Fuzzy Logic コントローラによる 自動車の速度制御[†]

前 田 幹 夫*・村 上 周 太*

Speed Control of Automobile by Fuzzy Logic Controller

Mikio MAEDA* and Shuta MURAKAMI*

This paper deals with the speed control of automobile by a fuzzy logic controller. The purposes of the speed control are to reduce the fatigue which a driver receives during long time driving, to save the gasoline consumption, and to keep on driving at the constant speed. For these purposes, the fuzzy logic controller is designed. This fuzzy logic controller is constructed of the linguistic control rules which are conditional linguistic statements expressing the relationship between inputs and outputs of the controlled system. The inputs of controller are the "error" which is the difference between the present speed and the set point, the first difference and the second difference of "error". The output of controller, that is the manipulated variable, is obtained by using Tsukamoto's fuzzy reasoning.

We discuss the results of computer simulations and road tests of an automobile (TOYOTA CROWN '70) equipped with microcomputer from the standpoints of control performance, fluctuation in manipulated variable, saving gasoline consumption, and comfortability of driving. And we also discuss the usefulness of fuzzy logic controller applied to the speed control system.

Key Words: fuzzy logic controller, fuzzy reasoning, linguistic control rules, automobile speed control

1. ま え が き

近年、自動車のエレクトロニクス化が進み、電子

燃料噴射装置やマイクロコンピュータを用いたエンジン制御、レーダーを用いた追突防止装置あるいは、一定速度で走行したり、走行距離や燃費等が計算可能なクルーズコンピュータなどを搭載した自動車が多く見られるようになった。著者らも、長時間走行における疲労軽減、燃費（ガソリン消費）の節約あるいは乗り心地等を考慮したクルーズコンピュータの開発の一端として、あいまい論理を応用した定速走行装置(Fuzzy Logic Controller; FLC)の研究開発を行っている。

定速走行装置は1960年代、米国において最高級の乗用車に搭載された。その頃の制御方式はほとんどが機械制御であった。その後、電子制御方式による適応制御¹⁾、非線形制御²⁾、最適制御法則³⁾を用いた定速走行装置が現われ、現在に至っている。しかし、これらの制御法則は i) 自動車の動特性が既知である。ii) 動特性が変動しない、iii) 外乱が小さいという条件を必要とする。しかるに、自動車の動特性はギヤ・チェンジにより変化する。また、道路状態の変化や坂道(勾配)による外乱に対しても、動特性は大きな影響を受ける。それゆえ、動特性が変化しても最良の制御が行える制御法則の開発が必要である。

そこで、著者らはこの問題(動特性の変動)に対処しうる制御法則、つまり、自動車(制御対象)のキャブレター開度と速度の入出力情報のみに依存する、あいまい論理を応用した Fuzzy Logic コントローラ⁴⁾を設計した。Fuzzy Logic コントローラは言語的制御則(Linguistic Control Rule; LCR)で構成され、あいまい推論を行うことにより、操作量(キャブレター開度)を計算する。このとき、FLCの入力情報には速度偏差、速度偏差の1階差分、速度偏差の2階差分を用いている。ただし、FLCで用いるあいまい推論は塚本のあいまい推論^{5), 6)}であり、これはあいまい論理を初めて制御に応用した Mamdani⁷⁾が推論に用いた

[†] 第9回システムシンポジウムで発表(昭58・8)

* 九州工業大学 北九州市戸畑区仙水町 1-1

* Kyushu Institute of Technology, Kitakyushu
(Received September 17, 1984)
(Revised February 20, 1985)

Fig. 1 Speed control system using microcomputer

Zadeh の合成規則⁸⁾とは異なる。

本論文では、先の Fuzzy Logic コントローラをマイクロコンピュータでハードウェア構成し、それを自動車（トヨペット・クラウン、45 年式オートマチック）に搭載して、都市高速道路（北九州道路、速度制限 60 km/h）で走行実験を行った。次章以降、これらの方法およびその結果について述べる。また、Fuzzy Logic コントローラの有効性についても、PID コントローラでの実験結果と比較して、検討する。

