

自動車用ファジィ LSI

太田則一, 原田義久, 早川清春

A Fuzzy Inference LSI for an Automotive Control

Norikazu Ohta, Yoshihisa Harata, Kiyoharu Hayakawa

要 旨

ファジィ制御では、制御モデルを使わず、経験に基づく入出力関係を記述したルールにより人間の操作に近い制御性が得られる。このため、自動車制御への適用によりその特徴を発揮できると期待されている。その際には、高速応答性、学習制御機能等の要求に加え、システムとして十分小型であることが重要なので、専用のファジィ推論LSIが必要となる。そこで、自動車制御用ファジィ LSIに要求される項目を検討し、その仕様を満たすファジィ LSIを設計・試作した。本ファジィ LSIは、EPROMと組み合わせるのみでシステムを構成でき、各種自動車制御に用いることができる。また、6入力2出力256ルールのファジィ推論を約63 μ secの演算時間で実行できる。本システムを悪路耐久運転試験の操舵角補正に適用し、線形制御との比較から、より人間に近いスムーズな制御が実現できることを確認した。このファジィ LSIは、あらゆる自動車制御に適用できるように設計したため、チップサイズが10.7mm $\times$ 10.9mmと大きく、これをそのまま製品にするには大きすぎるサイズとなっている。そこで、次に小型化のための検討を行った。仕様の削減、アーキテクチャの変更等によりファジィ推論コプロセッサとしてマイコンに内蔵可能なサイズ (4.8mm $\times$ 4.8mm) まで小型化できることを確認した。

Abstract

Fuzzy control is suitable for automotive control, because of its controllability as good as that obtained by mankind. However, since automotive control requires milli-second response and learning control, and the fuzzy system in automobiles requires small-sized compact (built-in type), a custom fuzzy inference LSI is needed for automotive control. We then investigated requirements of a fuzzy inference LSI suitable for automotive control and fabricated a fuzzy inference LSI satisfactory to these requirements.

The fabricated fuzzy LSI is designed to be used in various automotive control experiments. The inference time is 63 micro-seconds under the conditions of six inputs, two outputs and 256 rules. Combination of this fuzzy LSI only with EPROM makes it possible to implement a fuzzy control system. The fuzzy LSI was applied to a rough road durability test, aiming at the automatic driving equivalent to human driver's operation. In the test, the accumulated steering compensation of less than twenty degrees in the fuzzy control was about one third of that in the linear control.

The fuzzy LSI fabricated for use in various experiments is too large (10.7 mm $\times$ 10.9 mm) to adopt as an automotive part. Therefore, we studied a smaller-sized fuzzy LSI. The obtained chip is small enough (4.8 mm $\times$ 4.8 mm) for automotive applications and can be built in a microprocessor as a fuzzy inference co-processor without any other circuits.

キーワード

ASIC, カーエレクトロニクス, ファジィ, リアルタイム制御, 小型化

1. まえがき

1965年にカリフォルニア大学Zadeh教授により提唱されたファジィの概念¹⁾は、現在多くの分野で利用されている。ファジィ、特にファジィ制御がもてはやされているのは、ファジィ制御が比較的簡単に実現できるからである。すなわち、制御モデルが不要で、経験的に求められた入出力関係をルールに記述するだけで制御でき、しかも人間の制御に近い制御性を得られるからである。

自動車は多くの情報と制御要素で制御されており、制御モデルを作成することは容易ではない。このため、自動車はファジィ制御を適用する良い対象と考えられる。現在までに、クルーズコントロール^{2~4)}、トラッキングコントロール^{5~7)}、トラクションコントロール (TRC)⁸⁾、オートマチックトランスミッションコントロール (A/T)^{9~11)}、自動操縦¹²⁾など多くのアプリケーションに利用されている。特に三菱自動車(株)のINVECSシステムは、ファジィ制御を積極的に導入した総合制御システムであり、その性能は高い評価を受けている。

家電をはじめとする他の多くの用途と異なり、自動車用途でのファジィ制御ではmsecオーダーの高速応答性が要求される。このため、オフラインで行ったファジィ推論で得られた入出力関係をルックアップテーブルに記憶してこれを用いる、ルックアップテーブル法がよく利用されている^{3, 11)}。また、入力数、出力数、ルール数を制限することで演算量を減らし、演算処理をDSPあるいはマイクロプロセッサで行う場合もある。しかしながら、これらの手法は適応できるシステムの規模に限界があり、一般には入力数が3以下、ルール数が数十以下のシステムに限定される。例えば、ルックアップテーブル法では、入力数 (8ビット分解能) が2、出力数 (8ビット分解能) が1の場合、ルックアップテーブルのメモリ量は64Kバイトであるが、入力数が4になると4Gバイトのメモリが必要となり非現実的となる。自動車用途でファジィ制御をより効果的にするためには、入力数、ルール数の大きなシステムに適用可能な専用LSIを開発する必要がある。

