

電動アシスト車いすの走行精度および操作安定性向上のための ファジィ推論型走行制御

倉本 達矢^{*1} 関 弘和^{*1}

Fuzzy Inference Type Driving Control for

Improvement of Driving Precision and Operation Stability of Power-Assisted Wheelchair

Tatsuya Kuramoto^{*1}, Hirokazu Seki^{*1}

Abstract - 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 fuzzy inference type driving control system with the estimation of the desired driving target position from the right and left pushing torque an operation training system by visual feedback to improve the driving precision and operation stability. In addition, the user's body weight is applied to the driving control parameter design. 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, driving precision, operation stability

1. 諸言

日本の高齢者人口(65 歳以上)^[1]は年々増加し続け、2016 年で 3461 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 27.3%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 2035 年には約 33.4%となり、将来的には日本人の 3 人に 1 人が高齢者になると見込まれている。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・制御方法

2.1 概要

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。そのため事故や病(頸椎損傷や脳梗塞の後

遺症など)によって半身麻痺の障害を持ってしまった場合や、高齢化による筋力低下で漕ぎ力が左右非対称となってしまう搭乗者には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(漕ぎ方のくせや体重)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・検証を行う。



図 1 電動アシスト車いす

Fig.1 Power-assisted wheelchair

2.2 制御方法

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

^{*1}: 千葉工業大学大学院 工学研究科 電気電子情報工学専攻
^{*1}: Electrical, Electronics and Computer Engineering, Graduate School of Engineering, Chiba Institute of Technology

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 章で説明する。

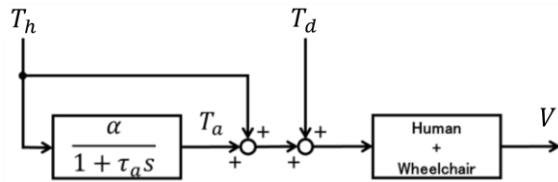


図 2 従来型走行制御

Fig.2 Conventional driving control system

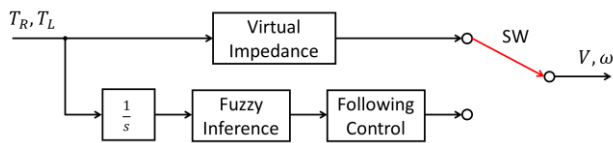


図 3 軌道推定型走行制御

Fig.3 Trajectory estimation type driving control

3. ファジィ推論による目標位置の推定

3.1 走行における目標位置の決定

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 3.0 m，横幅 2.8 m 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 3.0 m 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 4.5 km/h を基準とし，その速度を実現するために同等の力で車いすが 1 漕ぎしたときに進む距離が約 3.0 m 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．またこれらの基準点は国土交通省出典の建築設計標準^[4]，並びに使用した電動アシスト車いすの規格を基に設定した．

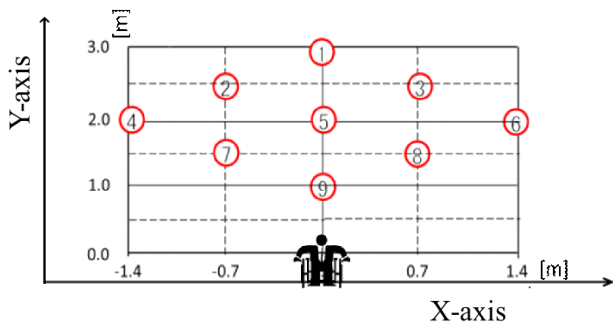


図 4 目標位置基準点

Fig.4 Target position

3.2 ファジィ推論による目標位置推定

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 Π 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．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, 0.7, 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^[5]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を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(1)式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．

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

Sum Dif	SS	S	M	B	BB	Sum Dif	SS	S	M	B	BB
SS	S	S	SS	SS	SS	SS	S	S	M	M	M
S	M	M	S	S	S	S	SS	SS	S	B	B
M	M	M	M	M	M	M	SS	M	M	M	BB
B	B	B	M	B	M	B	S	S	M	B	BB
BB	B	B	BB	B	B	BB	S	S	M	B	B

