

ルール切り替えを考慮したファジイ推論による 模型自動車の走行制御シミュレーション

西守 克己・西村 亮・石原 永伯・冨永 暖・宮内 肇^{*1}
電気電子工学科・^{*1}松江高専

Optimization of Transition Timing between Control Rules
on Driving Simulation of a Model Car
Katsumi NISHIMORI, Ryo NISHIMURA, Naganori ISHIHARA,
Dan TOMINAGA and Hajime MIYAUCHI^{*1}

Department of Electrical and Electronic Engineering, Faculty of Engineering,
Tottori University, Tottori 680, Japan

^{*1} Matsue National Collage of Technology, Matsue 690, Japan

Abstract: We have applied fuzzy theory to construct operation timing in a programmable driving control of a model car. The control rules have been described as fuzzy rules. In this paper, the fuzzy rules are combined by the methods which have so far been proposed. These combined rules work for steering operations. Transition timing between the rules is also considered by using fuzzy theory. It is shown that the curve rules and the straight-forward rules should be combined by fuzzy switching method in order to smoothly carry out the steering operation.

Key Words: Fuzzy control, Combined rules, Transition timing, Driving control, Computer simulation

1. はじめに

これまでに数多くのファジイ推論の方法が提案されている。また、それら個々の推論方法において、ルール数およびメンバーシップ関数の形状などについて種々の自動チューニング法が考案されている。自動チューニング法の例として、ニューラルネットワークや遺伝アルゴリズム(GA)を用いた手法が提案されているが、入出力数が増加するにしたがって必要とされる推論ルール数が増加してしまい、結果として推論に要する時間が大きくなってしまう場合がある[1]。

本研究では模型自動車の右折走行制御において、よく知られているファジイ推論の手法を適切に組み合わせ、また、複数のファジイ推論を混合することで推論ルール数を増大させることなく効率の良いファジイ制御を行うことを目的としている。

2. 自動車の走行モデル

模型自動車がL字形の右カーブを曲がる場合の制御を考える。制御量は車の位置(x, y)と方向θであり、図1のように設定する。コーナー部の

中央線から車体の中心までの距離をx, 直進部の中央線から車体の中心までの距離をy, 車体のx軸に対する傾きをθ[deg], ハンドル切り角をφ[deg]とする。x軸は図の右側を、y軸は下向きを正にとる。車体角度θとハンドル切り角φは右回りを正の方向とする。走行シミュレーションでは車体の位置および角度を次式で与える。

$$\theta_n = \theta_{n-1} + \left(\frac{v\tau}{L}\right)\phi_n \quad (1)$$

$$x_n = x_{n-1} + v\tau \cos \theta_n \quad (2)$$

$$y_n = y_{n-1} + v\tau \sin \theta_n \quad (3)$$

ここで、v: 車体移動速度 τ: 推論時間間隔
L: 模型自動車の車長
角度: radian に変換して計算

式中における操作量はハンドル切り角φのみとする。自動車の走行制御の構成図を図2に示す。

計算にあたり、以下の過程を設ける。

(1) 実質的なファジイ推論に要する時間は無視で

- きるものとし、時間 τ ごとに推論結果に応じてハンドルが切られる。
- (2) ハンドルは瞬時に切られ、時間遅れは無視できる。
- (3) 速度 v は一定で、車と走行路との摩擦は無限大とし、車はスリップしないものとする。