近年、ファジィ演算用命令を組み込んだマイクロプロセッサや、ファジィ演算処理を行うためのファジィLSIも開発され、いくつかのアプリケーションに使用

されている^{6, 7, 9~11, 13~15, 22, 23)}。しかしながら、自動車用ファジィLSIに必要な高速推論、学習機能、装置組み込み型という点からこれらはまだ不十分である。そこで当所では、高速推論、学習機能対応、装置組み込み型という特徴を持つ自動車用ファジィLSIを開発した。以下本文では、自動車制御用ファジィ推論LSIに対する要求仕様、その仕様を満足するファジィ推論LSIの構成、自動操舵制御への適用結果について述べ、最後に自動車用製品としてのファジィ推論LSIについて考察する。

2. ファジィLSIの仕様

ファジィ制御による効果は、制御モデルの構築が難しいより大きなシステム (入力数、出力数、ルール数が多い) に適用することで、より明確になると思われる。ファジィ制御の自動車への適用はこれまでも数多くなされているが、推論速度、回路規模等の制約から小規模システムに限定されている。そこで、ファジィ制御の自動車への適用効果を明確にする目的で、各種自動車制御に適用可能な自動車用ファジィLSIを開発することにした。ここではこのファジィLSIに必要な仕様について述べる。

基本的な要求としては、自動車のリアルタイム制御に対応するための高速推論、ドライバごとに異なるドライバモデルに適応するための学習制御機能、低コスト・小型化を実現するための装置組み込み型といった項目が挙げられる。ここで装置組み込み型というのは以下のことである。

- (1) CPUとのインタフェースが簡単
- (2) 電源投入でシステムが自動的に立ち上がる
- (3) 構成要素の数が少ない

推論速度、入力数、出力数、ルール数についての要求は以下の様になる。

〔推論速度〕

エンジン制御、ブレーキ制御では2msec程度の制御サイクルが必要である。このため、ファジィ推論時間としてはその1/10以下が望ましく、200μsec以下が要求される。

〔入力数〕

例えばエンジン制御では、入力変数として車速、加速度、トルク、エンジン回転数、吸入空気量、水温の6つが想定される。他の用途にしても入力数は6あれ

Table 1 Specifications of the fuzzy inference LSI.

Input variables	6
Output variables	2
Production rules	256
Membership function	Input 14, Output 7
Input resolution	8 bits
Grade resolution	4 bits
Output resolution	8 bits
Inference time	Less than 200 μ sec
Inference*	3

*Number of fuzzy inference rule sets

ば十分と思われる。

〔出力数〕

出力変数は2以上のシステムが多くある。例えばある種のクルーズ制御では、スロットル量、燃料注入量、ブレーキ油圧の3種の出力変数が必要とされる。しかしながら出力変数の場合、ルールを分割記述して出力変数別に逐次処理したり、複数のファジィ LSI を使用したりすれば多出力にも対応可能である。そこで、出力数は2にとどめた。

〔ルール数〕

本LSIを最初に利用予定の悪路耐久運転試験では、ファジィルールセットが3組必要である。これはルール、メンバーシップ関数が互いに異なる独立したファジィ推論を3組行うことを意味しており、それぞれ3倍のルール、メンバーシップ関数が必要になる。1組の推論に必要なルール数は100以下であることから、全体のルール数は256とした。

最終的なファジィ LSI の設計仕様を **Table 1** に示す。

3. ファジィ LSI の構成

3.1 演算量と推論時間

ファジィ推論は、以下の様に表される。

〔ルール〕 if $A=A_i$ then $B=B_i$ ($i=1, 2, \dots, N_R$)

〔事実〕 $A=A'$

〔結論〕 $B=B'$

N_R 個のルールを用いて $A=A'$ の場合の結論 $B (=B')$ を導く。ここで、 A_i , B_i はそれぞれ A , B のメンバーシップ関数と呼ばれるファジィ集合である。また N_R はルール数、 A' , B' はクリスプ値である。

Table 2 Number of calculations in the C G method.

	Kinds of calculation	Number of calculations*
Rule processing	Min.	4864
	Max.	4096
Defuzzifier	Multiplication	512
	Addition	1020
	Division	2

*[Condition] inputs: 6, outputs: 2, rules: 256, resolution: 8 bits, number of MFs: 7

結論 B を導く方法として多くのファジィ推論法があるが、そのなかで最も一般的な方法として知られているのが min-max 重心法^{1,7)} である。min-max 重心法では、結論 B は次のように導かれる。

$$\mu_B(B) = \bigvee_i \{ \mu_{A_i}(A') \wedge \mu_{B_i}(B) \}$$

$$B' = \sum_k B_k \cdot \mu_{B'}(B_k) / \sum_k \mu_{B'}(B_k)$$

ここで記号 $\bigvee$ は論理和(最大値)、記号 $\wedge$ は論理積(最小値)、 μ は適合度(一致の度合い)を示す。min-max 重心法での演算量は、次式で表される。

$$N_{MIC} = N_R \times (N_I - 1) + 2^n \times N_{OM} \times N_{OV}$$

$$N_{MAC} = N_R \times N_{OV} + 2^n \times N_{OM} \times N_{OV}$$

$$N_{MUL} = 2^n \times N_{OV}$$

$$N_{ADD} = 2 \times (2^n - 1) \times N_{OV}$$

$$N_{DIV} = N_{OV}$$

N_{MIC} : 最小値演算回数

N_{MAC} : 最大値演算回数

N_{MUL} : 乗算回数

N_{ADD} : 加算回数

N_{DIV} : 除算回数

N_R : ルール数

N_I : ルール条件部の入力数

n : 出力変数のビット数

N_{OM} : 出力メンバーシップ関数の数

N_{OV} : 出力変数の数

Table 1 で示した仕様に対する演算量を **Table 2** に示す。総演算量は約 10,000 なので、10MHz のクロックレートでシーケンシャル処理をした場合 (1 演算当たり 100nsec)、推論時間は約 1msec となる。この推論速度

