

ファジィ制御を用いたクルーズコントロール

Cruise-Control System using Fuzzy Control

高橋 淳 二⁽¹⁾

Junji Takahashi

安木 寿 教⁽²⁾

Hisanori Yasugi

高橋 稔⁽³⁾

Minoru Takahashi

酒 巻 浩 二⁽⁴⁾

Koji Sakamaki

要 旨

近年、自動車に要求される性能は、操作性や乗り心地など人間の感性に依存する部分が中心となっている。これにより、電子制御システムにも人間の主観的な感覚や操作方法を取り入れた制御が必要となってきた。著者らは、こうした要求に対してファジィ制御が一つの有効な手段であると考え、その応用に取り組んでいる。

今回、自動車制御の一例としてクルーズコントロールシステムに着目し、ファジィ制御の応用を行った。従来のシステムには、主としてPID制御が用いられているが、路面勾配の大きな変化に対して車速が安定しにくい、車両の持つ非線形特性に起因して周期的な車速変動を生じるなどの問題点があった。開発したシステムは、こうした従来制御での問題点を解消するとともに乗り心地を重視した定速走行を行なうために、運転者のアクセル操作方法、および技術者の経験・知識から得た制御ルールによってアクセル操作が行われる。実際の道路で走行試験を行った結果、周期的な車速変動もなく安定した定速走行が行われ、ファジィ制御の有効性が確認された。

A number of cars today are equipped with a cruise-control system, which makes it possible to drive at the desired constant speed on expressways without pressing on an accelerator pedal.

A conventional control method is PID (Proportional Integral Derivative) control. However, such system have a problem of large speed deviation caused by variance of the road gradient and nonlinear elements of the vehicle.

To overcome this problem, we have developed a new system which incorporates fuzzy control.

This system contains 13 linguistic control rules for inferring manipulated variable. The results in field tests show that the quality of driving comfort with the new system is higher than of conventional PID control systems.

(1)～(3) 開発部

(4) モータロニクス本部システム開発部

1. はじめに

エンジン制御にマイコンが導入されてから10年余りの間に、自動車の電子制御は、エンジン系からパワートレイン系、ブレーキ系、サスペンション系、ステアリング系へと拡大された。これら制御システムの実用化は、車両の機械的性能を飛躍的に向上させるとともに、運転者にかかる物理的負荷を大幅に軽減してきた。

近年では、こうした制御システムの充実によって車両運動の自由度が拡大したことを背景としてGMの適応車両¹⁾に見られるように、人間の感性を中心とした新しい車両制御システムが求められるようになった。これは、従来の制御システムが自動車を単なる機械として扱ったのに対して、マンマシン系として車両全体の運動を“運転しやすい・心地良い・安心である”といった人間の主観的な感覚に合致させることで、ヒューマンフレンドリーな自動車を実現しようとするものである。

著者らは、このような新しい制御システムの実現に、人間の知識や感覚・官能というあいまいで抽象的な量の組み込みを容易とするファジィ制御が有効であると考え、その応用に取り組んでいる。本論文では、クルーズコントロールシステムに適用したファジィ制御のシステムの概要とフィールドテスト結果を報告し、その有効性を実証する。

2. クルーズコントロールシステム

2. 1 システム構成

クルーズコントロールシステムは、運転者が希望する車速でスイッチを押すと、アクセルペダルを踏まなくても自動的にその車速を維持する装置である。高速道路などを長時間走行する場合にこの装置を使用すれば、運転者はアクセルペダルの操作から開放されるので疲労を軽減できる。また不要なアクセル操作がなくなるので燃料の浪費を防ぐことができる。

システムの構成を図-1に示す。運転者は、コントロールスイッチの操作によりシステムの起動や解除の指令をコントロールユニットへ伝える。

コントロールユニットは、起動の指令を受けると、その時の車速を目標車速として記憶し定速走行制御を開始する。フィードバック入力として与えられる車速信号を用いて、目標車速を維持するためのスロットル操作量を演算しアクチュエータへ出力する。

図-2にアクチュエータの構成を示す。DCモータ・ウォームギア・クラッチなどで構成され、コントロールユニットからの指令に従いエンジンのスロットルを開閉する。また、スロットル開度を検出するためのポテンションメータが内蔵されている。