(a) X coordinate fuzzy rule

(b) Y coordinate fuzzy rule

図 5 ファジィルールの例

Fig.5 Example of fuzzy rules

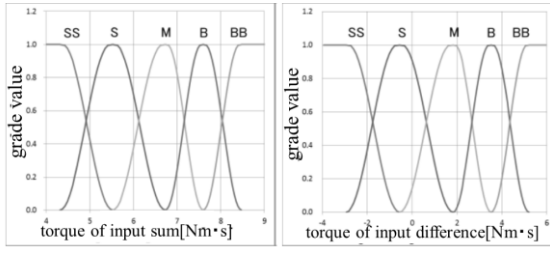


図6 メンバシップ関数

Fig.6 Membership function

上述したファジィルール設計の際、搭乗者のデータによっては自動的に設計できない部分が生じる可能性がある。そこでその該当箇所を主観的に決定しルールを設計した。

3.3 トルク量参照値の補正

3.2 節に示したように搭乗者の学習データはトルク量の積分値の和と差を基にしている。そして図7に示すのは各目標位置基準点へ走行しようとしたときの学習データの例である。しかし基準点[4と7]、[5と8]のように接近している点が現れるケースがある。そうなったとき搭乗者の意思通りの推定を行うことが難しくなる。特に操作の習熟度が低い場合にはその傾向が顕著になる。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^[5]。そうすることによりそれぞれの基準点への学習データの区別化を強めることができ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に繋がると考えた^[6]。

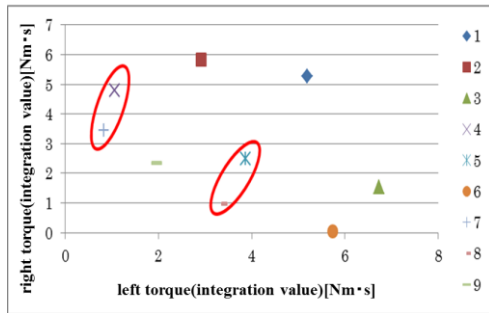


図7 操作トルクの参照値データ(補正前)

Fig.7 Reference data of pushing torque (before revision)

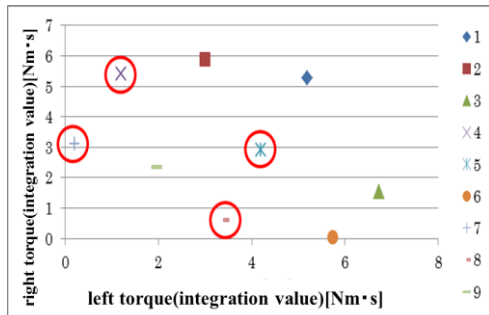


図8 操作トルクの参照値データ(補正後)

Fig.8 Reference data of pushing torque (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。その後しきい値を設定し、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。離していく距離は本論文では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判断したため0.1を採用した。

4. 推定目標位置への速度・姿勢制御

4.1 走行制御概要

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^[7]を行う。

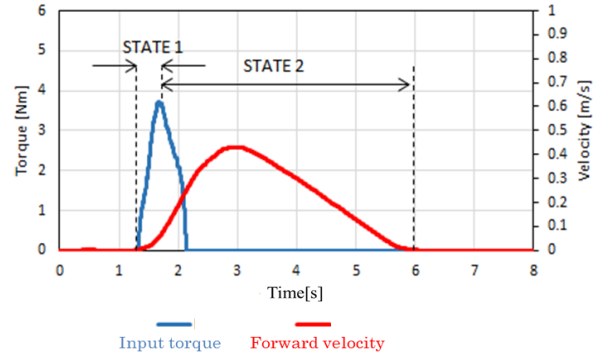


図9 走行制御の状態の切替

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ため、その間だけ入力トルクから指令速度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、左右の入力トルク T_R , T_L からそれぞれ水平方向の動力 F_R , F_L を導出。その後(2)式に示すように左右の指令速度 V_R , V_L を導出し、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。