2. あいまい速度制御系の概要

マイクロコンピュータでハードウェア構成された FLC のあいまい速度制御系を Fig. 1 に示す。図からわかるように、速度情報はスピードセンサーによって電圧としてマイクロコンピュータに取り込まれる。マイクロコンピュータはまず、目標電圧と速度検出電圧から速度制御偏差等を計算し、つぎに、あいまい制御則 (LCR) により操作量を計算して、比較器に出力する。比較器は操作量に対応するキャブレター開度を達成するために、モータとリレーからなるアクチュエータをフィードバック制御する。制御の開始と停止は図中の S/S ボタンスイッチにより行われ、目標速度の変更は簡単なつまみ（ボリューム）操作で行える。FLC の動作中フットブレーキが踏まれた場合、つまり、ブレーキ信号が検出された場合には、速度制御の中断 (FLC の計算の一時停止、キャブレター全閉) や初期値の再設定などの処置がとられる。速度制御の再開はブレーキ信号の不検出あるいは S/S スイッチ

による開始命令によって行われる。

マイクロコンピュータの内部構成は Fig. 2 のようになっている。マイクロプロセッサには intel 8085 を使用し、入出力データ用として 8 bit の A/D, D/A 変換器を、S/S 信号、ブレーキ信号の入力としてパラレル I/O チ

ップを使用している。また、FLC と PIDC (PID Controller) のソフトウェア格納領域として、それぞれ 4 KB の PROM を用いている。これは種々のコントローラによる速度制御が PROM を差し換えるだけで、その制御が同一のハードウェア構成で行えるということである。

3. Fuzzy Logic コントローラ

この章では FLC のソフトウェアの面から、FLC の構成、あいまい推論および入出力データの処理について述べる。

3.1 FLC の言語的制御則⁴⁾

FLC はつぎのような言語的制御則で構成されている。

LCR 1: If e_k is P_1 then Δu_k is P_{u1}	}
LCR 2: If e_k is N_1 then Δu_k is N_{u1}	
LCR 3: If Δe_k is P_2 then Δu_k is P_{u2}	
LCR 4: If Δe_k is N_2 then Δu_k is N_{u2}	
LCR 5: If $\Delta^2 e_k$ is P_3 then Δu_k is P_{u3}	
LCR 6: If $\Delta^2 e_k$ is N_3 then Δu_k is N_{u3}	
- (1)

ただし、時刻 k に対して、

$$\left. \begin{aligned} e_k &= r - y_k \\ \Delta e_k &= e_k - e_{k-1} \\ \Delta^2 e_k &= \Delta e_k - \Delta e_{k-1} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

P_i, P_{ui} : Positive

N_i, N_{ui} : Negative

($i=1, 2, 3$)

r : 目標値

y_k : 車速度

e_k : 制御偏差

Δe_k : 制御偏差の 1 階差分

$\Delta^2 e_k$: " の 2 階差分

である。これらのルールは制御偏差等と操作量の関係を表わしたものである。例えば、LCR 1 は“制御偏差が正 ($r > y_k$) ならば、操作量を増加せよ”というものであり、LCR 2 は逆に、“制御偏差が負 ($r < y_k$) ならば、操作量を減少せよ”というものである。同様にして、LCR 3~6 も解釈される。各 LCR の言語的真理値 (Linguistic Truth Value; LTV) は真であると

Fig. 2 Microcomputer system

Fig. 3 Control rules (antecedent)

(a) Antecedent.

(b) Consequent.

Fig. 4 Membership functions

する。各ルールを図示すると、Fig. 3 のようになる。これらのルールを PID コントローラと比較してみると、LCR 1, LCR 2 が I 動作、LCR 3, LCR 4 が P 動作、LCR 5, LCR 6 が D 動作に対応している。しかし、各ルールは後に述べるように、あいまい推論を用いて処理されるので、その結果、非線形な PID コントローラが構成されていると思われる。