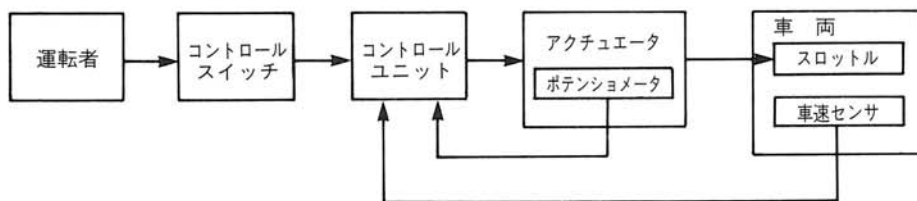


図-1 クルーズコントロールシステムの構成図

Fig. 1 Cruise control system

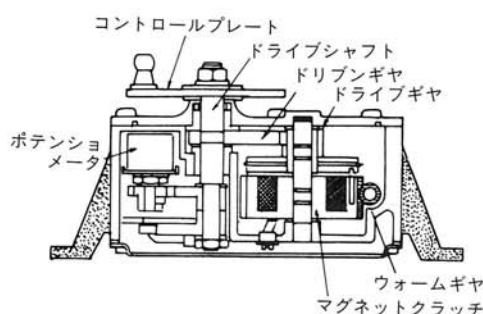


図-2 アクチュエータの断面図

Fig.2 Actuator cross sectional view

2. 2 従来の制御方式

従来の制御方式は、目標車速と実際の車速（実車速）との差に応じた比例・積分制御および加減速度に応じた微分制御を組み合わせたPID制御が主流である。図3にPID制御システムのブロック図を示す。アクチュエータ駆動部は、PID演算によって求められたスロットル開度を目標値とした比例制御で構成される。

2. 3 従来制御の問題点

従来のPID制御における問題点を次に示す。

1) 急な登り坂で車速追従性が劣化

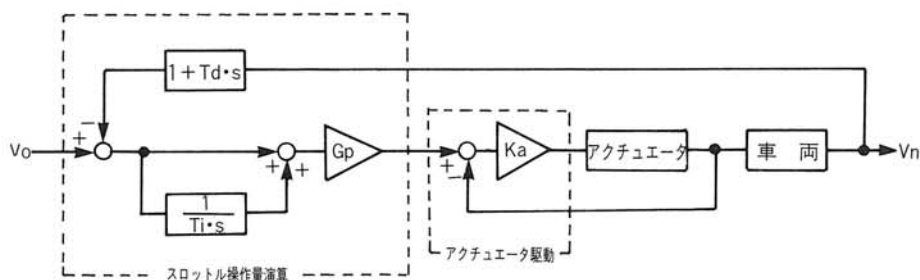
勾配4～5%の登り坂を走行する時、大きな車速低下を生じ運転者に違和感を与える。これは、走行条件が大きく変化することで、制御パラメータが不適切となることに起因する。固定の制御パラメータでは、種々の走行条件に対して所望の制御性能を常に満足させることは難しい。従来の制御では、平坦路などの代表的な走行条件における性能を重視した制御パラメータの設定を行っている。

2) 勾配の急変化時に不快な増速が発生

登り坂から下り坂へ移る時、一時的な増速が生じ運転者に不快な前後加速度を与える。従来の目標車速と実車速の差に基づいた制御のみでは、勾配の急変化など大きな外乱に対しては制御が遅れることになり、一時的に大きな偏差が発生する。

3) 急な下り坂で周期的な車速変動が発生

急な下り坂で、スロットルが全閉付近で操作されるような場合に、周期的な車速変動を生じて運転者に不快な前後加速度を与える。これは、エンジン制御システムによって、スロットルの全閉時に燃料カットが行われ、駆動力の急激な低下が生



V_0 : 目標車速
 V_n : 実車速
 T_d : 微分時定数
 T_i : 積分時定数
 G_p : 比例ゲイン
 K_a : アクチュエータ駆動ゲイン

図-3 PID制御システム

Fig.3 PID control system

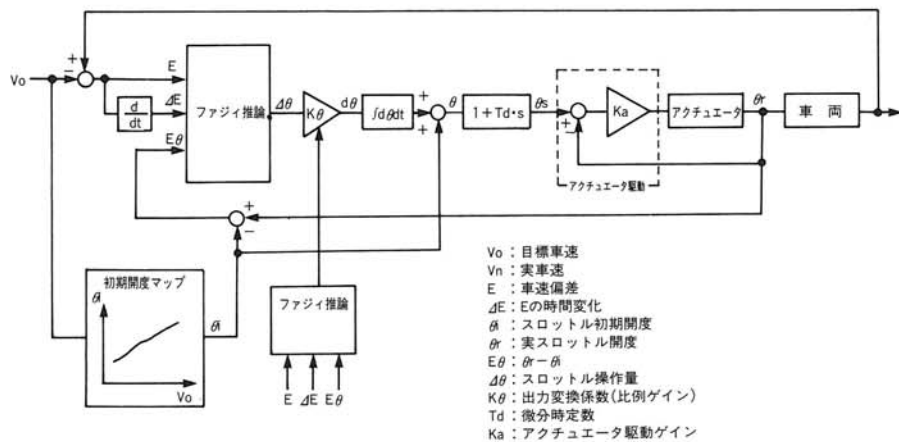


図-4 ファジィ制御システム
Fig. 4 Fuzzy control system

じるためである。従来の制御では、こうした車両の非線形特性に対して何ら補償する制御要素を持たないため振動を発生することになる。

3. ファジィ制御の応用

ファジィ制御は、人間の操作方法や制御知識に基づく言語的な制御ルールにより、時々のシステム状態や目的に応じたきめ細かな操作を可能とする制御方式である。こうした特徴を活かし、従来システムの持つ問題点を解消するとともに、乗り心地を重視した定速走行を実現しようとした。

