

操作者の意思を考慮したファジィ推論による電動車いすの
障害物回避制御

Obstacle Avoidance Control of Electric Powered Wheelchair by Fuzzy Inference
Considering Driver's Intention

○ 木曾 淳 (千葉工業大学) 村上博紀 (吉野工業所) 関 弘和 (千葉工業大学)
Atsushi KISO, Chiba Institute of Technology Hiroki MURAKAMI, Yoshinokogyosho Corp
Hirokazu SEKI, Chiba Institute of Technology

Abstract: This paper describes a novel obstacle avoidance control scheme of electric powered wheelchairs for realizing the safe driving in various environments. The "electric powered wheelchair" which generates the driving force by electric motors is expected to be widely used as a mobility support system for elderly people and disabled people; however, the driving performance must be further improved because the number of driving accidents caused by elderly operator's narrow sight and joystick operation errors is increasing. This paper proposes a novel obstacle avoidance control scheme based on fuzzy algorithm to prevent driving accidents. The proposed control system determines the driving direction by fuzzy algorithm based on the information of the joystick operation and distance to obstacles measured by ultrasonic sensors. Fuzzy rules to determine the driving direction are designed surely to avoid passers-by and walls considering the human's intent and driving environments.

Key Words: electric powered wheelchair, ultrasonic sensor, obstacle avoidance control, driving risk, fuzzy algorithm

1. はじめに

電動車いすは、搭乗者の手元にあるジョイスティック操作入力に基づき、走行速度や方向に関する意思を読み取り、左右輪の電気モータにより走行を行う移動支援機器であり、高齢者や障害者にとって行動範囲を広げるものとして広く使用されている。特に少子高齢化が進む今日では、その重要性も高まっている。

このような背景に基づき、電動車いすの多機能化、高性能化に関する研究も盛んに行われてきている^{(1)~(3)}。特にモータ駆動制御技術により使用者である人間へのより良い支援を目指した様々な取り組みが行われており、少子高齢化を迎えた現代社会において重要な支援技術となっている。

電動車いすにおいて重視すべき要素の一つとして操作性が挙げられる。電動車いすの需要は年々増加しているが、高齢者は視界が狭いことや、ジョイスティック操作のミスにより、人混みや曲がり角での接触事故も増加してきている。警察庁調べによる全国の電動車いすの事故発生件数は、平成20年が232件であり、平成10年と比較すると100件近く増加している。特に人混みや曲がり角では細かなジョイスティック操作が必要であり、高齢者にとっては操作が難しいと想像できる。本論文は、このようなことを考慮した上で、歩道や病院内の通路など様々な状況や走行環境に対して、操作者の意志を反映しつつも障害物を回避しながら走行するための制御手法を提案し、実験的な検討を行う。

2. ファジィアルゴリズムによる障害物回避走行制御法

2-1 ファジィアルゴリズムの適用

電動車いすの障害物回避制御を設計する上では、操作者がどのように走行したいのかを示すジョイスティック操作入力情報と、障害物を安全に回避するために必要な障害物との距離、車いすの速度情報などに注目することが重要である。そこで本研究では、上記のような重要な情報に基づき、以下に述べるような超音波センサによる距離測定に基づくファジィアルゴリズムを用いた走行制御法を提案する。

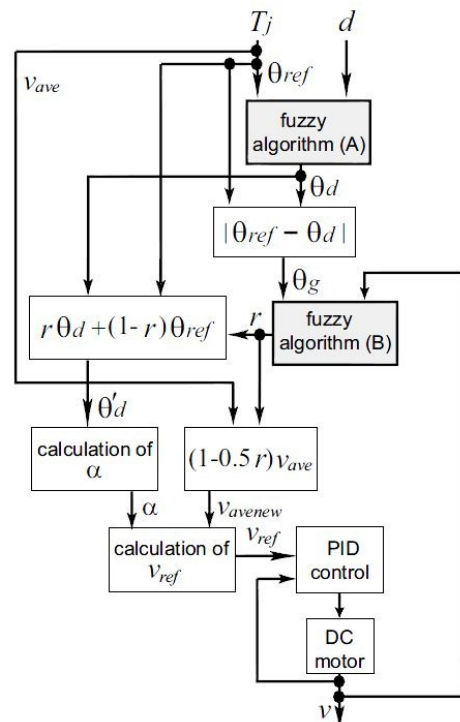


Fig. 1. Proposed fuzzy algorithm based driving control system.