は自動車制御に対して十分な速さとはいえない。したがってファジィ推論にmin-max重心法を採用するのなら並列処理をする必要がある。しかしながらデファジィ化部での重心演算は一般的に 2^n オーダーの演算が必要であり、この部分の並列処理は回路規模的にみて難しい。過去に渡辺ら¹³⁾は演算順序を変えることで乗算なしに重心を求めている。この方法は回路規模削減には有効であるが、演算量自体は減らない。演算量を減らすためにはデファジィ化部にmin-max重心法に変わる別のアルゴリズムを採用すべきである。

これに対しルールの結論 (then) 部にクリスプ値を使用するシングルトン法¹⁸⁾が、特にマイコンによるソフト処理でよく用いられている。この方法は、乗算、加算の演算回数はルール数に等しいので、ルール数が少ないほど演算量の削減効果が大きい。ルール数が大きい場合には、演算量がルール数に比例して大きくなってしまふ。

そこで我々はデファジィ化部に代数積面積法¹⁹⁾(以下面積法と略す)を用いることにした。Fig. 1には面積法によるデファジィ化を示す。この方法は以下の点でmin-max重心法と異なる。

(1)出力を評価する際に、出力メンバーシップ関数とルールに対する適合度を掛け合わせる ($2^n \times N_{OM} \times$

N_{OV} 回のMIN演算が、 $N_{OM} \times N_{OV}$ 回の乗算ですむ)。

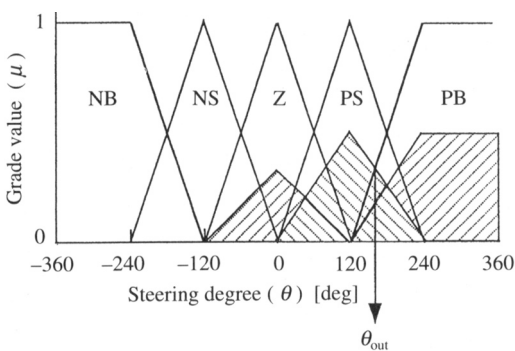
(2)出力メンバーシップ関数の重複部分は重心を求める際にそれぞれ加え合わせる ($2^n \times N_{OM} \times N_{OV}$ 回のMAX演算、 $2^n \times N_{OV}$ 回の乗算、 $2 \times (2^n - 1) \times N_{OV}$ 回の加算が、 $N_{OM} \times N_{OV}$ 回の乗算と $2 \times N_{OM} \times N_{OV}$ 回の加算ですむ)。

面積法はこれらの点からmin-max重心法よりもハードウェア化が容易であり、演算量も少ない。オートクルーズ制御でのシミュレーションで、両方法間に制御性能の差がほとんどないことを確認している。Fig. 2に、min-max重心法と面積法のTr数と推論時間の比較を示す。回路の並列化でTr数は増加し、推論時間は小さくなる。しかしあるところからは並列化による高速化の効果は急激に低下する。また、同じTr数で面積法の推論時間はmin-max重心法の1/10である。

この検討結果をもとに、回路規模と推論速度を両立できる構成を採用した。複数入力に対する最小値選択は並列処理に、ファジィルール処理は逐次処理に、デファジィ化は面積法を用いることにした。

3.2 メンバーシップ関数

これまでのファジィ推論LSIでは、各入出力メンバーシップ関数は、各ルールのなかで記憶されていた。ルール数の少ない場合は、この方法でも問題ないが、多くのルールを持つ仕様ではメンバーシップ関数を記憶するメモリが大きな領域を必要とする。例えば、入力変数が6、ルール条件部で記述される平均の入力変数が2であり、ルール数が100の場合、入力メンバーシッ



$$\theta_{out} = \frac{\sum_{i=1}^5 (\mu_i \times S_i \times \theta_i)}{\sum_{i=1}^5 (\mu_i \times S_i)}$$

μ_i : Grade value for each membership function
($\mu_1 = 0, \mu_2 = 0, \mu_3 = 0.3, \mu_4 = 0.5, \mu_5 = 0.5$)
 S_i : Area of each membership function
 θ_i : Center-of-gravity for each membership function

Fig. 1 Defuzzifier in the area method.

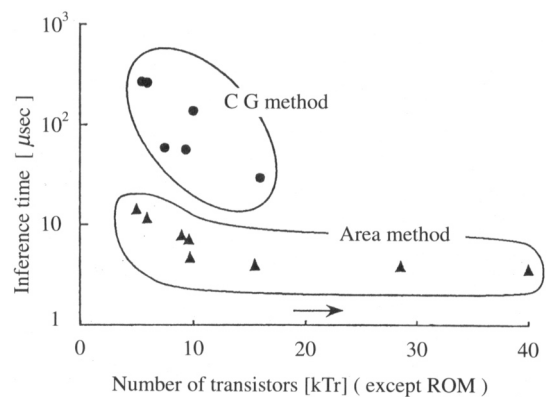


Fig. 2 Comparison between the C G method and the area method (condition of 4 inputs, 2 outputs and 30 rules).