3. 1 ファジィ制御システム

図-4に、ファジィ制御システムのブロック図を図-5に制御フローを示す。車速偏差 E およびその時間変化 ΔE 、スロットル初期開度 θ_i と実際の開度 θ_r の差 $E\theta$ を入力としたファジィ推論により、制御周期当たりのスロットル操作量 $\Delta\theta$ が求められる。 θ_i は、平坦路を走行するとき必要となるスロットル開度量であり、目標車速に対応してあらかじめマップとして与えている。 $\Delta\theta$ は、出力変換係数 K_θ により補正され実際のスロットル操作量 $d\theta$ に変換される。 $d\theta$ は、積分され

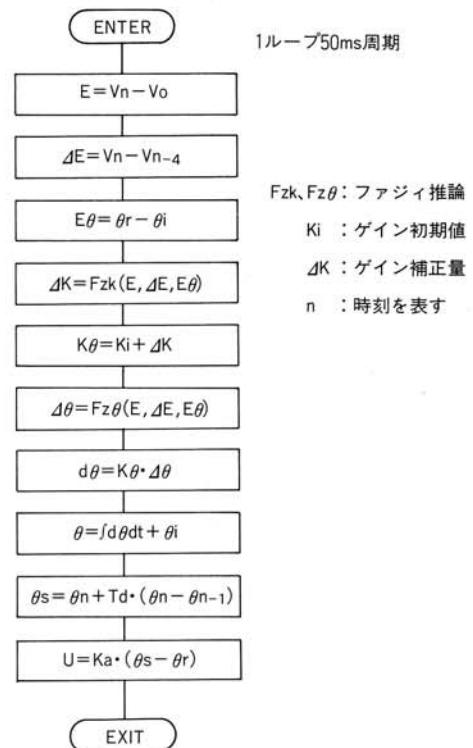


図-5 ファジィ制御フロー
Fig. 5 Fuzzy control flowchart

たのち θ_i と加算されてスロットル開度 θ へ変換される。 K_θ は、PID制御の比例ゲインに相当するパラメータであるが、ファジィ推論によって走

行状態に応じた調整が行われる。アクチュエータ駆動部には、アクチュエータの動作遅れを補償するために位相進み処理されたスロットル開度 θ_s が入力される。

3. 2 ファジィ推論

ファジィ制御における操作量の推論法は、Max-Min 合成重心法をはじめとして多々提案されているが、車載用マイコンの演算能力とメモリ容量を考慮して、前田らの提案する簡略化ファジィ推論法²⁾を採用した。また、前件部の適合度を表すためのメンバシップ関数には、取扱いが容易な三角型および台形型を用いた。

簡略化ファジィ推論は、制御ルールの後件部を実数値で与える。例えば、入力変数を e_1 , e_2 出力変数を u とすると、制御ルールは次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \text{if } e_1 = \text{PB}, e_2 = \text{NS} \\ \text{then } u = f_i \end{aligned} \quad (1)$$

ここでPB (Positive Big), NS (Negative Big) はファジィ変数、 f_i は実数値である。入力データ (e_1' , e_2') に対して、(1)式から次式の結論が得られる。

$$\mu_i(f_i) = \mu_{\text{PB}}(e_1') \wedge \mu_{\text{NS}}(e_2') \wedge 1 \quad (2)$$

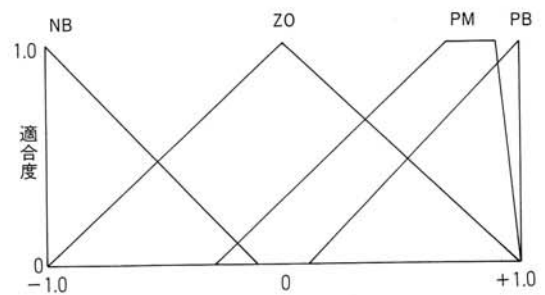
ただし、 $\wedge$ は min 演算である。

複数個ある制御ルールの結果を総合した最終の推論結果は次式で表される。

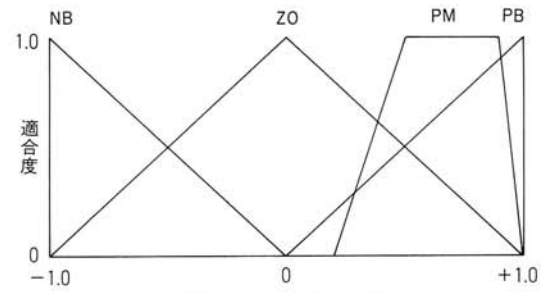
$$u^* = \frac{\sum \mu_i(f_i) \cdot f_i}{\sum \mu_i(f_i)} \quad (3)$$