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

従来手法では仮想インピーダンス制御に使用している B , M は実験的に導出し、搭乗者毎に差異はなく一律な数値を使用していた。しかし研究活動の中でその仮想的な重みが搭乗者毎に必ずしも最適でないことが判明した。それは主に B , M の値が体重の軽い搭乗者には重く感じ、体重の重い搭乗者には軽く感じるといったことから考察した。詳細については5章で示す。

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(3)式に従って、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、 $K_{\Delta\theta}$ 、 $K_{\Delta d}$ 、 $K_{\Delta\omega}$ 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。

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

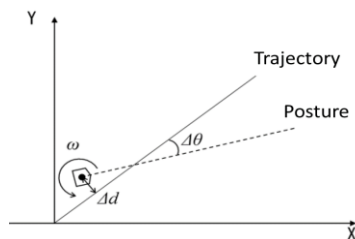


図 10 軌道追従制御

Fig.10 Trajectory following control

5. 体重別パラメータマップ

5.1 概要

4.2 節で示したように搭乗者ごとの体重差に起因して車輪の重さの感じ方が違うと推測したため、実験的に分析を行い体重に応じた B 、 M を近似的に導出した。それによって体重別に車輪の重さを設定することに繋がり、実際に漕いでいる感覚に近づけることが可能ではないかと考えた。

また半身麻痺患者のように左右のトルク量に差がある搭乗者においては M の左右の値に差を加えることで麻痺による走行軌跡のぶれを抑え安定した走行の実現を目的とした。

5.2 仮想慣性係数、粘性係数の分析

体重別の B 、 M を導出するために (43, 50, 60, 70, 80, 90 [kg]) の体重をもつ搭乗者からデータを抽出した。

検証方法は以下で行った。

- ① 全搭乗者が直進方向 3.0 [m] の地点まで走行したときのトルク量(積分値)、トルク入力時間を測定。
- ② 図 11 のようにトルク量を最小二乗法によって近似。
- ③ ①、②から得られたデータのトルク量、トルク入力時間を基にそれに一致する B と M を実験的に検証し導出。
- ④ パラメータも体重に応じて一次関数的な変化であることが読み取れたため近似してパラメータマップを作成。検証方法は車輪を浮かせ仮想的に負荷を加えることによって路面を再現し行った。

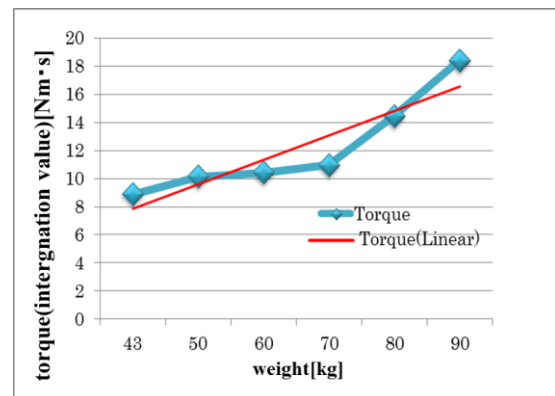


図 11 体重別トルク量

Fig.11 Torque integration value per weight

5.3 体重別パラメータの適用

上記の内容で設計したパラメータマップを適用し制御に用いる。パラメータマップに準じ体重を入力すれば自動的に応じた値が設定されるものとなっている。これにより体重に応じた値が設定されるので個人ごとに違和感のない走行制御、操作訓練が可能となる。

また半身麻痺患者のように左右のトルク量に差がある搭乗者においては左右の M の値をトルク量の左右比を基準に増減させ安定した走行の補助を試みた。検証結果については 8 章に示す。

6. 実験装置の概要

本論文では車いす本体に、ヤマハ発動機株式会社の車いす補助ユニット JW-II を取り付けたものを使用した。実験機の構成を図 12 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 13)を装着して肘や手首に力が入りにくいようにした。