ルール中の P_i, P_{ui}, N_i, N_{ui} ($i=1, 2, 3$) は各変数値に対するメンバシップ関数をもつ fuzzy 集合である。ここで、 X を全体集合、 A を fuzzy 集合でかつ $A \subset X$ とすると、メンバシップ関数 $\mu_A(x)$ は要素 x が fuzzy 集合 A に属する度合を表わしている。つまり、

$$\mu_A(x) = \text{Grade}(x \in A), \mu_A(x) \in [0, 1], x \in X \quad (3)$$

である。 P_i, N_i, P_{ui}, N_{ui} のメンバシップ関数を Fig. 4 に示す。ここで、前件側のメンバシップ関数は逆正

接曲線で、後件側のメンバシップ関数は直線である。前件側を曲線にしたのは、制御偏差等が 0 付近でコントローラのゲインを大きくし、制御偏差が大きくなればゲインを飽和させるようにするためである。これによって、コントローラへ誤った過大な入力があっても、操作量を抑制することができる。また、後件側も曲線とすることも考えられるが、直線で十分である。その理由はコントローラのゲインが前件側と後件側の両方のメンバシップ関数に依存するからである。FLC の構成において、これらのメンバシップ関数の決定、つまり、メンバシップ関数 (μ_{P_i}, μ_{N_i} など) のパラメータの決定が重要である。

3.2 あいまい推論^{5), 9)}

あいまい推論には、合成規則による推論などの種々のものが提案されているが、この節では塚本の提案した、Lukasiewicz Logic を台とした推論法について述べる。

まず、

$$\text{LCR 1} \triangleq \text{If } e \text{ is } P_i \text{ then } \Delta u \text{ is } P_{u1} \quad (4)$$

において、 $P \triangleq "e \text{ is } P_i"$ 、 $Q \triangleq "\Delta u \text{ is } P_{u1}"$ とする。塚本の推論法は、前件側として P' が与えられたとき、この P' から、 $P \Rightarrow Q$ ($\triangleq \text{LCR 1}$) の関係を用いて、 Q' を導く方法である。ただし、 P, P', Q, Q' は fuzzy 命題である。以下、簡単にその推論手順について述べる。

i) P' の入力情報による逆真理値想定 (Converse of Truth Qualification; CTQ)

$P' \triangleq "e \text{ is about } 50 \text{ km/h}"$ とし、約 50 km/h の fuzzy 集合のメンバシップ関数を $\mu_{er}(e)$ とすると、

$$"e \text{ is } P_i" \text{ is } \tau \Leftrightarrow "e \text{ is about } 50 \text{ km/h}" \quad (5)$$

となる言語的真理値 (LTV), $\tau (\triangleq P)$ を (6) 式で求める。これを Fig. 5(a) に図示する。ここで、 E, V はそれぞれ、誤差、値の全体集合である。

$$\mu_\tau(v) = \mu_{er}(\mu_{P_i}^{-1}(v)), \quad (6)$$

$$v \in V, v \in [0, 1]$$

ii) fuzzy modus ponens

i) で求めた $\tau (\triangleq P)$ と LCR の LTV が真であることにより、 $\tau' (\triangleq Q)$ を推論する。つまり、 P と P' との違い、 μ_τ を真理値上で、後件側に implication により写像するのである。

(a) CTQ

(b) TQ

Fig. 5 Diagrams of CTQ and TQ

いま, $R \triangleq P \Rightarrow Q$ とし P の数値的真理値(Numerical Truth Value; NTV) を $|P|=p$, 同様に, $|R|=r$, $|Q|=q$ とすると,

$$r = (1 - p + q) \wedge 1 \quad (7)$$

の関係がある。これを,

$$\mu_R(p, q) \triangleq r \quad (8)$$

とすると,

$$Q = P \circ R \quad (9)$$

の合成規則によって, 命題 Q の LTV が求まる。

iii) Q と Q による真理値想定 (Truth Qualification; TQ) 後件側に写象された $Q(=\tau)$ と Q によって,

$$“\Delta u \text{ is } P_{u1}” \text{ is } \tau' \Leftrightarrow Q' \triangleq “\Delta u \text{ is } DU_1” \quad (10)$$

DU_i : fuzzy 集合 ($i=1, 2, \dots, 6$)