距離センサによる自動走行ロボットの研究は数多く報告されているが⁽⁴⁾、本研究は操作者の意思の考慮という新たな側面も必要となる。また制御手法については、学習機能により回避支援の程度を調整する手法なども提案されているが⁽⁵⁾、本研究は操作者の意志に合った自然な車いすの挙動や走行環境への対応を定性的にルールとして設計が可能であることから、ファジィアルゴリズムを用いた走行制御法を提案する。Fig.1に走行制御システムを示す。

2-2 目標走行方向の推定

ジョイスティック操作に関しては、スティックを倒した方向とその大きさの二つの情報が存在し、それぞれ走行方

向と走行速度に関する操作者の意思が含まれている．そこで， $T_j = (\theta_{ref}, v_{ave})$ と表現し， θ_{ref} はジョイスティックを倒した方向，つまり操作者が望む走行方向を示す「操作指令方向」， v_{ave} はジョイスティックを倒した角度から得られる車いす左右輪の平均指令速度とする．ここで，操作者がどの方向に進みたいのかを示すジョイスティック指令 θ_{ref} と，超音波センサによって計測された車いすと障害物との距離 d をもとに，障害物を回避するための車いすの暫定的な走行指令方向 θ_d をファジィ推論(A)によって決定する． θ_d を「ファジィ指令方向」と呼ぶこととする．

2-3 走行危険度の考慮

次に操作指令方向 θ_{ref} とファジィ指令方向 θ_d との差 θ_g と電動車いすの左右輪の平均速度 v をもとに走行危険度 r をファジィ推論(B)により決定する． θ_g はファジィ推論(A)による指令方向と操作者の行きたい方向とのズレを示す情報であり，このズレが大きいということは，操作者の行きたい方向に障害物があるために障害物を回避する方向を指示したということである．また，車いすの左右輪の平均速度 v は車いすの挙動を示す重要な情報であることから， θ_g と v をファジィ推論(B)の入力変数として用い，走行危険度 r を求める．これは今の走行がどれだけ危険なのかを示す値であり，電動車いすの走行方向を，操作者の意志による方向 θ_{ref} とファジィ推論(A)による方向 θ_d のどちらを優先するかを決める重要なパラメータである．「最終指令方向」である θ'_d の決定に際しては式(1)のように，走行危険度が大きいときにはファジィ指令方向 θ_d が重視され，また小さいときには操作指令方向 θ_{ref} を重視するようにして，操作者の意思を反映しつつ，衝突事故などの最悪の場合を回避するために危険度の大きいときは操作者の意思よりも環境情報を重視して走行させる．

$$\theta'_d = r\theta_d + (1-r)\theta_{ref} \quad (1)$$

さらに走行危険度に応じて指令速度を減少させることにより障害物を安全に回避できるようにする．「最終指令速度」である v_{avenew} は式(2)のように，走行危険度が大きくなるほどジョイスティックによる指令速度 v_{ave} より遅くなる．

$$v_{avenew} = r\theta_d + (1-0.5r)v_{ave} \quad (2)$$

走行方向と速度が変化することにより危険を操作者に知らせることができ，操作者に危険を回避するための操作を促すこともできる．

最終指令方向 θ'_d へ走行するために左右輪の速度を決定する左右輪の速度比 α を求め，最終指令速度 v_{avenew} と速度比 α から最終的な左右輪の指令速度 v_{ref} を式(3)(4)より計算する．そして，左右輪の実際の速度 v^r, v^l をもとにPID制御によって左右輪のモータへの指令値が決まる．

$$v_{ref}^r = \alpha * v_{avenew} \quad (3)$$

$$v_{ref}^l = (1-\alpha) * v_{avenew} \quad (4)$$

2-4 ファジィ制御系の設計

最初に，目標走行方向であるファジィ指令方向 θ_d を決定する「ファジィ推論(A)」を設計する．二つの入力情報であるジョイスティック指令 θ_{ref} と障害物との距離 d に対するファジィ変数の設計を行う．Fig.2(a)はジョイスティック指令 θ_{ref} に関する三角型ファジィ変数である． θ_{ref} の値に応じて0から1までのグレード値をとる五つの変数をそれぞれ LB(Left-Big), LM(Left-Middle), ZO(Zero), RM(Right-Middle), RB(Right-Big) とする．LB は操作者が