ブ関数の数は200種になる。このような場合、同じメンバーシップ関数が異なるルールで重複して記憶される場合が多々出てくると思われる。そこで我々は入出力メンバーシップ関数とルールは分離して記憶することにした。この構成を採用すれば、上記の条件では入力メンバーシップ関数の数をたった42種類に削減できる。

3.3 学習制御機能

ドライバは、変速タイミング、ブレーキタイミング、加速制御といったドライバ自身のドライバモデルを持っているので、ドライバの好ましい運転性能に合わせるための学習制御が必要である。もし、自動運転制御に学習制御が適用されないならば、ドライバや同乗者は違和感を持つことになる。さらに、アクチュエータの個々の初期性能のばらつき、経時変化に適応するためにも学習制御は必要である。

学習制御機能を持たせることは、入出力メンバーシップ関数とルールをその場で修正することを意味している。しかしながら車載システムの学習データである膨大な量の入出力メンバーシップ関数とルールを単純に書き換え可能な形式で記憶し、必要に応じて書き換えるのは、必要メモリ量、書き換え時間の両面から望ましいことではない。メンバーシップ関数とルールの書き換えに対する考え方を以下に示す。

〔入力メンバーシップ関数〕

入力メンバーシップ関数のメモリサイズは6入力変数、各入力変数に対し7種のメンバーシップ関数、そして各入力メンバーシップ関数の適合度を4ビット分

解能とすると42Kビットになる。この入力メンバーシップ関数をデュアルポートRAMとしてLSIへ内蔵しようとするチップサイズが非常に大きくなる。また、学習による書き換え時間も長くなる。そこで入力メンバーシップ関数は、外付EPROMを使い、学習機能については、入力メンバーシップ関数の種類を14種類に増やし、ルールを書き換えることで実現することにした。

〔出力メンバーシップ関数〕

2出力変数、各出力変数に対する出力メンバーシップ関数の数を7としたとき、メモリサイズは224ビットにすぎない。これは、面積法では各出力メンバーシップ関数はメンバーシップ関数の面積と座標の2つのデータで表現できるからである。そこで、デフォルト用ROMと学習機能対応RAMの両方をLSIに内蔵することにした。

〔ルールメモリ〕

256ルール、6入力変数の各々に対し14種類の入力メンバーシップ関数、2出力変数の各々に対し7種の出力メンバーシップ関数という条件のとき、メモリサイズは7,680ビットである。ルールメモリについても、デフォルト用ROMと学習機能対応RAMの両方をLSIに内蔵することにした。

3.4 LSIの設計、試作

Table 1の仕様を持つファジィ推論LSIを、シリコンコンパイラツールGENESILを用いて設計した。設計ルールには、1.5 μ m CMOSルールを用いた。LSIのブロック構成をFig. 3に示す。LSIの特徴は以下の様である。

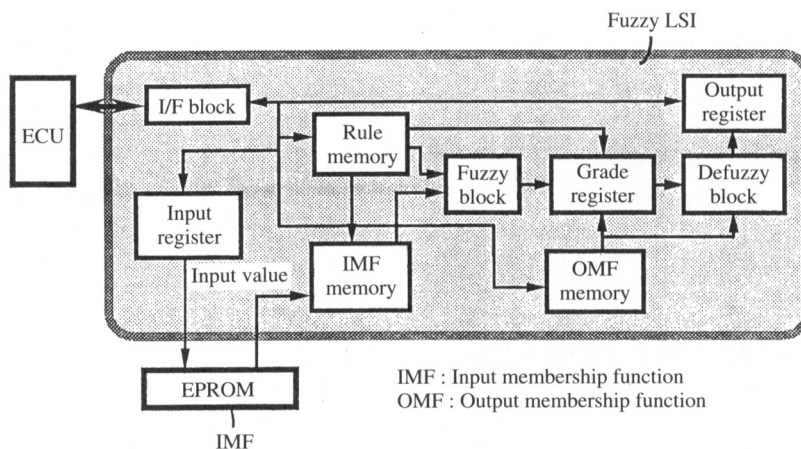
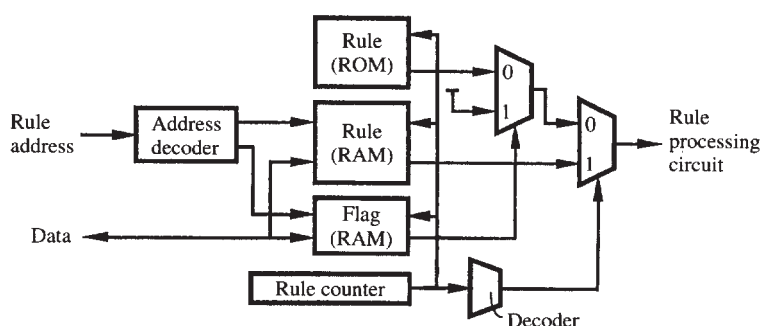
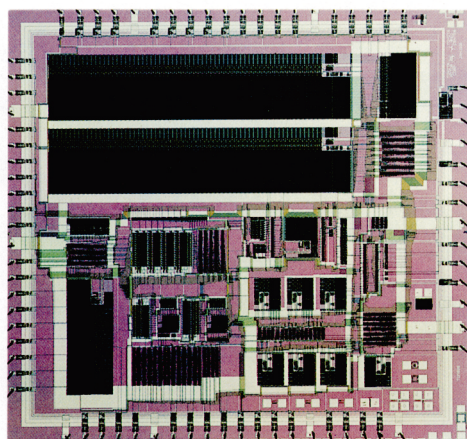