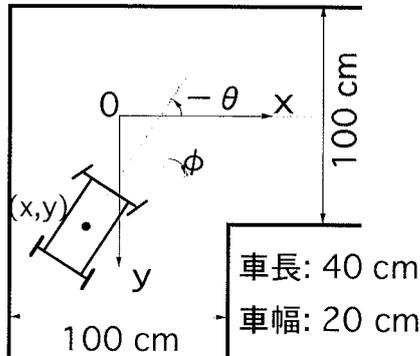


図1 模型自動車の位置と方向

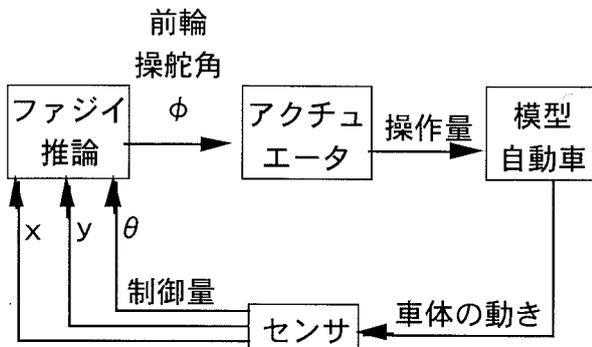


図2 模型自動車の走行制御の構成図

3. 走行制御法および制御法の評価

3.1 走行制御規則および推論法

車は右折後に直線部の中央線上に収束するように運転するものとし、運転制御方法はカーブ用、直進用の2種類を用意する。車は y 軸方向の遠方から原点に向かって走行し、ある程度原点に接近したときに旋回を行う。旋回時に x および θ がある値になったときに旋回が終了したもののみなし、直進用のファジィ制御に切り替える。なお、カーブ時には (i) カーブ走行制御ルールのみを用いる場合、および (ii) カーブ走行制御ルールと直進制御走行ルールを重みをつけて混合する場合、

の2種類についてシミュレーションを行った。

カーブ走行制御ルールおよび直進走行制御ルールのルール表(車体位置とハンドルを切る方向の関係)を表1、表2に示す。これらの表に示すように、カーブ走行は5種類、直線走行は4種類のルールのみである。制御ルールは前件部を車体の状態、後件部をハンドルの切り方とする if-then 型式で表記される。カーブ走行時の車体の位置は y 座標を S (x 軸に近い) および B (遠い)、 x 座標を R (y 軸の右側) および L (左側) で表現し、直進走行時には y 座標を DL (車体が左側) および DR (右側)、車体の傾き θ を TZ (傾きなし)、 TL (左向き)、 TR (右向き) で表現する。ハンドルの切り方は HR (右に切る) および HL (左に切る) で表現する。また、それぞれのルールに用いたファジィ集合のメンバーシップ関数を図3、図4に示す。これらの図に示されるように、ハンドル切り角 ϕ の具体的な値は最大切り角 ϕ_m を用いて表現されるメンバーシップ関数を用いて決定する。ハンドル切り角 ϕ の決定には表3に示す4種類の推論法を用い、制御性を比較する。各推論法において、ハンドル切り角のメンバーシップ関数は、図5に示す手順で、ハンドル最大切り角 ϕ_m を 20° から 120° まで 0.5° 刻みで総当たりに変化させ、次節で述べる評価法を用いた場合の総合評価値が最小となる値を採用することによってチューニングを行う。