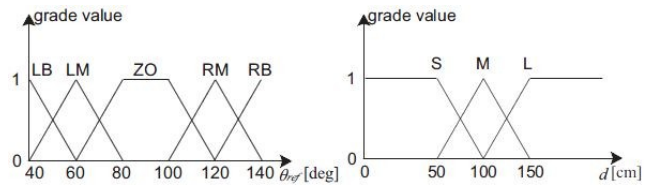


Fig. 2. Triangular fuzzy variables.

		joystick operation θ_{ref}						
		LB	LM	ZO	RM	RB		
sensor output d	sensor 1	s	S	RB	RB	RB	RB	
			M	RM	RM	RM		
			L	ZO	ZO			
		M	S	RB	RB	RB	RB	
			M	RM	RM	RM		
			L					
	sensor 2	s	S		LB	LB	LB	LB
			M			LM	LM	LM
			L				ZO	ZO
		M	S		LB	LB	LB	LB
			M			LM	LM	LM
			L					
sensor 3	s	S		LB	LB	LB	LB	
		M			LM	LM	LM	
		L						
	M	S		LB	LB	LB	LB	
		M			LM	LM	LM	
		L						
sensor 4	s	S		LB	LB	LB	LB	
		M			LM	LM	LM	
		L						
	M	S		LB	LB	LB	LB	
		M			LM	LM	LM	
		L						

Blank spaces show the cases which fuzzy control isn't applied.

Fig. 3. Fuzzy IF-THEN control rules.

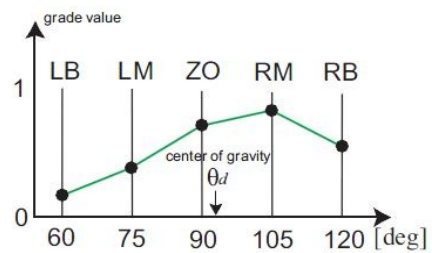


Fig. 4. Singleton-type fuzzy inference.

大きく左に旋回したいことを示す．また，Fig.2(b)は障害物との距離 d に関する三角型ファジィ変数であり，S(Short), M(Middle), L(Long) の各変数が0から1までのグレード値をとり，Sは障害物との距離が短いことを示す．設置するセンサの数をできるだけ少なくするために超音波センサはFig.5のように，センサ2と3を前進方向に，センサ1と4をそれぞれ前方斜め45[deg]の方向に向かって設置する．

Fig.3に θ_{ref} , d に応じて θ_d を決める IF-THEN 型ファジィルールを示す．ファジィ指定方向 θ_d については，LB(Left-Big), LM(Left-Middle), ZO(Zero), RM(Right-Middle), RB(Right-Big)のシンボルを用いる．Fig.5に各走行方向とファジィ変数を示す．なお，Fig.3の空欄の部分はファジィ制御をせず，ジョイスティック指令をそのまま最終指令方向とする．これは，空欄の部分では障害物との距離が長いから，人の意志を優先したためである．

最後に，MamdaniのMIN-MAX重心法⁽⁶⁾により θ_d を導く．ルールにより得られた五つのグレード値に対し Fig.4のような Singleton型を適用し，式(5)より θ_d を求める．

$$\theta_d = \frac{60 \times LB + 75 \times LM + 90 \times ZO + 105 \times RM + 120 \times RB}{LB + LM + ZO + RM + RB} \quad (5)$$