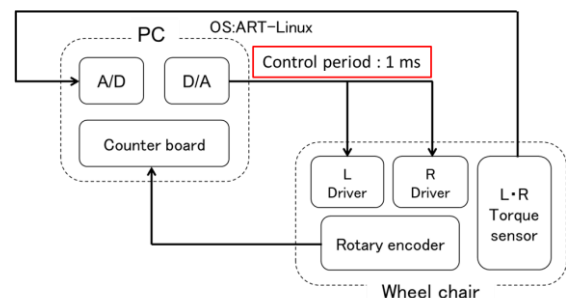


図 12 実験機の構成

Fig.12 Structural view of experimental apparatus

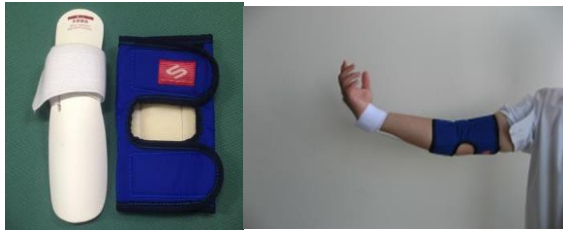


図 13 疑似半身麻痺体験スーツ
Fig.13 Virtual pseudo hemiplegia suit

7. 視覚フィードバックによる操作訓練システム

7.1 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 製のリアルタイムコントローラ(図 14)の AD ボードを用いて取得し、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 15)に推定軌道を表示することで、搭乗者へ視覚フィードバックを行う。これにより、搭乗者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ができるため習熟度が高まり、操作安定性の向上に繋がる。



図 14 コントローラ
Fig.14 Controller

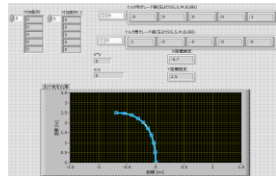


図 15 フロントパネル
Fig.15 Front panel

7.2 訓練概要

図 16 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訓練を行う。



図 16 操作訓練の様子
Fig.16 Appearance of training

8. 事前学習と実験検証概要

8.1 事前学習

はじめに、全被験者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積分値の和と差を記録する。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、メンバーシップ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。体重別パラメータの適用はファジィルール設計後に行う。

8.2 検証概要

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、トルク量参照値の補正の有用性、並びに体重別パラメータマップの有用性を検証することが目的である。

検証の流れは以下となる。検証スケジュールを図 17 に示す。

- ① 疑似半身麻痺体験スーツ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。
- ② ①より得られた学習データの左右トルク量を参照し、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、ファジィ制御適用の車いすで 9 点の各目標位置まで 3 回漕ぎ、結果を記録する。(体重別パラメータの適用はこの過程で行う)
- 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の④を行う。

また、検証においての被験者は、ファジィ制御のみを適用した被験者 A, B, C, ファジィ制御+トルク量参照値の補正を適用した被験者 D, E, F, ファジィ制御+トルク量参照値の補正+体重別パラメータ適用の被験者 G の計 7 人の被験者を設定した。

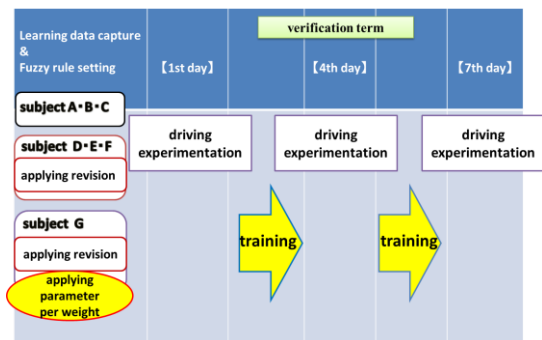


図 17 操作訓練スケジュール
Fig.17 Operation training schedule

8.3 検証結果

全被験者の検証結果として本論文では距離誤差(目標地点と走行到達地点)を使用し評価を行った。各被験者グループ毎の結果を図 18、表 1 に示した。全被験者共通の結果の傾向として測定日 1 日目と 7 日目で比較したとき距離誤差が減少した。それにより走行制御、操作訓練システムの有用性が示せた。またトルク量参照値の補正、体重別パラメータを適用した場合距離誤差がさらに減少傾向に向かったため各提案手法の効果が結果に現れた。