表1 カーブ走行制御ルール

$z \backslash y$	S	B
L	HR	HR
R	HR	HL

表2 直進走行制御ルール

$y \backslash \theta$	TL	TZ	TR
DL	HR	HR	HL
DR	HR	HL	

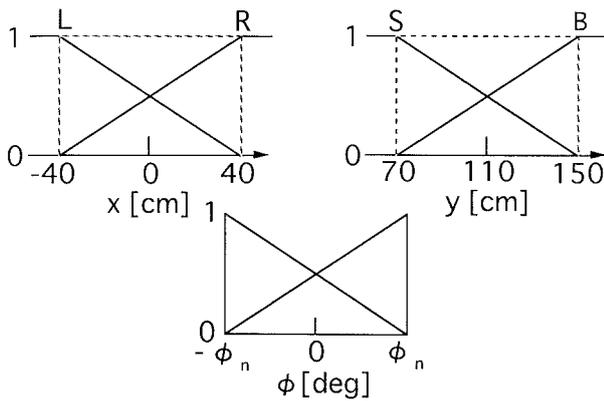


図3 カーブ走行制御ルールのためのメンバーシップ関数

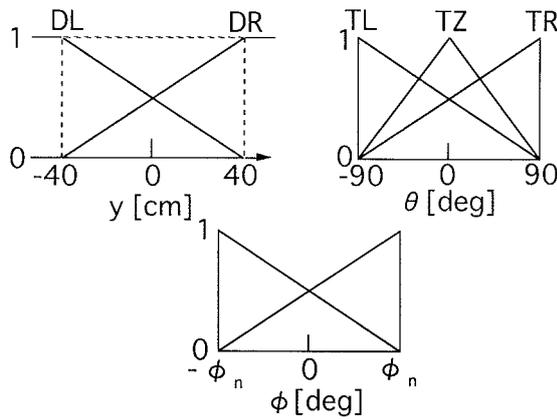


図4 直進走行制御ルールのためのメンバーシップ関数

表3 用いた推論法

方法	前件部	後件部	統合法	非ファジイ化	備考
[A]	論理積	論理積	論理和	重心法	マムダニ法 ^[2]
[B]	代数積	代数積	論理和	中央値法	
[C]	代数積	代数積	加算	重心法	水本法 ^[3]
[D]	代数積	(塚本法 ^[4])			

3.2 制御性の評価方法

各推論方法による制御性を比較, 検討する際に, 模型自動車が目標となる x 軸上に収束するまでの推論回数, 車体角度変化量の絶対値の総和, およびハンドル切り角の最大変化量の絶対値の3つを評価パラメータとして用い, 総合評価を行った.

推論回数については, 模型自動車が x 軸から 0.1 cm 以内に収束するまでの推論回数を N とする. この値が小さいほど早く x 軸上に収束し, 制

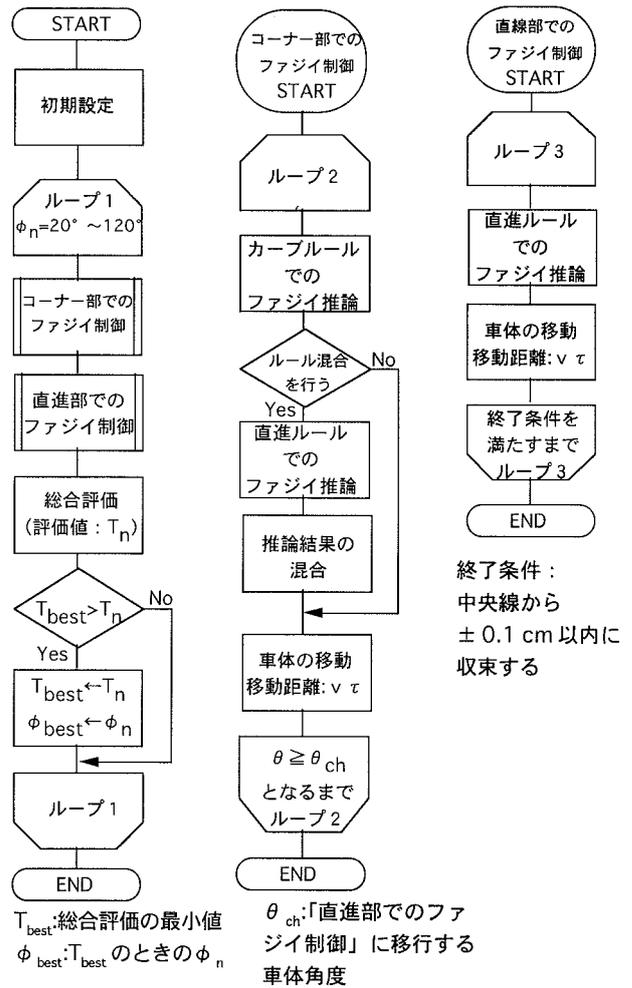


図5 後件部メンバーシップ関数のチューニングの流れ図

御性がよいことを意味する. 車体角度変化量の絶対値の総和については, 推論時における車体角度変化量を $\Delta\theta$ とした場合, $\Delta\theta$ の絶対値の総和が 90° となるのが最も理想的である. したがって, $\Delta\theta$ の絶対値総和が 90° に近いほど滑らかに, かつ蛇行せず x 軸上に収束することを表す. ハンドル切り角の最大変化量の絶対値については, 自動車が低速の一定速度で移動する場合, 車体にかかる力の変化を小さくし, 滑らかに移動するためにはハンドル切り角の変化量 $\Delta\phi$ を小さくすればよ

