

Fuzzy 制御による自動避航システムに関する研究

正会員 長谷川 和 彦 , 正会員 上 月 明 彦

**Automatic Collision Avoidance System for Ships Using Fuzzy Control**

*By Kazuhiko HASEGAWA (Member) and Akihiko KOUZUKI (Member)*

## Fuzzy 制御による自動避航システムに関する研究\*

正会員 長谷川 和彦\*\*, 正会員 上月 明彦\*\*\*

### Automatic Collision Avoidance System for Ships Using Fuzzy Control

By Kazuhiko HASEGAWA (Member) and Akihiko KOUZUKI (Member)

For the ultra automatic ship operating system, collision avoidance system is one of the most difficult problems. Usually highly experienced experts such as captains etc. can make a suitable decision considering various environmental conditions.

The authors propose an automatic collision avoidance system controlled by an on-board computer. The system contains of the following four parts; data acquisition from radar signal, decision of the collision risk, speed or course change command and course control autopilot. All parts except data acquisition are done by fuzzy reasoning or fuzzy control. Fuzzy control is quite similar to the human control and so flexible even to unexpected environmental changes.

First, system design is done and algorithms of each sub-system are described. It is not necessary to apply fuzzy control for course keeping and course changing, but we dare to apply it. Fuzzy control autopilot is very smooth and at the same time very quick for an abrupt course change.

Computer simulation is done for the various relative conditions of a target ship and the results are found to be reasonable and reliable as compared with human behaviour carried out at out ship handling simulator.

At last, the system is also applied to the collision avoidance very close to the course changing point or with conflicting behaviours of a target ship. For both cases, the system is found to be worked properly.

### 1. 緒 言

船舶の運航を自動化するに当たり、最も難しいものの一つに避航動作がある。相手船の運動性能、航路上、あるいは法的な規制もあり、船長などの経験に基づく高度な判断にゆだねられている。特に、東京湾や瀬戸内海等の輻輳した海域では、航路制約をも加味した避

航や、複数の船を順次、あるいは同時に避ける場合も考えられ、これを自動化するに当たっては、何らかの形でエキスパート・システムのような意志決定モデルが必要となろう。

ここでは、その手始めとして、一隻避航問題を取り上げ、与えられた航路を自動航行しながら、必要に応じて、避航意志および動作の決定から操舵指令まで含めた一連の動作が行える自動避航システムを構築した。状況判断や意志決定には人間の持つあいまいさや柔軟さに対応しやすく、かつ、エキスパート・システムへの接合性も考え Fuzzy (あいまい) 推論を、針路指令や操舵指令には、やはり、変針部から保針部へスムーズに移行させるため、Fuzzy 制御を用いた。

\* 昭和62年5月29日 関西造船協会春季講演会  
において講演

\*\* 大阪大学工学部

\*\*\* 三菱重工業(株) 神戸造船所  
(研究当時 大阪大学大学院工学研究科)

## 2. Fuzzy 制御

### 2.1 Fuzzy 理論

Fuzzy理論はもともと、あいまいな概念、事象を表すために Zadeh<sup>1)</sup>により数学的に厳密な方法で導入されたものである。その中で用いられたのが Fuzzy 集合である。通常の集合論では、ある要素  $a$  が集合  $A$  に属するか、しないかの二値的であるのに対し、Fuzzy 集合では、 $a$  が集合  $A$  に属する度合を  $\mu_A(a)$  として表す ( $0 \leq \mu_A(a) \leq 1$ )。この  $\mu_A$  のことを集合(実際には部分集合)  $A$  のメンバーシップ関数と呼ぶ。この関数形状を任意に変えることにより、種々の概念を表すことができ、しかも、概念の個人差といったものも簡単に表すことができる。例えば、Fig. 1 の実線は、「若い」という概念と「年をとった」という概念の一例を示したものであり、従来の集合論では扱えなかった 30代、40代の層があいまいに表現できていることがわかる。

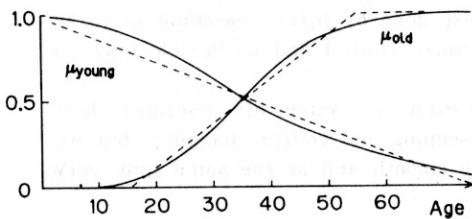


Fig. 1 An example of membership functions of the concepts "young" and "old"