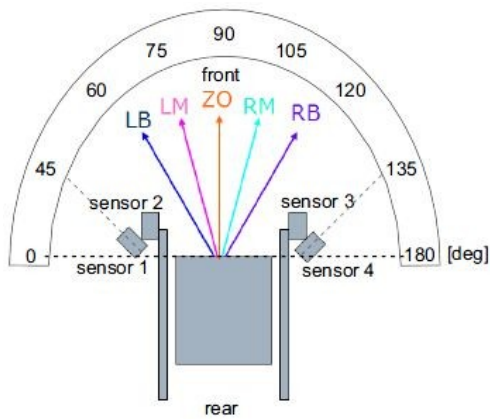
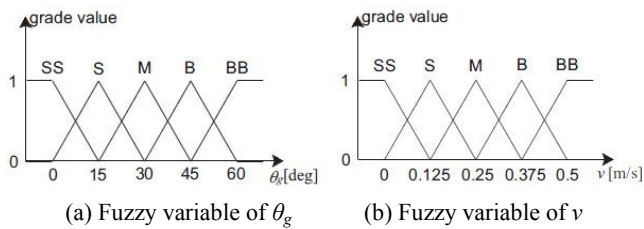


Fig. 5. Sensor assignment and fuzzy variables.



(a) Fuzzy variable of θ_g (b) Fuzzy variable of v

Fig. 6. Triangular fuzzy variables.

$\theta_g \setminus v$	SS	S	M	B	BB
SS	SS	SS	SS	SS	SS
S	SS	S	S	S	S
M	S	S	M	M	M
B	S	M	M	B	B
BB	M	B	B	BB	BB

Fig. 7. Fuzzy IF-THEN control rules.

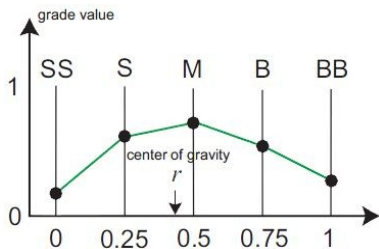


Fig. 8. Singleton-type fuzzy inference.

次に、走行危険度 r を決定する「ファジィ推論(B)」を設計する。二つの入力情報である操作指令方向とファジィ指令方向との差 θ_g 、車いすの左右輪の平均速度 v に対するファジィ変数の設計を行う。Fig.6(a)は操作指令方向とファジィ指令方向との差 θ_g に関する三角型ファジィ変数であり、SS(Small-Small)、S(Small)、M(Middle)、B(Big)、BB(Big-Big)の各変数が0から1までのグレード値をとり、SSは差が小さいことを示す。Fig.6(b)は車いすの左右輪の平均速度 v に関する三角型ファジィ変数であり、SS(Small-Small)、S(Small)、M(Middle)、B(Big)、BB(Big-Big)の各変数が0から1までのグレード値をとり、SSは車いすの速度が遅いことを示す。

Fig.7に θ_g 、 v に応じて走行危険度 r を決める IF-THEN 型ファジィルールを示す。走行危険度 r については、SS(Small-Small)、S(Small)、M(Middle)、B(Big)、BB(Big-Big)のシンボルを用いており、BBの場合は走行危険度が大きい、つまり障害物が近いにもかかわらず車いすの速度が速いなど今の走行が危険であるということを示している。

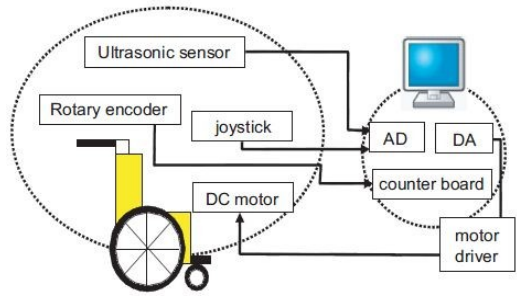


Fig. 9. Configuration of the experimental setup.



Fig. 10. Experimental setup.