い。この評価値が0に近いほど、自動車が滑らかに（急ハンドル操作を行うことなく）移動することを意味している。

以上の3つのパラメータを用いて総合評価を行う。総合評価値 T_n を次式で定義する。この値が小さいほど制御性が良いと考えられる。

$$T_n = \frac{N}{N_{\max}} + \frac{\sum |\Delta\theta| - 90}{\left(\sum |\Delta\theta| - 90\right)_{\max}} + \frac{|\max \Delta\phi|}{|\max \Delta\phi|_{\max}} \quad (4)$$

ここで、下付き添字 max は、チューニング範囲内におけるそれぞれの評価指標の最大値である。

4. シミュレーション

4.1 解析条件

シミュレーションで用いた車体、通路、推論時間間隔に関する数値条件を表4に示す。

表4 数値条件

模型自動車の車長 L	40 cm
車幅	20 cm
車体移動速度 v	100 cm/s
道幅（旋回前）	100 cm
道幅（旋回後）	100 cm
推論時間 τ	0.1 s

走行シミュレーションは、 y 軸上の直進走行制御状態からカーブ走行制御状態に移る時点から、旋回後に車体が x 軸から 0.1cm 以内に収束するまで行う。想定した初期値、つまりカーブ走行制御状態に移る位置は、 y と θ をそれぞれ $y_0 = 150$ cm, $\theta_0 = -90^\circ$ に固定し、 $x_0 = 39, 30, 20, 10, 0, -10, -20, -30, -39$ cm の9種類とした。

旋回時にカーブ走行ルールのみを採用する場合、カーブ走行制御ルールから直進走行制御ルールに切り替えるタイミングを車体角度が $\theta \geq -15^\circ, -10^\circ, -5^\circ, 0^\circ$ となる瞬間とする。

また、旋回時にカーブ走行制御ルールと直進走行制御ルールを混合させる場合には図6に示すメ

ンバーシップ関数を用いて、次式のように重みをつけてハンドル切り角 ϕ を決定する。

$$\phi = \frac{W_{xs}\phi_s + W_{xc}\phi_c + W_{\theta s}\phi_s + W_{\theta c}\phi_c}{W_{xs} + W_{xc} + W_{\theta s} + W_{\theta c}} \quad (5)$$

ここで、 ϕ : 直進ルールにおける切り角

ϕ_s : カーブルールにおける切り角

重みをつける場合は(i) x 方向に対して重みをつける(ii) θ に対して重みをつける(iii) x と θ 両方に重みをつける方法の3通りのルール混合についてシミュレーションを行う。このとき、たとえば x に対してのみに重みをつける場合は、式(5)における $W_{\theta s}$ と $W_{\theta c}$ を0として計算を行う。

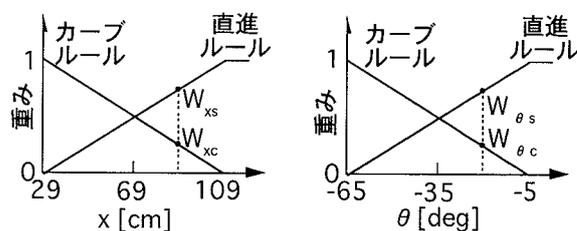
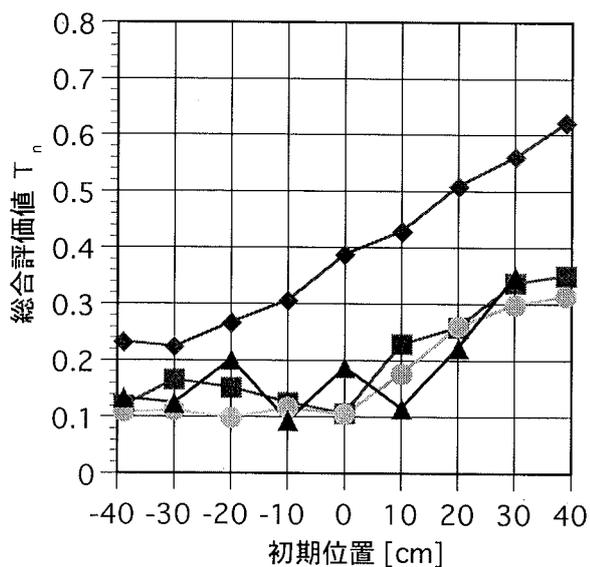