3. 3 制御ルールとメンバシップ関数

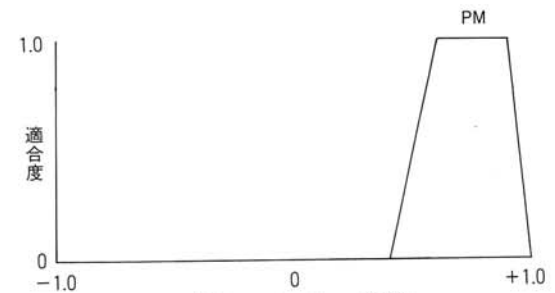
運転者が一定車速を維持しようとする場合のアクセル操作は、「車速が目標車速以下ならば、アクセルを踏み込む」「加速していれば、アクセルを戻す」のように偏差と加速度に基づいて決定される。こうした操作を模擬して作成した定速走行



(a) Eのメンバシップ関数



(b) ΔEのメンバシップ関数



(c) Eθのメンバシップ関数

NVB (Negative Very Big)	: -1.6
NB (Negative Big)	: -0.6
NM (Negative Medium)	: -0.2
NS (Negative Small)	: -0.1
ZO (Zero)	: 0.0
PS (Positive Small)	: +0.1
PM (Positive Medium)	: +0.2
PB (Positive Big)	: +0.6
(d) Δθの値	

図-6 制御ルールに対応するメンバシップ関数
Fig.6 Membership function for control rules

のための基本的な制御ルールを表1に示す。入力であるEおよびΔEの状態は、図6(a)(b)に示すメンバシップ関数によってあいまい表現されているが、出力となるΔθには、同図(c)に示される実数

表-1 制御ルール

RULE 1	If E=PB, ΔE =PB	then $\Delta \theta$ =NB
RULE 2	If E=PB, ΔE =ZO	then $\Delta \theta$ =NS
RULE 3	If E=PB, ΔE =NB	then $\Delta \theta$ =ZO
RULE 4	If E=ZO, ΔE =PB	then $\Delta \theta$ =NM
RULE 5	If E=ZO, ΔE =ZO	then $\Delta \theta$ =ZO
RULE 6	If E=ZO, ΔE =NB	then $\Delta \theta$ =PM
RULE 7	If E=NO, ΔE =PB	then $\Delta \theta$ =ZO
RULE 8	If E=NB, ΔE =ZO	then $\Delta \theta$ =PS
RULE 9	If E=NB, ΔE =NB	then $\Delta \theta$ =PB
RULE 10	If E=PM, ΔE =PM, E_s =PM	then $\Delta \theta$ =NVB

NB: Negative Big PB: Positive Big
 NM: Negative Medium PM: Positive Medium
 NS: Negative Small PS: Positive Small
 ZO: Zero

値が与えられている。煩雑なスロットル操作によって乗り心地が損なわれないように、偏差があっても加速度がゼロの場合は、操作量を小さくしてある (RULE 2, RULE 8)。

表-1のRULE 1~9の制御ルールによって得られる入出力の関係を数値的に求めると図-7のようになる。複雑な計算式などを必要とせず、簡単な制御ルールのみで複雑な入出力関係が表されている。

運転者が、登り坂から下り坂へ移る時に一定車速を維持しようとする場合は、視覚的に勾配変化を判断し下り坂になる前に予めアクセルを戻す操作を行う。この操作方法に倣い、勾配の急変化時に発生する増速を抑えるため追加した制御ルールが表-1のRULE 10である。対応するするメンバーシップ関数を図-6に示す。人間の視覚に対応するセンサを持たないので、Eおよび ΔE 、 E_s の状態によって勾配変化を認識している。すなわち、スロットル開度が大きめで目標車速付近から加速している場合は登り坂が終わろうとしていると判断し、スロットルを非常に大きく閉じる操作を行う。