Fig. 3 Block diagram of the fabricated fuzzy inference LSI.

Table 3 Characteristics of the fabricated fuzzy inference LSI.

Input variables	6
Output variables	2
Production rules	256
Rule processing	Min-Max
Defuzzifier	Algebraic-product / area center-of-gravity
Inference speed	63 μ sec (5MHz clock)*
Chip size	10.7mm $\times$ 10.9mm
Number of transistors	140,000
Process technology	1.5 μ m CMOS
Interface	8-bit custom μ p / 16-bit μ p M68000
Minimum system structure	Two chips fuzzy LSI + EPROM(IMF)

* Condition of 6 inputs, 2 outputs and 256 rules

**Fig. 4** Relation between default ROM and RAM for learning function.**Fig. 5** Microphotograph of the fabricated fuzzy inference LSI.

(1)装置組み込みタイプ

ファジィ推論LSIとEPROMの2チップでファジィ推論を実行できる。

(2)高速推論

ルールに対する適合度の最小値を選択する部分の並列処理化とデファジィ化処理に面積法を用いることで高速推論を達成している。

(3)学習機能

デフォルト用ROMと学習機能用RAMの関係を**Fig. 4**に示す。

LSIの特性を**Table 3**に、試作したLSIの顕微鏡写真を**Fig. 5**に示す。チップサイズは、10.7mm $\times$ 10.9mm、T_r数は約140,000である。

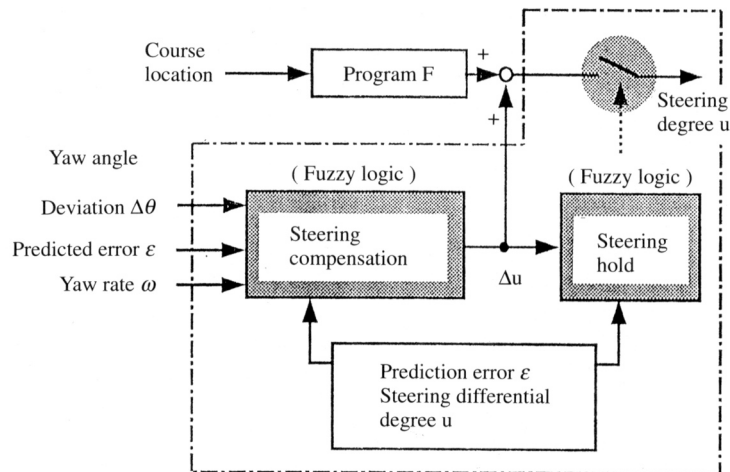


Fig. 6 Block diagram of fuzzy steering compensation.

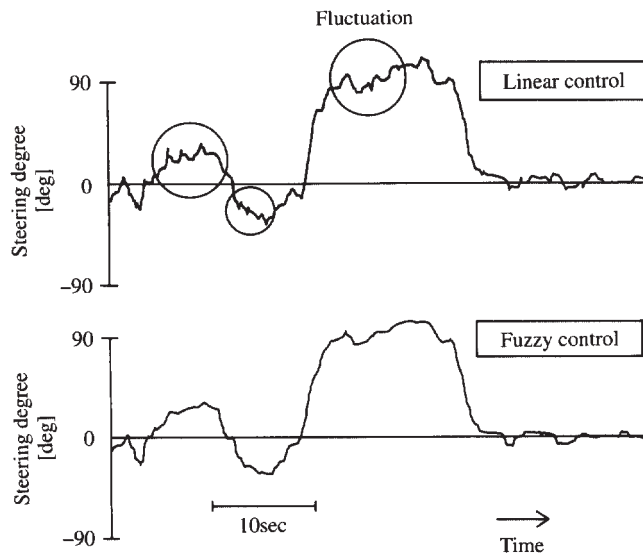


Fig. 7 Control results (comparison between linear and fuzzy control).