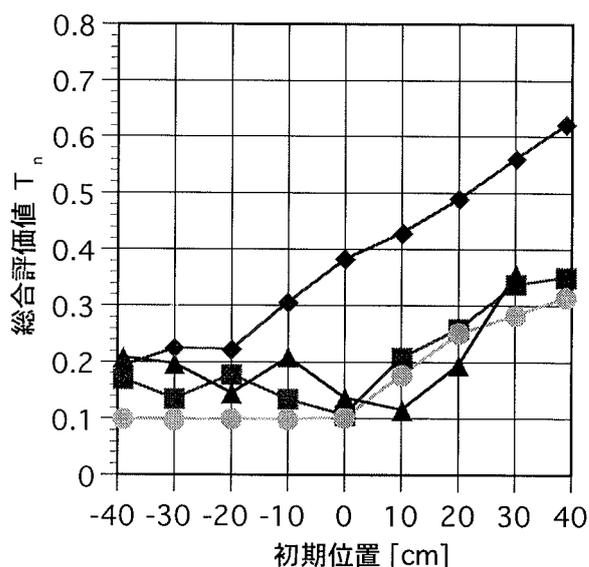
図6 重みづけに用いたメンバーシップ関数

4.2 各種ファジィ推論法の制御性の比較

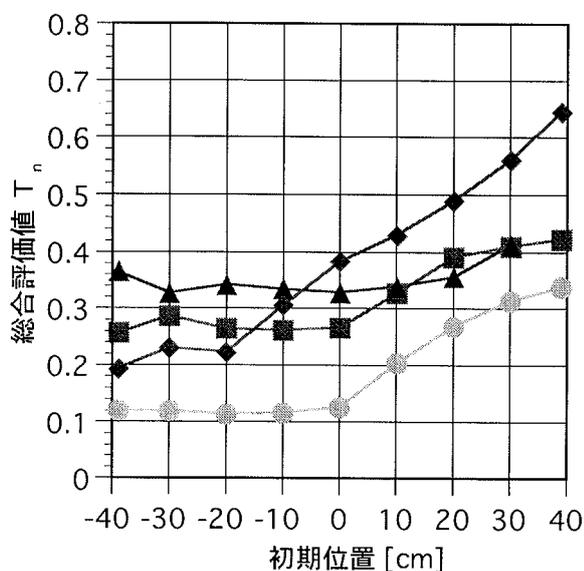
表3に示した4種類の推論方法において、最適化を行った総合評価値 T_n を初期位置ごとにプロットしたものを図7および図8に示す。図7すなわち旋回時にカーブルールのみを採用する場合においては、ルール切り替えの角度が $\theta = 0^\circ$ および -5° の場合には推論方法[B]および[C]で良好な制御性（値の小さい T_n ）が得られ、 $\theta = -10^\circ$ および -15° の場合には推論方法[B]で良好な制御性が得られた。しかし、 $\theta = 0^\circ$ および -5° の場合には推論方法[C]は初期位置による制御性の変動が顕著であった。また、推論方法[B]はルール切り替え角度が変化による制御性の変動が小さいが、推論方法[C]は変動しやすいことがわかる。図8（旋回時にルールを混合する場合）においても推論方法[B]の制御性が良好であり、特に θ に対して重み付けを行った場合の制御性が良好であった。図9に、 $x_0 = 30$ cmの場合に推論方法[B]を採用した場合の収束までの走行軌跡を示す。図中の点線は直進ルールのみでの制御になる位置を示