また、急な登り坂での車速低下及び急な下り坂

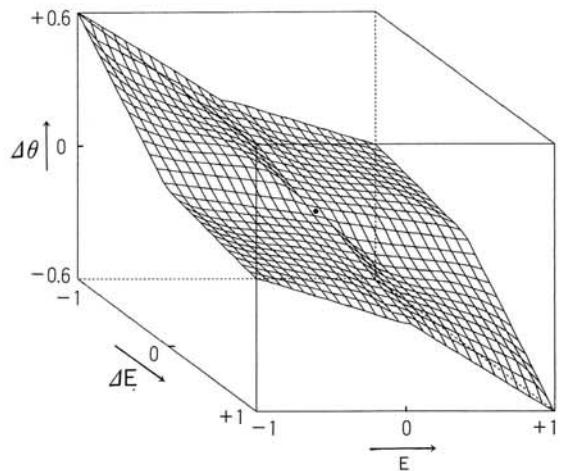


図-7 入出力関係

Fig. 7 Relationship between input and output

での周期的な車速変動を解消するために、比例ゲインに相当する K_0 の調整機能を持たせた。 K_0 の調整は、初期値である K_i に対してファジィ推論によって求められる補正量 ΔK を加えることで行っている。

$$K_0 = K_i + \Delta K \quad (4)$$

急な登り坂では、走行抵抗が非常に大きくなり入力Eおよび ΔE に対して操作量dUが不足するために車速低下を生じる。こうした場合に、 K_0 を大きくすれば、dUの不足が解消され、車速の低下を抑えることができる。そこで、 K_0 の調整ルールとして表-2に示すRULE 11を与えた。勾配を計測するセンサを持たないため、スロットル開度の大きさによって登り坂を判断している。そのメンバーシップ関数を図-8に示す。

急な下り坂では、走行抵抗が非常に小さく必要となる駆動力が少ないために、スロットルは全閉

表-2 ゲイン調整ルール

RULE 11	If E_s =PB	then ΔK =PB
RULE 12	If E_s =ZO	then ΔK =ZO
RULE 13	If E_s =NB, E=PS, ΔE =PS	then ΔK =NB

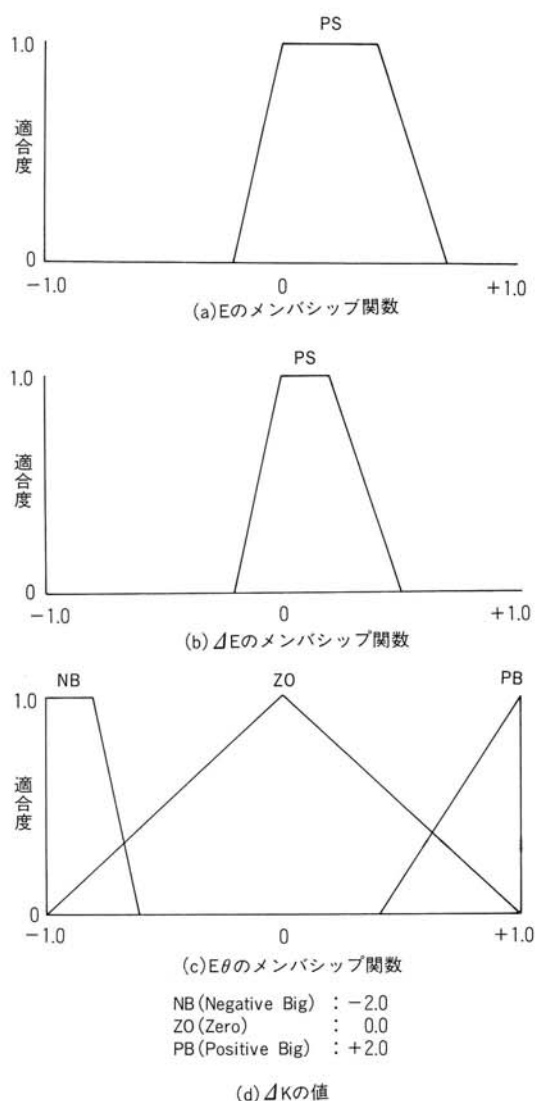


図-8 ゲイン調整ルールに対応するメンバシップ関数
Fig.8 Membership function for tuning rules

近くで操作される。このような状況では、実車速が目標車速よりわずかでも大きくなるとスロットルが全閉となり、エンジン制御システムによって燃料カットが行われる。燃料カットは、急激に駆動力を低下させるため、車両は急減速する。この車速低下によって、スロットルが開かれ再び燃料の供給が開始されると駆動力は急激に大きくなるため、車両は急加速する。こうした減速と加速が

繰り返されて周期的な車速変動を発生することになる。運転者が、アクセル操作のみでこうした車速変動を避けて走行しようとした場合には、実車速が目標車速より多少大きくなってもアクセルの戻し量を小さくしてスロットルが全閉とならないように操作する。 K_o を小さくすることで操作量 dU を小さくすることができるので、上記の操作にならって表2に示すRULE 13を与えた。すなわち、スロットル開度が全閉付近にあって実車速が目標車速より多少大きく加速している場合は、 K_o を小さくするように補正する。対応するメンバシップを図8に示す。