4. 適用実験

試作したファジィ推論LSIをECU (Electronic Control Unit) に接続し、悪路耐久運転試験^{1,2)}に適用した。この試験はファジィ制御で人間の運転操作と同等の自動運転を目指したものである。試験システムでは、Fig. 6に示すように、ファジィ制御を操舵補正に適用している。

Fig. 7は、従来の線形制御とファジィ制御の操舵制御結果を比較したものである。線形制御では、振動的な操舵補正になっているが、ファジィ制御ではスムーズな制御ができるようになった。

Fig. 8は、テストコース1周分の操舵補正の頻度を累計で示している。補正操舵角は、操舵角の極大と極小の差を表している。図中の a_1 , a_2 , a_3 , a_4 は、補正操舵角を示している。操舵パターンにおける類似性は

操舵切り替え（補正操舵）の頻度で評価した。Fig. 8から、線形制御では 30° 以下で高い頻度で操舵補正しているのに対して、ファジィ制御は補正頻度が低く、操舵補正の累計は 20° 以下で線形制御に比べ約1/3であり、人間の運転操作に近い操舵結果が得られた。

5. 考察

試作ファジィLSIでは、その設計仕様を各種の車載実験に適用できるように大きくしたため、チップサイズが大きく、これを自動車用LSIとしてそのままの形で製品化することは、コスト的に難しい。そこで、ファジィLSI小型化のための検討を行った^{20, 21)}。

〔仕様の再検討〕

試作ファジィLSIでは、複数の制御に対応できるように、入力変数、ルール数等の設計仕様は最大値を選択したけれども、製品化段階では、用途が限定されるため試作LSIよりも仕様は削減できる。そこで我々は、入力変数4、出力変数2、ルール128というファジィ推

論仕様を想定し、検討を進めた。

〔演算に対するアーキテクチャの再検討〕

試作したファジィLSIの推論時間は6入力変数、2出力変数、256ルールの場合、 $63\mu\text{sec}$ である。自動車用途での要求推論時間は $200\mu\text{sec}$ 以下であり、推論時間はもう少し長くてもよい。そこで推論時間よりもTr数の削減を重視してアーキテクチャを見直した。例えば、試作ファジィLSIでは2つの出力変数用に2つのデファジィ化回路を持たせていたが、再検討したファジィLSI（以下、小型化ファジィLSIと呼ぶ）ではルールを逐次処理することでデファジィ化回路は1つとした。小型化ファジィLSIのブロック図をFig. 9に示す。

〔メモリデータの変更〕

仕様の削減、逐次処理化による回路規模の削減のみでは小型化の効果は大きくはない。そこで、メモリ部の構成変更による回路規模削減について検討した。入力メンバーシップ関数は、試作LSIではすべての入力値に対しテーブルデータとして記憶している。この方

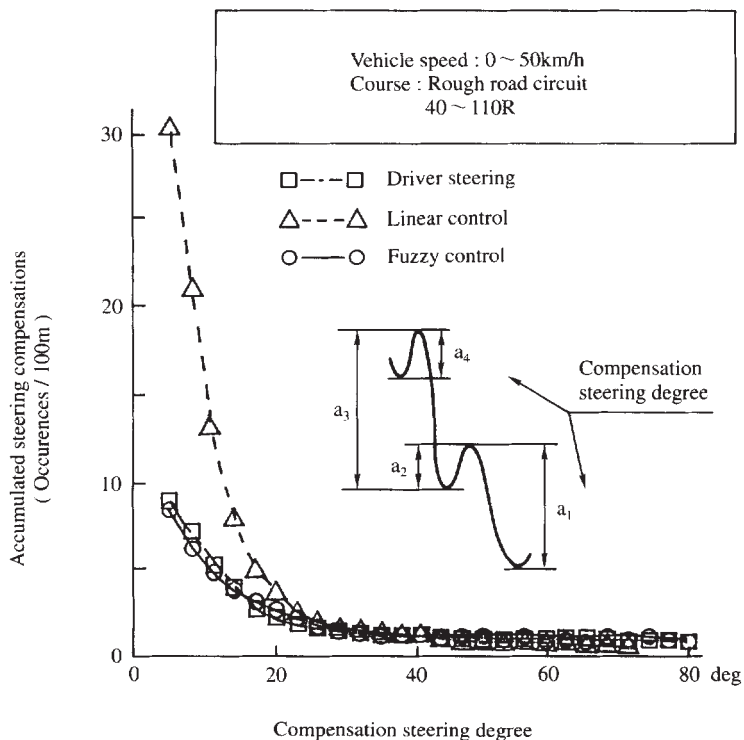


Fig. 8 Comparison of steering pattern using actual vehicle.

法では、入力メンバーシップ関数は任意の形状を表現できるけれども、入力変数の分解能に比例したメモリ領域が必要である。これに対し現状の用途では、入力メンバーシップ関数の形状は三角形か台形になっている。そこで、入力メンバーシップ関数の形状を三角形か台形に限定することでメモリ容量の削減をはかった。これにより各入力メンバーシップ関数のデータは2つの傾きと1つの頂点座標の3つの値で表現でき、総メモリ領域は、8%に削減できる。このメモリのほかにFig. 10に示す適合度を求めるための演算回路が必要であるが、その回路は3,000Tr程度で実現できる。

また、ルールメモリ部については、完全並列にROMとRAMを持たせる方式からROMとRAMを直列

に置く方式に変更した。この方式は、ファジィ推論がルールの実行順序には影響しない性質を利用して学習制御機能を実現している。すなわちROMに対しては、そのルールを用いるか用いないかのフラグビットを持たせることで、ルールの消去（ROMルールのフラグを立てる）、追加（RAMにルールを書き込む）、変更（ROMルールのフラグを立て、RAMにルールを追加する）を可能にしている。