となる Q' を求める。Fig. 5(b) はその関係を図示したものである。ここで, U は操作量の全体集合である。出力のメンバーシップ関数は,

$$\begin{aligned} \mu_{Q'}(\Delta u) &= \mu_{DU_1}(\Delta u) \\ &= \mu_{\tau'}(\mu_{P_{u1}}(\Delta u)) \end{aligned} \quad (11)$$

より得られる。

以上, i), ii), iii) により, 制御偏差 e に対する fuzzy 情報が与えられた場合の操作量 Δu の情報, つまり, μ_{DU_i} が求まる。同様に, **LCR 2~LCR 6** についても, i)~iii) のステップで μ_{DU_i} ($i=2, 3, \dots, 6$) を求める。各 LCR を統合したときの Δu のメンバーシップ関数は $\mu_{DV}(\Delta u) = \min_i \mu_{DU_i}(\Delta u)$ によって求まる。だが, コントローラの出力は non-fuzzy でなければならない。よって, Δu の non-fuzzy 値 Δu^* は次式で求められる。

$$\Delta u^* = \sup_{\Delta u \in U}^{-1} [\min_i \mu_{DU_i}(\Delta u)] \quad (12)$$

これによって, 操作量 u_k は

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k^* \quad (13)$$

となる。

3.3 FLC の設計^{9),10)}

前節によって操作量 u_k が求まる。その場合, 入力情報は fuzzy であった。しかし, 実際の自動車の速度制御系の設計においては, 入力情報には non-fuzzy な値を使うことにする。

入力情報を non-fuzzy とした場合の Δu^* の算出方法を 3.2 の i)~iii) の手順にしたがって述べる。いま $e_1=e$, $e_2=\Delta e$, $e_3=\Delta^2 e$ とし, Fig. 4 より, 前件側のメンバーシップ関数を e_i に対して,

$$\left. \begin{aligned} \mu_{P_1}(e_i) &= \frac{1}{\pi} \tan^{-1}(c_1 \cdot e_i) + 0.5, \\ \mu_{N_1}(e_i) &= \frac{1}{\pi} \tan^{-1}(-c_1 \cdot e_i) + 0.5, 1 \leq i \leq 3 \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Fig. 6 Membership functions of manipulated variable

とする。ただし,

$$\begin{aligned} c_1 &= \frac{\tan(0.45 \cdot \pi)}{a_1}, \quad c_2 = \frac{\tan(0.45 \cdot \pi)}{a_2}, \\ c_3 &= \frac{\tan(0.45 \cdot \pi)}{a_3} \end{aligned} \quad (15)$$

とする。後件側のメンバーシップ関数を

$$\left. \begin{aligned} \mu_{P_{u1}}(\Delta u) &= \frac{1}{2 \cdot b_i} \cdot \Delta u + 0.5 \\ \mu_{N_{u1}}(\Delta u) &= -\frac{1}{2 \cdot b_i} \cdot \Delta u + 0.5, 1 \leq i \leq 3 \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

とする。

あいまい推論 (前節の i), ii), iii)) によって, Δu の fuzzy 集合が Fig. 6 のように求まる。non-fuzzy なコントロール Δu^* は, 各メンバーシップ関数の交点 $\Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3$ を,

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_1 &= \frac{1}{\pi} \{ \tan^{-1}(c_1 \cdot e) \\ &\quad + \tan^{-1}(c_2 \cdot \Delta e) \} / (d_1 + d_2), \\ \Delta u_2 &= \frac{1}{\pi} \{ \tan^{-1}(c_2 \cdot \Delta e) \\ &\quad + \tan^{-1}(c_3 \cdot \Delta^2 e) \} / (d_2 + d_3), \\ \Delta u_3 &= \frac{1}{\pi} \{ \tan^{-1}(c_3 \cdot \Delta^2 e) \\ &\quad + \tan^{-1}(c_1 \cdot e) \} / (d_3 + d_1) \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

ただし, $d_i = 1/(2 \cdot b_i)$, $1 \leq i \leq 3$,

とすると,

$$\Delta u^* = \text{medium} \{ \Delta u_1, \Delta u_2, \Delta u_3 \} \quad (18)$$

