計する。その後補正する必要がある場合は補正を行う。ただし、走行路面は外乱のない平坦路面とする。

5.3 検証

本論文の検証では、視覚フィードバックによる訓練システムとファジィ推論を用いた走行制御の提案手法の有用性、並びに学習データの補正の有用性双方についての検証を行う。

検証の流れは以下となる。

- ① 片半身麻痺模擬装置を着け一次遅れ系制御での車いすで9点の各目標位置まで3回漕ぎ、学習データを収集する。
- ② ①より得られた学習データの左右トルクを参照し、ファジィルールを作成する。(補正を行う場合はこの過程で行う)
- ③ 作成したファジィルールを使用し、ファジィ制御での車いすで9点の各目標位置まで3回漕ぎ、結果を記録する。
- ④ シミュレータにファジィルールを入力し、シミュレータの画面上で9点の各目標位置まで10回操作訓練を行う。
- ⑤ 訓練結果を検証するため③の実験を再び行う。1日目、4日目、7日目に③の測定を行い、2, 3, 5, 6日はシミュレータでの訓練のみを行う。

また、今回の実験で被験者は、学習データの補正を行うA, B, Cの3人と補正を行わないD, E, Fの3人の計6人の被験者を設定する。

6. 視覚フィードバックによる操作訓練システムの検証

6.1 操作訓練システムの構成

操作訓練システムにおいて、車いすから得たトルク情報は NI 製の cRIO-9030 (図 13) の AD ポートを用いて取得し、LABVIEW 上で構成されたブロックダイアグラムによって目標位置の推定等の演算を行う。また、LABVIEW 内のフロントパネル (図 14) に推定軌道を表示することで、ユーザへ視覚フィードバックを行う。これにより、ユーザは漕ぐ力の加減調整を行いながら推定位置をリアルタイムで確認しながら操作訓練することが出来るので操作の習熟を図る。



Fig.13 cRIO-9030

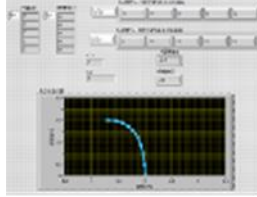


Fig.14 Front panel

6.2 検証

図 15 のように、車いすの車輪を床から少し浮かせて被験者が画面を見ながら漕げる環境で検証を行う。



Fig.15 Appearance of training

本論文に記載する代表として被験者 D (補正無し) における訓練前と訓練 7 日目の走行結果を図 16 に示し、被験者 A (補正有り) における訓練前と訓練 7 日目の走行結果を図 17 に示す。

左半身麻痺患者を模擬したことから、訓練前は右側の基準位置に向かって漕いだ場合に推定結果が不安定である。到達位置の図を見ると、被験者 D は訓練を行う前の各目標位置までの到達精度は低く、走行が困難である点があることがわかる。一方補正を行った被験者 A は若干の誤差はあるが訓練を行う前から各目標位置まで比較的到達できていることが分かる。

また、7 日目においては、誤差は少し残りつつも各基準位置へ被験者 A, D とともに走行精度が上がっている。それに加え補正ありの被験者 D の方が 1 日目、4 日目、7 日目を通して走行精度が高かった。

被験者 A, B, C (補正有り), 被験者 D, E, F (補正無し) それぞれ 2 グループの走行結果と目標位置との平均の誤差を図 18 に示す。このグラフから 1 日目の測定の段階で補正有りとなしで比較した場合約 12cm 補正有りの場合の方が誤差が少なかった。また 4 日目、7 日目においても同様の結果が得られた。

以上から提案した視覚型フィードバックによる訓練と学習データの補正による走行制御は有用であると結論づけた。

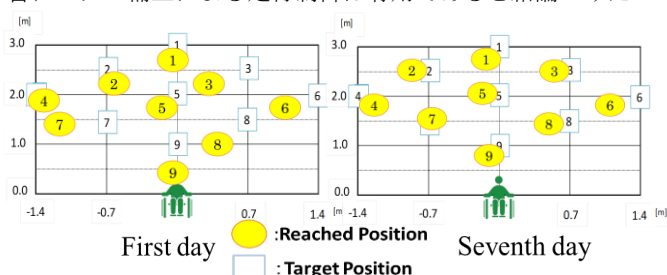


Fig.16 Stop position before and after of training (without revision)

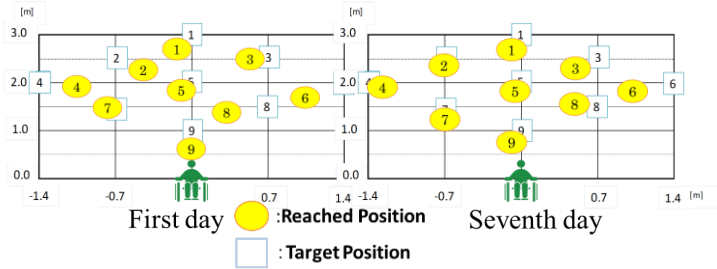


Fig.17 Stop position before and after of training (with revision)

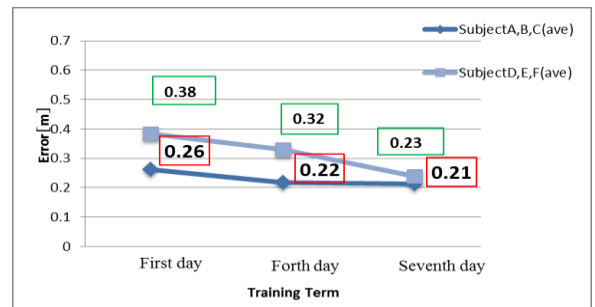


Fig.18 Transition of stop position error

7. まとめと今後の課題

本論文では「車いすにユーザ特性を学習させること」と「ユーザが車いすの訓練を行い習熟度を高めること」によりユーザと車いすの双方が互いに歩み寄ることを目的に 2 つの検証を行った。今後は更なる操作性の向上を目指し、7 日以降も訓練を続けたときのデータ収集やそれを基にした新たな訓練システムについても着手していきたい。本研究では、電動アシスト車いすにファジィ制御を用い、片半身麻痺の障害を持つ搭乗者がいかに負担を掛けずに意思通りの走行を行えるかを目的とした。今回は 4 回の操作訓練、3 回の走行実験を行ったが、訓練を行うにつれ、徐々に搭乗者の意思通りの走行へ近づくことが出来た、また、学習データの左右操作トルク量の補正を行うことで訓練を行う前から結果は見られた。以上のことから片半身麻痺の障害をもつ搭乗者の意思通りの走行に近づくことが出来た。

今回の実験で行った学習データの補正により訓練を行う前から成果は見られたので、これにより操作訓練の日数や回数を減らすことが出来れば、搭乗者の負担を軽減することにつながる。また、シミュレータの改良や制御誤差の減少により目標位置への到達精度をより向上させることが目標である。

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] 若林 佑一, 関 弘和, 他 : ユーザ特性を考慮した電動アシスト車いすのファジィ推論型走行制御; 電気学会次世代産業システム研究会, IIS-14-034, 2014.
- [4] 山下 元, 瀧澤 武信 : ファジィ理論 基礎と応用; 共立出版, pp. 1-41, 2011.
- [5] 日本機械学会: ロボティクス; 丸善出版, pp. 32-39, 2012.