以上、スロットル操作量を求めるためのファジィ推論は、 $\Delta\theta$ に関する10個のルールと ΔK に関する3個のルールによって構成されており、クロック周波数2 MHzで動作する8 bit ワンチップマイコンにて演算される。三角型のメンバシップ関数および簡略化推論法を採用したことで、ファジィ

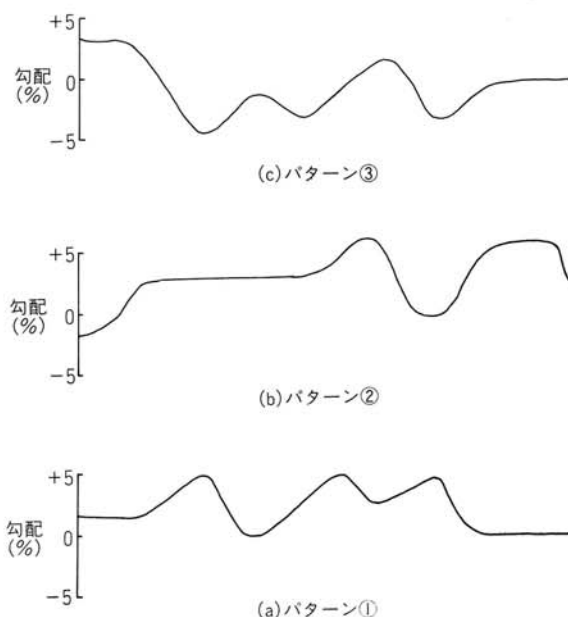


図-9 路面勾配パターン
Fig.9 Test road

表-3 フィールドテスト結果

試 験 項 目	P I D制御	ファジィ制御
登り坂 → 下り坂 (路面勾配パターン①)	オーバーシュート量	+2.0 km/h
	減 速 度	-0.6 km/h/s
急な登り坂 (路面勾配パターン②)	車 速 偏 差	-4.0 km/h
	オーバーシュート量	+4.0 km/h
	減 速 度	-2.0 km/h/s
急な下り坂 (路面勾配パターン③)	周期的な車速変動 変動幅 2.0km/h 周 期 6 sec	な し

推論に使用したメモリ容量は0.9Kbyteと少なく、制御周期50ms以内での処理が実現できた。

4. フィールドテスト

ファジィ制御および従来のPID制御システムを実車に搭載し、比較試験した結果について述べる。試験は、6気筒2000ccエンジンおよび自動変速装置を搭載した車両を用い、起伏の多い自動車専用道路にて時速80km/hの定速走行を行った。制御性能の比較は、図-9に示す3つの路面勾配パターンにて、車速偏差やオーバーシュート量などについて行っており、その結果を表-3にまとめて示す。

パターン①の走行結果を、図-10に示す。PID制御では、登り坂から下り坂に移った時に、+2 km/hのオーバーシュートが発生している。また、オーバーシュート後の減速度が-0.6km/h/sと大きく、運転者に不快感を与えている。一方、ファジィ制御では、オーバーシュート量は+0.8km/hと少なく、減速度も-0.2km/h/sと運転者に感じられないまでに抑えられている。時刻30秒付近までの一定勾配においても、ファジィ制御の方が車速の変動が少なく、スロットルの動きが滑らかになっている。

急な登り坂が続くパターン②を走行した場合、PID制御では、図-11(a)に示されるように最大-4 km/hの車速低下を生じる。ファジィ制御では、

同図(b)に示されるように、勾配の変化に合わせて K_0 の調整によって、最大-2 km/hの車速低下に抑えられている。また、パターン①と同様に、登り坂が終了した場合のオーバーシュート量および減速度ともファジィ制御の方が極めて小さくなっている。

エンジン制御システムのスロットル全閉による燃料カットに起因する周期的な車速変動のようすを図-12(a)に示す。変動幅2 km/h、周期6秒程度で激しい加減速を行っている。ファジィ制御では、スロットル全閉付近での操作量を小さくしてあるため、同図(b)に示されるようにスロットルが全閉に到らず燃料カットは行われぬ。これにより、2 km/hほどの増速は見られるが、周期的な車速変動は解消されている。

5. お わ り に

クルーズコントロールシステムにファジィ制御を応用することで、従来のPID制御で問題とされてきた登り坂での車速低下や下り坂での車速変動などが解消されるとともに、加減速の少ない乗り心地の良い定速走行が実現され、ファジィ制御の有効性が確認できた。また、ファジィ制御ではメンバシップ関数および言語的な制御ルールによって、運転者の操作方法や技術者の経験・知識など