となる¹⁰⁾。ただし, medium は中間の値をとることを意味する。(17)式, (18)式で決定される操作量 Δu^* は $\tan^{-1}(c_1 \cdot e)$, $\tan^{-1}(c_2 \cdot \Delta e)$, $\tan^{-1}(c_3 \cdot \Delta^2 e)$ のうちの二つの線形結合で表わされ, $e, \Delta e, \Delta^2 e$ からみると, 非線形結合となっている。それゆえ, FLC は非線形な PID 制御装置であるといえる。

3.4 FLC のデータ処理

FLC による速度制御のフローチャートを Fig. 7 に示す。初期設定部は LCR のメンバーシップ関数のパラメータ a_i, b_i ($i=1, 2, 3$) 及び $u_0, e_0, \Delta e_0, \Delta^2 e_0$ を設定する。つぎのサブルーチン, INPUTS/S, INBRAKE

Fig. 7 Flow chart of speed control

はそれぞれ、開始/停止 (S/S) 信号、フットブレーキ信号の検出とその処理である。INBRAKE ルーチンは、ブレーキが踏まれた場合、 $u_k, e_k, \Delta e_k, \Delta^2 e_k$ の値を0に再設定する。また、このとき、操作量として、OUTUK ルーチンにより0が出力される。INPUTRY ルーチンは目標速度 (r)、車速度 (v_k) の入力処理サブルーチンであり、入力データの浮動小数点化の処理を含む。DELAY 処理はサンプルタイムを決定するものであり、一定時間カウントした後、メインループに戻るようになっている。

なお、FLC の入出力データは 8 bit であるが、内部データは仮数部 2 バイト、指数部 1 バイトの浮動小数点型である。各 LCR のメンバーシップ関数 (逆正接関数) の近似には Cordic アルゴリズム¹¹⁾ を使用する。また、サンプルタイムは (16) 式のパラメータの認識のしやすさ及び種々のサンプルタイムでの速度制御シミュレーションの結果から 1 秒とした。

4. 速度制御のシミュレーションと走行実験

4.1 速度制御のシミュレーション

FLC による速度制御のシミュレーションは 2. で述べた FLC のハードウェアおよびソフトウェアによって生じる誤差、つまり、A/D、D/A 変換器の量子化誤差及び計算誤差を考慮して行う。シミュレーションに用いる制御対象 (操作部+キャブ+自動車本体) の伝達関数を (19) 式に示す。これは 0 km/h → 60 km/h の過渡応答による特性である。

$$G(s) = \frac{35.78}{(1.73s+1)(16.85s+1)} \text{ [(km/h)/V]} \quad (19)$$

Fig. 8 Simulation results of speed control

FLC のパラメータ ($a_i, b_i, i=1, 2, 3$) は、オーバーシュート、整定時間等の制御性能を考慮したパラメータ設定規則¹⁾を用いて、シミュレーションにより数組が選ばれる。どの組も甲乙つけがたい応答を示しているが、そのうちの1つを Fig. 8 に示す。このときのパラメータは、

$$\begin{aligned} a_1 &= 70, a_2 = 13.0, a_3 = 14.0 \\ b_1 &= 2.0, b_2 = 2.13, b_3 = 2.0 \end{aligned} \quad (20)$$

である。PID コントローラのパラメータも制御性能を考慮して数組選ばれる。Fig. 8 はそのうちの1組のパラメータによる応答結果である。PID よりも、FLC のほうがオーバーシュートが少しあるが、他の面 (整定時間、立ち上がり時間) において優っている。また、上り坂、下り坂を想定した 50 秒後からの動特性の変動に対しては、FLC のほうが良好であることがわかる。この動特性の変動とは、シミュレーションの制御対象である (19) 式のゲインをそのゲインの 50% の振幅で周期的に変動させることを意味する。なお、この節で選ばれるコントローラのパラメータはあくまでも候補であって、最終的なパラメータ決定は、それら数組のパラメータによる走行実験の結果を検討して行う。