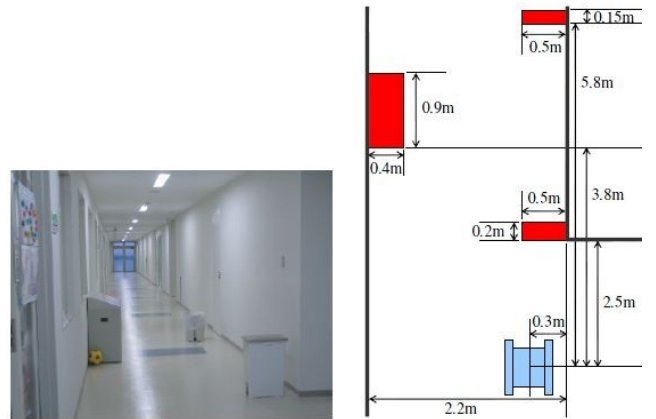


Fig. 11. Test course.

最後に、MamdaniのMIN-MAX重心法⁽⁶⁾により r を導く。ルールにより得られた五つのグレード値に対し Fig.8 のようなシングルトン型を適用し、式(6)より r を得る。

$$r = \frac{0 \times SS + 0.25 \times S + 0.5 \times M + 0.75 \times B + 1 \times BB}{SS + S + M + B + BB} \quad (6)$$

3. 実機による実験的検討

3-1 実験装置の概要

本実験で用いる電動車いすの実験機を Fig.9 と Fig.10 に示す。ヤマハ製 JW1 をベースに、ART-Linux を搭載した PC でリアルタイム制御を行う実験環境を構築した。左右輪に搭載された二つのロータリエンコーダによって回転角度を測定し、車いすの速度を計算する。そして、四つの超音波センサの信号とジョイスティックからの信号を PC に入力し、PCからはモータドライバへの指令信号が送られる。

3-2 直進路での障害物回避実験

Fig.10 の実機を用いた実験により、本手法の有効性を検討する。最初に、Fig.11 に示す三つの障害物がある直進路における障害物回避実験について示す。Fig.11 のような走行環境で操作者が操作を誤ると車いすが障害物に衝突してしまうと考えられる。なお、本実験ではジョイスティックの操作は前進方向 ($\theta_{ref} = 90[\text{deg}]$) に固定したままとする。

Fig.12 に本実験の走行軌道の結果を示す。ジョイスティック操作は前進方向一定であるにもかかわらず、障害物を

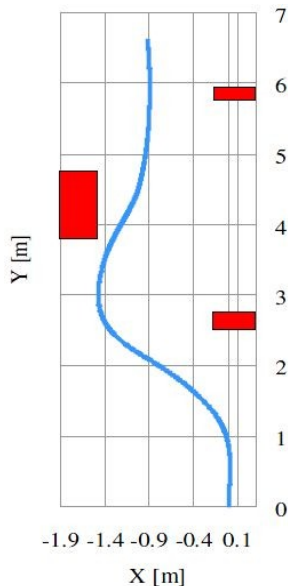


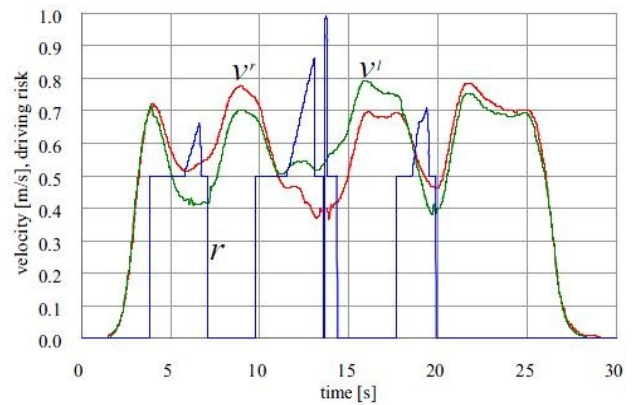
Fig. 12. Driving trajectory.