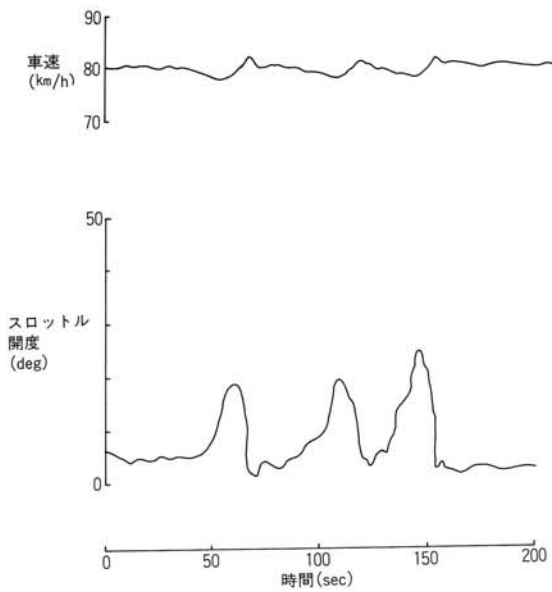


図-10(a) 勾配パターン①の走行データ (PID制御)
Fig.10(a) Experimental results (Pattern ① PID)

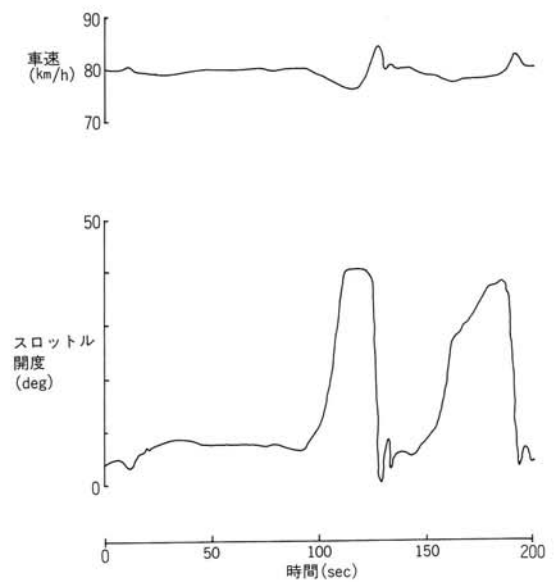


図-11(a) 勾配パターン②の走行データ (PID制御)
Fig.11(a) Experimental results (Pattern ② PID)

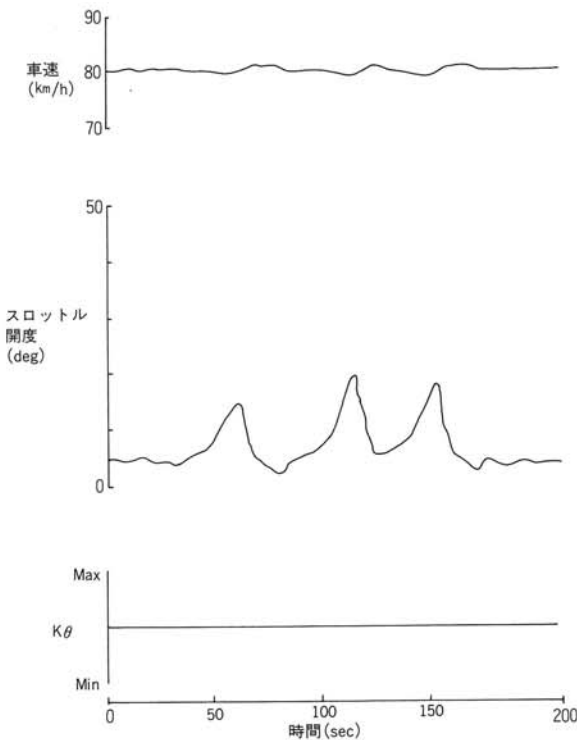


図-10(b) 勾配パターン①の走行データ (ファジィ制御)
Fig. 10 (b) Experimental results (Pattern ① Fuzzy)

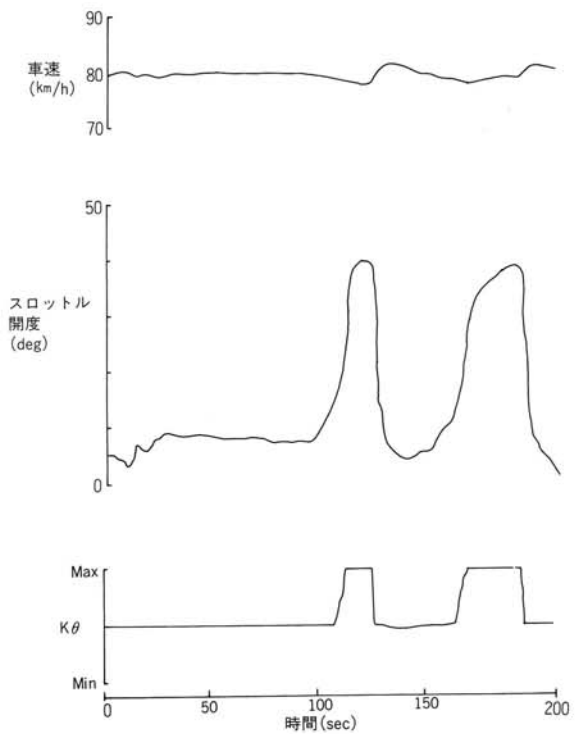


図-11(b) 勾配パターン②の走行データ (ファジィ制御)
Fig. 11 (b) Experimental results (Pattern ② Fuzzy)