Fig. 9 Experimental result of speed control by PIDC

Fig. 10 Experimental result of speed control on long time driving by FLC

4.2 走行実験

FLC と PIDC プログラムを内蔵したマイクロコンピュータ (自作) を自動車に搭載して、北九州道路(紫川インター～黒崎インター)において走行実験を行う。FLC と PIDC のプログラムは機械語で ROM 化しており、四則演算はすべてソフトウェアで行う。速度制御の 1 サンプルあたりの計算時間は FLC で約 50 ms, PIDC で 35 ms である。

前節で選んだ FLC の数組のパラメータと PIDC の数組のパラメータを用いて速度制御実験を行なった。これらの結果より、制御性能や乗り心地の面で最も良さそうな応答結果を Fig. 9, Fig. 10 に示す。このときの FLC のパラメータは(20)式のとおりでである。PIDC の結果は 1 速と 2 速の動特性の影響及び変速(ギヤ・チェンジ)の影響を受けて、操作量の変動が大きい。これは、自動車の動特性が 1 速、2 速、3 速で異なるのに対して、PIDC のコントローラのゲインが一定であることから生じたものと思われる。これに対して、FLC の結果はオーバシュートが少しあるが、大きな操作量の変動がなく、加速もスムーズである。また、起伏のある道路にもかかわらず長時間走行も安定している。しかし、シミュレーション結果に比べ、オーバシュートが少し大きいのは、制御開始時から 60 km/h への加速中に 3.7% の上りの走行状態に入り、60 km/h に達する頃に平坦な道路となるため、この影響を受けているものと思われる。また、操作量が、長時間走行で大きな周期で変動しているのは、下り坂勾配の影響である。

乗り心地の面からみると、FLC のほうが不安感もなく、運転者が足でアクセルペダルを操作する場合とほとんどかわらない。また、操作性の面からも、運転が非常に楽である。

5. あとがき

あいまい論理を用いて FLC を構成し、種々のパラ

メータでシミュレーションを行った後、FLC と PIDC による走行実験を行った。その結果、FLC による速度制御は変速の影響を受けずにスムーズに加速し、長時間走行における上り坂、下り坂に対して安定した走行ができることから、PIDC よりも良好な制御が行えるということがわかった。また、乗り心地もよく、運転も楽であることから、動特性が変動する自動車の速度制御には、FLC による速度制御が有効であることがわかった。しかし、FLC のパラメータの設定には、熟練を用するため、パラメータの設定問題が今後の課題である。さらに、パラメータ調整機構を持つような FLC の設計の研究も必要である。

参考文献

- 1) R. W. Cafer et al.: Adaptive Speed Control for Automobiles, Bendix Technical Journal, 46/56 (1969)
- 2) 落合: 速度制御とエレクトロニクス, 自動車技術, 32-2, 136/142 (1978)
- 3) 村上, 前田: マイクロプロセッサを用いた自動車の最適速度制御, 計測自動制御学会論文集, 19-7, 51/55 (1983)
- 4) 前田, 村上, 他: Fuzzy Logic コントローラ的设计, 第 1 回知識工学シンポジウム資料, 133/136 (1983)
- 5) Y. Tsukamoto: Fuzzy Logic Based on Lukasiewicz Logic and Its Applications to Diagnosis and Control, Doctoral Dissertation of T.I.T. (1979)
- 6) 菅野: あいまい集合と論理の制御への応用, 計測と制御, 18-2, 8/18 (1979)
- 7) E. H. Mamdani: Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. IEE, 121-12, 1585/1588 (1974)
- 8) L. A. Zadeh: Outline of a New Approach to the Analysis of Complex Systems and Decision Processes, IEEE Trans., SMC-3-1, 28/44 (1973)
- 9) 前田, 他: Fuzzy Logic コントローラ的设计, 九州工業大学研究報告, 第 49 号, 43/51 (1984)
- 10) 岡: 自動車の速度制御に関する研究——あいまい制御の応用——, 九州工業大学昭和 57 年度卒業論文 (1983)
- 11) J. S. Walther: A Unified Algorithm for Elementary Functions, Proc. Spring Joint Computer Conference, 339/345 (1971)