小型化ファジィLSIの特性をTable 4に、レイアウト図をFig. 11に示す。1.5 μ m CMOSルールで設計した結果、4.8mm $\times$ 4.8mmのサイズにすることができた。我々はこのレイアウトをマイクロプロセッサに内蔵することを考えている。

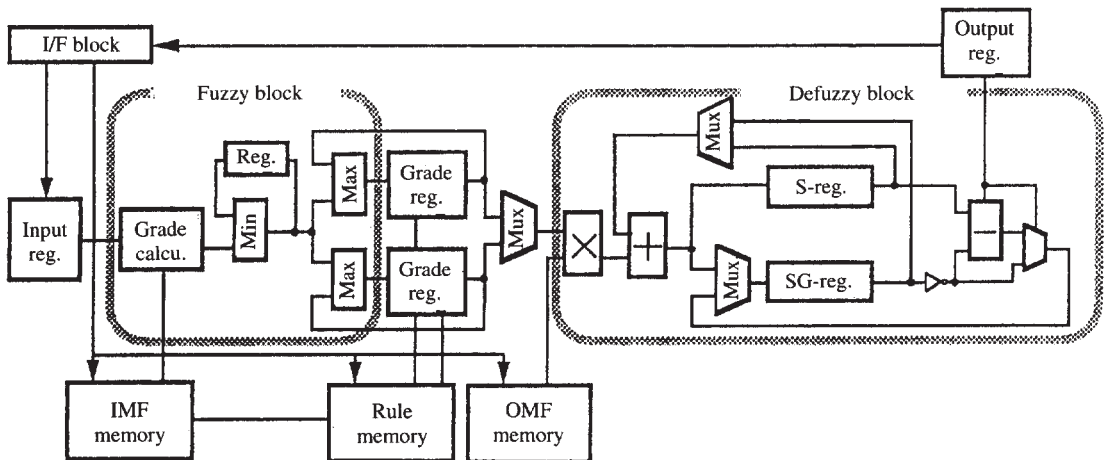


Fig. 9 Block diagram of the modified fuzzy inference LSI.

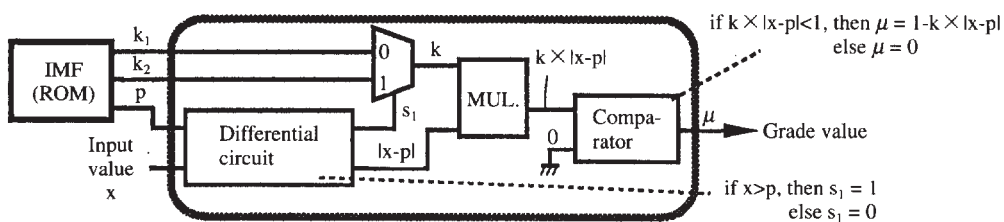


Fig. 10 Calculation circuit for grade value.

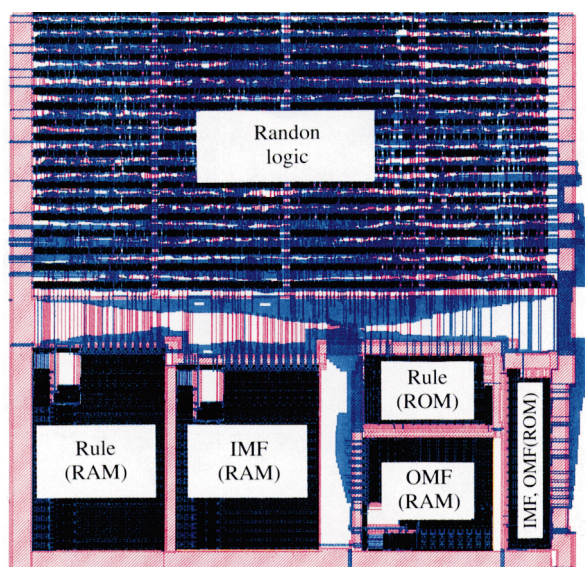


Fig. 11 Layout of the modified fuzzy inference LSI.

6. まとめ

自動車用のファジィ推論LSIの仕様を検討し、各種車載実験に利用するために1.5 μ m CMOSプロセス技術を用いてファジィ推論LSIを試作した。試作したファジィLSIを悪路耐久運転試験に適用し、ファジィ操舵制御で人間の操舵と同等の操舵補正ができることを確認した。さらに低コスト化のためのLSI小型化の検討を行った。その結果、ファジィ推論コプロセッサとしてマイコンに内蔵可能なサイズ（4.8mm $\times$ 4.8mm）まで小型化できることを確認できた。

謝辞

仕様の検討および適応実験においてはトヨタ自動車(株)重松崇氏、橋本佳幸氏に、重要なお助言、ご協力を頂きました。

参 考 文 献

- 1) Zadeh, L. A. : "Fuzzy Sets", Inf. and Control, **8**(1965), 338～358
- 2) Takahashi, H., Eto, Y., Takase, S., Murakami, S. and Maeda, M. : "Application of a Self-Tuning Fuzzy Logic System to ASCD", SICE'87, **26**-2(1987), 1241～1244
- 3) 瓜生原信, 服部俊宏, 森出茂樹 : "ファジィ制御を用いたオートクルーズの開発", 自動車技術, **42**-2(1988), 224～230

Table 4 Characteristics of the modified fuzzy inference LSI.