正確に回避できていることがわかる。また、Fig.13(a)に左右輪の速度 v と走行危険度 r の実験結果を示す。提案手法を用いたことにより障害物を回避するために左右輪の速度が適切に調整されている。そして障害物に応じて走行危険度が高い値になっており、走行危険度が高いときには左右輪の速度も調節されていることがわかる。Fig.13(b)には四つの超音波センサの出力を示す。障害物が近づいたときには超音波センサの出力は減少しており、Fig.13(a)と比較すればわかるように、障害物との距離が近いときは左右輪の速度が調整され走行危険度が高くなっていることがわかる。

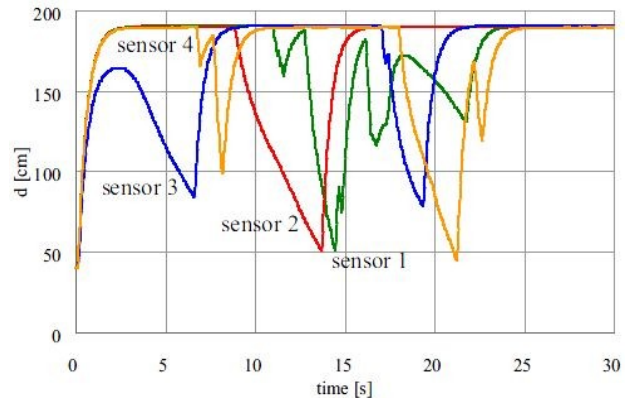
4. 考察

本論文は、ファジィ推論による電動車いすの障害物回避制御法を提案し、実機による実験的検討を行った。しかし、実際の使用場面を想定した上ではいくつかの課題が存在する。以下にそのような今後の課題、問題点等をまとめる。

- 今回はジョイスティック操作、障害物との距離、指令方向と走行方向の差、車いすの速度に注目しファジィアルゴリズムを設計したが、今後はこれら以外の情報にも目を向ける必要がある。操作者の操作の癖や外部状況から制御システムが自動的に直進や旋回、障害物などの走行状況や環境を判断してパラメータを可変的に調整することなども考えられる。これは様々な状況や環境における多くの実験的検討を通して明らかになるものと考えられ、今後の重要な課題となる。
- 本論文では走行危険度に応じて速度を変えているが、急に人が飛び出すなどの場合には急停止させるような動作も必要であると考えられる。さらに、走行危険度により人の意志と制御のどちらを優先させるかを決めているが、障害物を回避するために人の意志に反した走行をする場合もあり、これは速度変化も含め乗り心地に大きく関係することである。今後は乗り心地にも注目し、走行危険度に応じた速度変化の方法や人の意志と制御の優先の仕方を考え、操作者にとって違和感のない走行を実現することも重要な課題となる。
- 今回は設置する距離センサの数を最少にするためにFig.5のように配置したが、そのセンサの種類、配置方法や数は、例えば路面上の段差や溝なども検出して危険性に対応するなど様々な走行環境への考慮も必要となり、今後も検討が必要である。



(a) Velocities of the right and left wheels and driving risk.



(b) Ultrasonic sensor signals.

Fig. 13. Driving experimental results.

5. まとめ

本論文では、ジョイスティック操作、障害物との距離、車いすの速度等の情報に基づくファジィアルゴリズムによる電動車いすの障害物回避制御法を提案し、直進路において障害物を回避した安全な走行が実現できることを実験的検討により示した。今後は前章で述べたようないくつかの課題、さらに多くの状況や環境、被験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) D. Ding and R. A. Cooper, "Electric powered wheelchairs", *IEEE Control Systems Magazine*, vol.25, no.2, pp.22-34, 2005.
- (2) R. A. Cooper, L. M. Widman, D. K. Jones, R. N. Robertson and J. F. Ster, "Force sensing control for electric powered wheelchairs", *IEEE Trans. Cont. Syst. Tech.*, vol.8, no.1, pp.112-117, 2000.
- (3) S. Katsura and K. Ohnishi, "Semiautonomous wheelchair based on quarry of environmental information", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol.53, no.4, pp.1373-1382, 2006.
- (4) 江丸貴紀, 田中一男, 土谷武士, 「超音波センサによる距離値および反射波の積分値を利用した自律移動ロボットの通行可能領域検出法」, 日本機械学会論文集 (C編), vol.74, no.737, pp.98-107, 2008.
- (5) 黒住亮太, 山本透, 「強化学習による電動車椅子の障害物回避補助システムの構築」, システム制御情報学会論文誌, vol.19, no.1, pp.7-14, 2006.
- (6) Mamdani E.H., "Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controller", *Int. J. Man-Machine Studies*, vol. 8, no. 6, pp. 669-678, 1976.