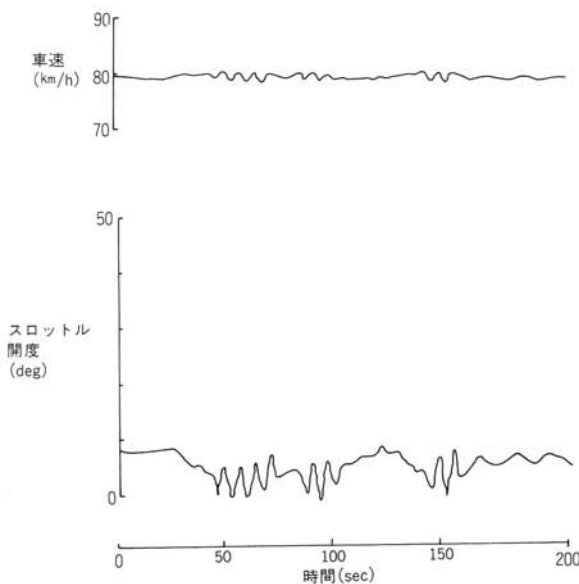


図-12(a) 勾配パターン③の走行データ (PID制御)
Fig.12(a) Experimental results (Pattern ③ PID)

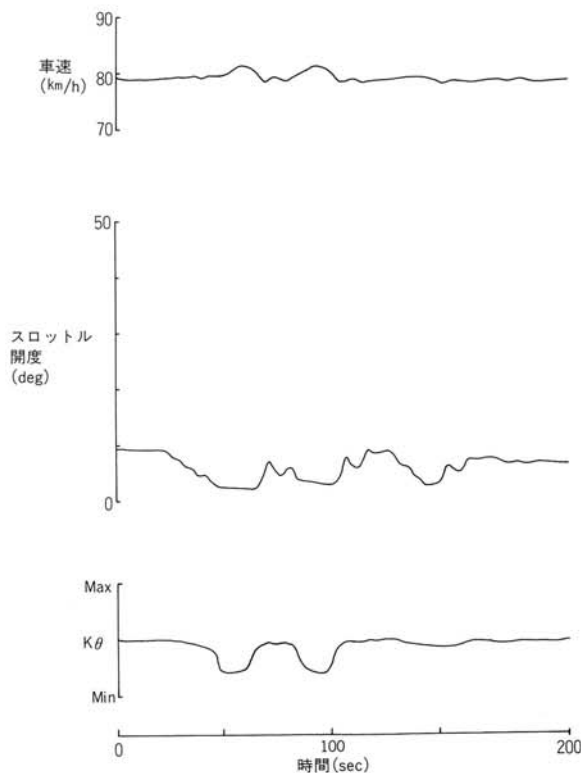


図-12(b) 勾配パターン③の走行データ (ファジィ制御)
Fig. 12 (b) Experimental results (Pattern ③ Fuzzy)

を容易にシステムに組み込むことも確認できた。

今後、このシステムにはレーダを用いた車間距離制御が付加されるが、この場合にも車速や加速度、車間距離など競合する複数の制御目標に対して、人間的な判断や操作で運転者の感性に整合したシステムとするためにファジィ制御の導入を検討している。

また、エンジン・パワートレイン系やブレーキ系など車両全体を総合的に制御するシステムにおいてもファジィ制御の応用を検討しており、「人に優しい自動車」を目標として研究開発に取り組んでいる。

参考文献

- 1) N. A. Schilke, R. D. Fruechte, N. M. Boustany, A. M. Karmel, B. S. Repa, J. M. Rillings: "Integrated Vehicle Control" IEEE-SAE, Convergence '88, Dearborn (1988)
- 2) 前田、村上: "ファジィ理論を用いた自動車追従制御"、第3回ファジィシステムシンポジウム、(1987)
- 3) 市橋、田中: "PIDとFUZZYのハイブリッド型コントローラー"、第4回ファジィシンポジウム講演論文集、(1988)
- 4) 菅野: "ファジィ制御"、日刊工業新聞社、(1988)
- 5) 寺野、浅居、菅野: 応用ファジィシステム入門、オーム社、(1989)
- 6) 増淵: 自動制御基礎理論、コロナ社、(1973)