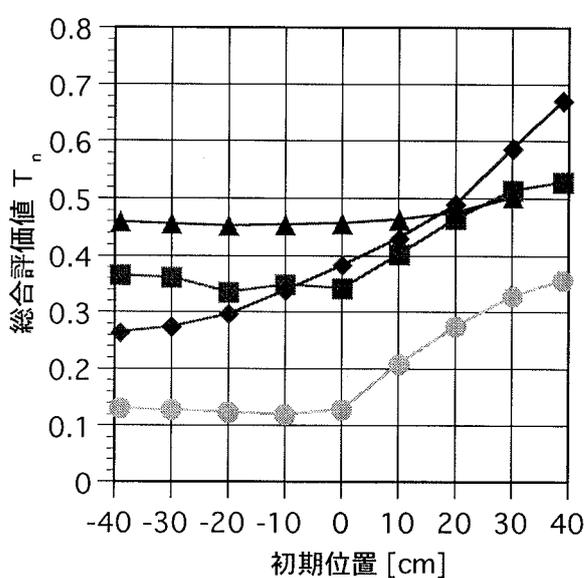
(a) ルール切り替え角度 $\theta = 0^\circ$



(b) ルール切り替え角度 $\theta = -5^\circ$



(c) ルール切り替え角度 $\theta = -10^\circ$



(d) ルール切り替え角度 $\theta = -15^\circ$

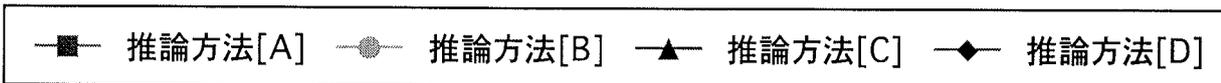
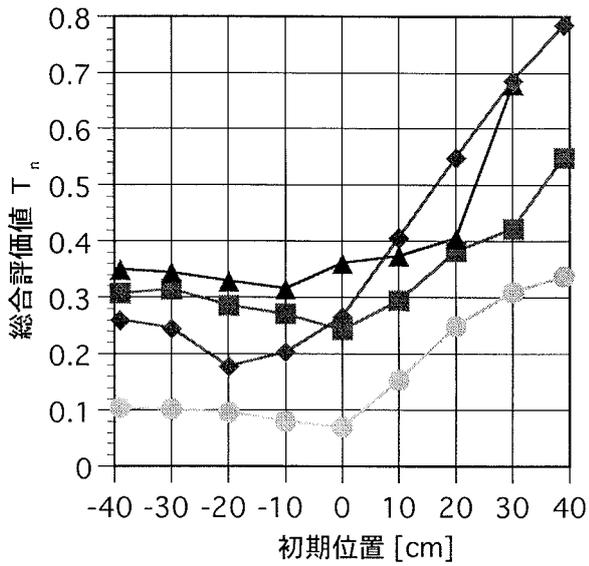
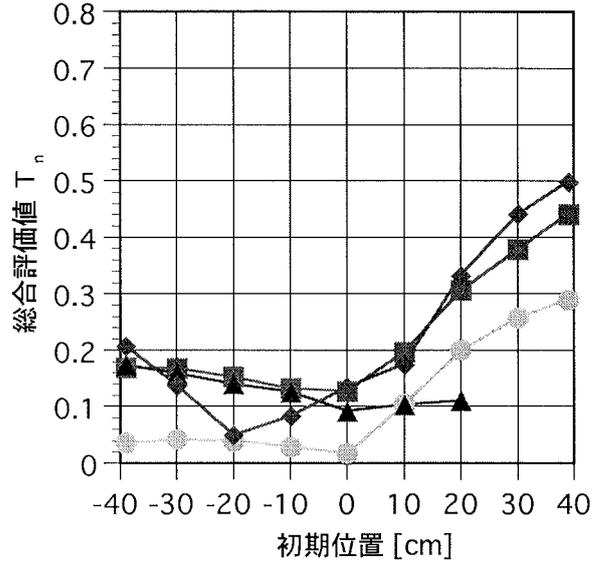