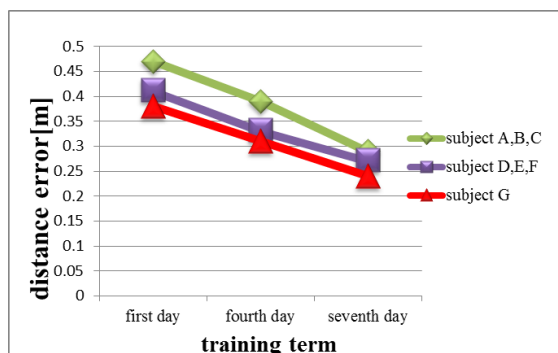


図 18 距離誤差の検証結果

Fig.18 Verification result of distance error

表 1 距離誤差の検証結果

Table 1 Verification result of distance error

distance error[m]			
subject A,B,C	first day	fourth day	seventh day
average	0.47	0.39	0.29
subject D,E,F	first day	fourth day	seventh day
average	0.41	0.33	0.27
subject G	first day	fourth day	seventh day
	0.38	0.31	0.24

9. ファジィルール最適化

ところで、3.2 節のファジィルール設計であるが、図 19 のように重心法のみでは決定できない部分が出てくるケースがある。このような場合従来までは空欄箇所を主観的に決定していたが、作り手によって変化が生まれてしまうことが懸念される。そこで設計方法を最適化するために空欄箇所と隣接する成分を分解し最も大きな重みをもつグレード値を採用するといった手法を提案した。これにより作り手によって左右されないルール設計が可能となるため、今後の検証でその有用性を確かめる。

Sum Dif	SS	S	M	B	BB
SS	S	S	SS	SS	SS
S	M	M	?	S	S
M	M	?	M	M	M
B	B	?	M	B	?
BB	B	B	BB	?	B

(a) X coordinate fuzzy rule

Sum Dif	SS	S	M	B	BB
SS	S	S	M	M	M
S	SS	SS	?	B	B
M	SS	?	M	M	BB
B	S	?	M	B	?
BB	S	S	M	?	B

(b) Y coordinate fuzzy rule

図 19 ファジィルールの例

Fig.19 Example of fuzzy rules

10. まとめと今後の課題

本論文では「車いすに搭乗者の特性を学習させること」と「搭乗者が車いすの訓練を行い習熟度を高めること」により搭乗者と車いすの双方が互いに歩み寄ることを目的とした。今後は更なる操作性の向上を目指し、搭乗者の訓練の質を向上させる新たなシステムについても着手

していききたい。本論文では、電動アシスト車いすにファジィ制御を用い、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できた。また、トルク量参照値の補正、体重別パラメータ適用を行うことで全体的な距離誤差の減少のみならず走行訓練を行う前から走行制度向上の効果が見られた。以上のことから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でき、それぞれの有用性が示せた。今回の検証で訓練を行う前から成果は見られたため、これにより操作訓練の日数や回数を減らすことができれば、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走行精度をより向上させることが目標である。

謝辞

本論文の作成にあたり、訓練システムの構築にご協力頂いた先輩の若林佑一氏、そして被験者として協力して頂いた関係者各位に謝意を表す。本研究は、JSPS 科研費（課題番号 JP16K06426：基盤研究（C））の助成を受けて行われたことを記するとともに、関係者各位に謝意を表す。

参考文献

- [1] 総務省統計局：高齢者の人口 (2016).
<http://www.stat.go.jp/data/topics/topi971.htm>
- [2] 内山，福井：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，関，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] 国土交通省：高齢者、障害者等の円滑な移動等に配慮した建築設計標準 (2012).
[http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/barrier-free.files/guideline12.pdf](http://www.mlit.go.jp/jutakukentiku/build/barrier-free/files/guideline12.pdf)
- [5] 山下，瀧澤：ファジィ理論 基礎と応用，共立出版，pp.1-41 (2011).
- [6] 倉本，関：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：LIFE2016，3P1-C03 (2016).
- [7] 日本機械学会：ロボティクス；丸善出版 (2012).