Input variables	4
Output variables	2
Production rules	ROM 128 RAM 32
Inference	1
Design rule	1.5 μ m CMOS
Chip size	4.8mm $\times$ 4.8mm
Number of transistors	15,000Tr
ROM	4,000Tr
RAM	17,000Tr
Expected inference time*	140 μ sec

* Condition of 4 inputs, 2 outputs and 160 rules

- 4) Muller, R. and Nocker, G. : "Intelligent Cruise Control with Fuzzy Logic", Intell. Veh. '92, (1992), 173～178
- 5) 前田幹夫, 村上周太 : "ファジィ論理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), 61～66
- 6) Uyeda, Y. : "Improvement of Chassis Control by a Fuzzy Controller", IEEE Fuzzy and Neural Syst., and Veh. Appl., pap. #2, (1991)
- 7) Jang, J. R. : "A Self-Learning Fuzzy Controller with Application to Automobile Tracking Problems", ibid pap. #10, (1991)
- 8) 長岡満, 松岡俊弘, 角田鎮男 : "ファジィ制御による自動車のトラクション最適化制御", 日本機械学会講演論文集, vol.3, (1987), 195～200
- 9) Sakai, I., Arai, Y., Hasegawa, Y., Sakaguchi, S. and Iwaki, Y. : "Shift Scheduling Method of Automatic Transmission Vehicles with Application of Fuzzy Logic", 23rd FISITA Congr. Tech. pap. No.905049, (1990), 5p.
- 10) 池田博, 平本行雄, 金須則之, 高橋宏, 坂上信介 : "インテリジェントA/T制御とファジィプロセッサの開発", 自動車技術, **46**-4(1992), 5～9
- 11) 平子敦史, 高山見, 土手康彦, 林弘毅 : "ファジィ理論による変速タイミングの改善", 自動車技術, **46**-5(1992), 100～104
- 12) Hashimoto, Y., Sigematsu, T., Ohnishi, K. and Ohta, N. : "Application of Fuzzy Algorithm to Automatic Steering Control", IEEE Fuzzy and Neural Syst., and Veh. Appl. '91 pap. #11, (1991)
- 13) Watanabe, H., Dettloff, W. D. and Yount, K. E. : "A VLSI

Fuzzy Logic Controller with Reconfigurable, Cascadable Architecture", IEEE J. Solid State Circuits, **25**-2(1990), 376～382

- 14) 特集: "その後のファジィ制御(実践編)", エレクトロニクス, **36**-11(1991), 40～68
- 15) 戸貝方規: "半導体化進むファジィビジネス", エレクトロニクス, **37**-1(1992), 8～9
- 16) 太田則一, 伊藤忠, 原田義久, 早川清春, 橋本雅文, 橋本佳幸, 重松崇: "自動車用ファジィ LSI", 1992年電子情報通信学会春季全国大会講演論文集, (1992), 5-198
- 17) Mamdani, E. H.: "Advances in the Linguistic Synthesis of Fuzzy Controller", Int. J. Man-Machine Studies, **8**-6(1976), 669～679
- 18) 菅野道夫: ファジィ制御, (1988), 84～90, 日刊工業新聞社
- 19) 水本雅晴: "わかりやすいファジィ制御 III", Computrol, **28**(1989), 9～13
- 20) 太田則一, 原田義久, 長瀬宏: "自動車用ファジィ LSIの検討(2)", 1993年電子情報通信学会春季全国大会講演論文集, (1993), 5-225
- 21) Harata, Y., Ohta, N., Hayakawa, K., Shigematsu, T. and Kita, Y.: "A Fuzzy Inference LSI for an Automotive Control", IEICE Trans. Electron., **E76**-C-12(1993), 1780～1787
- 22) Herbert, P. E., Thomas, N. K. and Martin, G. K.: "An 8b Fuzzy Coprocessor for Fuzzy Control", ISSCC Dig. of Tech. pap., (1993), 180～181
- 23) Kazuo, N., Narumi, S., Yasuhiko, N., Kenichi, S., Takio, O., Koji, E. and Takeshi, T.: "A 12b Resolution 200kFLIPS Fuzzy Inference Processor", ISSCC Dig. of Tech. pap., (1993), 182～183

著 者 紹 介



太田則一 Norikazu Ohta

生年：1963年。
所属：回路設計研究室。
分野：LSIの論理設計，高温動作LSIに関する研究。
学会等：電子情報通信学会会員。



原田義久 Yoshihisa Harata

生年：1949年。
所属：ソフトウェア研究室。
分野：自動車用LSI，信号処理，自動車用ECUアーキテクチャーの研究。
学会等：電子情報通信学会，自動車技術会，IEEE会員。
1984年10月IEEE ICCP'84優秀論文賞受賞。



早川清春 Kiyoharu Hayakawa

生年：1948年。
所属：デバイス開発室。
分野：CMOS・LSIプロセス技術の研究。
学会等：応用物理学会会員。