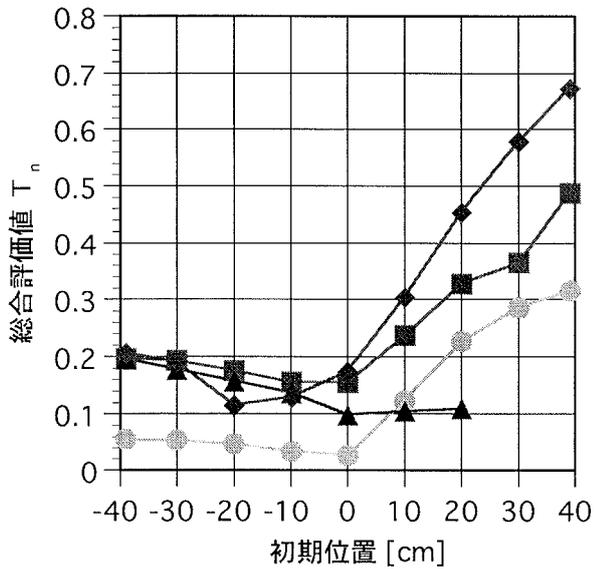
図7 旋回時にカーブルールのみを採用する場合の初期位置と総合評価値の関係



(a) x に対して重みづけ



(b) θ に対して重みづけ



(c) x と θ に対して重みづけ

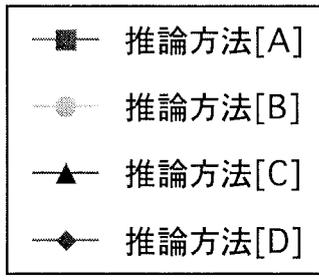
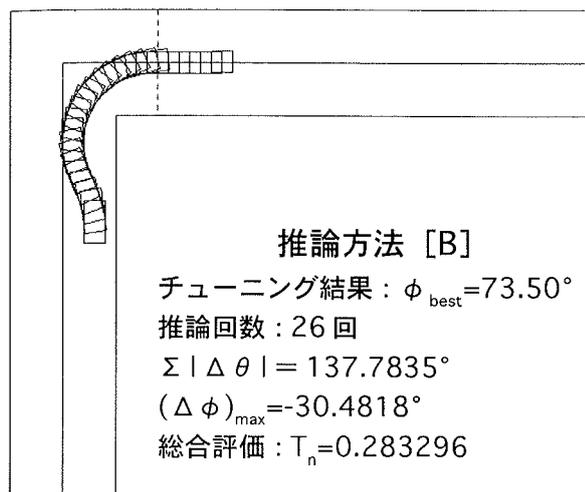
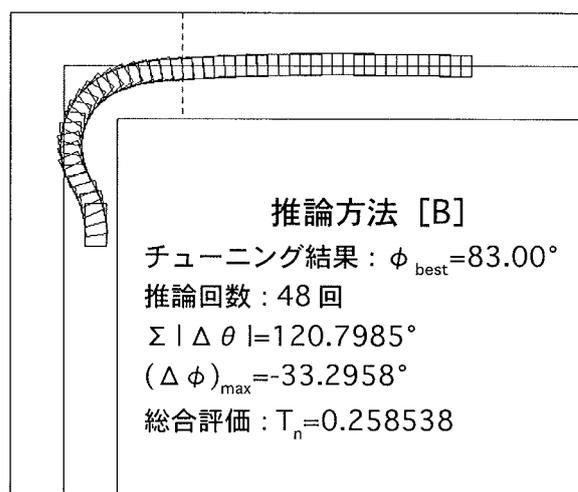


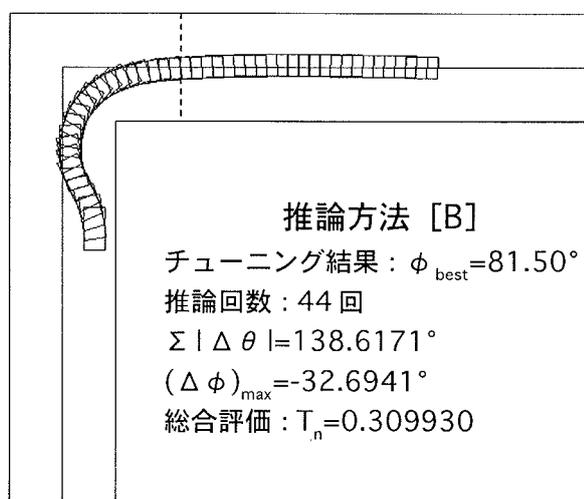
図8 旋回時にルール混合(重みづけ)を行う場合の初期位置と総合評価値の関係



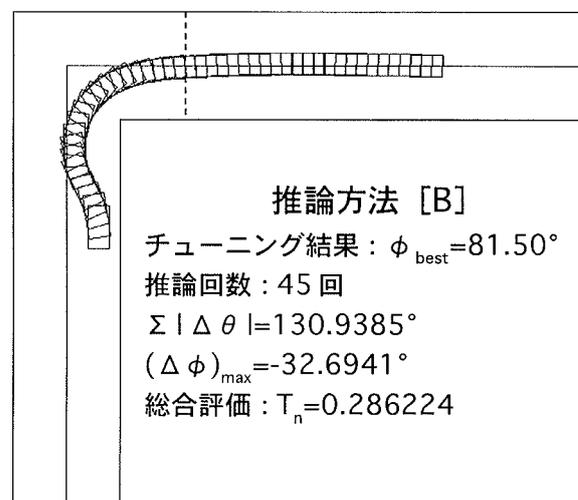
(a) ルール混合なし
(ルール切り替え角度 $\theta = -5^\circ$)



(b) θ で重みをつけたルール混合の結果



(c) x で重みをつけたルール混合の結果



(d) x と θ で重みをつけたルール混合の結果

図9 車体の移動軌跡 ($x_0 = 30$ cm)

す。

図10に $x_0 = 0$ cmの初期条件でルール混合を行わない場合(ルール切り替え角度 -5°) および x と θ について重みをつけてルール混合を行った場合の車体の移動距離とハンドル切り角 ϕ の関係を示す。旋回時にルール混合を行った場合、カーブルールのみの場合と比較してハンドルが滑らかに切られていることがわかる。

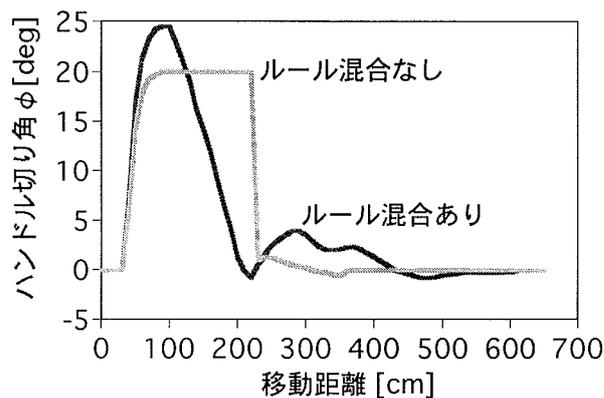


図10 移動距離とハンドル切り角の変化

5. まとめ

走行する模型自動車の旋回時のファジイ制御において、推論法を適切に選択することにより、推論ルール数を増加させずに制御性を高め、滑らかに曲がることを確認した。本研究での制御モデルに対してだけでなく、他の異なった制御モデルに対してもそれぞれに最適なファジイ推論法が存在すると考えられ、それを適切に選択することにより効率の良いファジイ制御を行えると考えられる。

参考文献

- [1] 井上博行, 亀井 且有, 井上和夫: 遺伝的アルゴリズムと超円錐型メンバーシップ関数によるファジイルール自動生成手法の提案, 日本ファジイ学会誌 Vol.8, No. 6, pp. 1104-1115, 1996.
- [2] E. H. Mamdani: Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant, Proc. Instn Elect. Engrs, vol. 121, No. 12, 1585, 1974.
- [3] 水本: ファジイ制御の改善法(IV)(代数積・加算・重心法による場合, 第6回ファジイシステムシンポジウム講演論文集, p. 9, 1990.
- [4] 菅野: ファジイ制御, 日刊工業新聞社, 1988.

(受理 平成9年8月22日)