こうした Fuzzy 集合の採用とその四則演算を定義することにより、その後、種々の分野で、Fuzzy理論が応用されるようになった。そのひとつが、Fuzzy推論であり、Fuzzy制御である。この二つは理論的には同じであり、ただ、制御則を一方では推論則、あるいはプロダクション・ルールと読みかえればよいだけなので、次節で、Fuzzy制御を例にとり、用語および手法の説明を行う。

### 2.2 Fuzzy 制御による制御の一例

#### —— 定点保持制御 ——

数直線上の区間  $[-1, 1]$  で、単位時間当たり  $[-0.2, 0.2]$  の一様外乱を受けて運動する点(変位  $x$ )を原点 0 に保持するための速度指令  $u$  を行う。今、指令位置との誤差(偏差)を  $e = x - 0$  とすると、 $e$  と  $\dot{e}$  により制御出力  $u$  を決める。

メンバーシップ関数および制御則を記述するために用いる言語変数として、次の 5 つをここでは定義する。

- NB : 負で大
- NS : 負で小

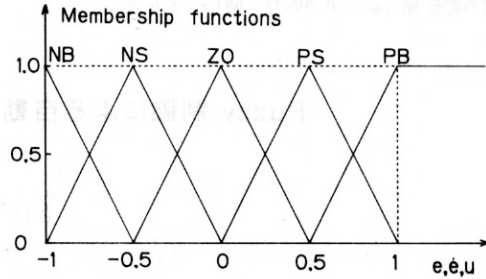


Fig. 2 Membership functions for a position control

Table 1 Control rules for a position control

		$\dot{e}$				
		NB	NS	ZO	PS	PB
$e$	NB			PB		
	NS			PS		
	ZO	PB	PS	ZO	NS	NB
	PS			NS		
	PB			NB		

- ZO : 零
- PS : 正で小
- PB : 正で大

この言語変数のメンバーシップ関数を Fig. 2 に、制御則を Table 1 に示す。ここでは、簡単のため、三つの事象  $e$ ,  $\dot{e}$ ,  $u$  にそれぞれ同一の言語変数と同一のメンバーシップ関数を用いたが、一般にはいずれも別のものである。Fig. 2 では、例えば、NS は  $-0.5$  を中心として  $(-1, 0)$  の区間で  $0 \sim 1$  の度合いが定義されていることを示す。また、Table 1 の制御則は、例えば、ハッチ部では、

「偏差が負で大きく、偏差の変化量が零ならば、速度を正で大きくとれ」

と読む。

今、偏差とその変化量がそれぞれある値  $e_0$  と  $\dot{e}_0$  をとるとき、 $\mu_{NB}(e_0)$  と  $\mu_{ZO}(\dot{e}_0)$  より、速度のメンバーシップ関数  $\mu_{PB}(u)$  を、

$$\mu_{PB}^*(u) = \{\mu_{NB}(e_0) \wedge \mu_{ZO}(\dot{e}_0)\} \cdot \mu_{PB}(u) \quad \dots(1)$$

により修正する。ここで、 $\wedge$  は小さい方をとるの意。Table 1 の制御則すべてに対して、それぞれ (1) 式と同様に速度のメンバーシップ関数を求め、修正された

速度のメンバーシップ関数の積を

$$\mu(u) = \mu_{NB}^*(u) \vee \mu_{NS}^*(u) \vee \mu_{ZO}^*(u) \vee \mu_{PS}^*(u) \vee \mu_{PB}^*(u) \quad \dots\dots\dots(2)$$

により定義する。ここでは、 $\vee$ は大きい方をとるの意。そして、そのメンバーシップ関数の面積重心より、制御出力  $u_0$  を得る。すなわち、

$$u_0 = \frac{\int u \mu(u) du}{\int \mu(u) du} \quad \dots\dots\dots(3)$$

となる。

以上の手順を図示したのが Fig. 3 である。

Fig. 4 は、このようにして行った定点保持のシミュレーション結果であり、(a)は Fuzzy 制御によるもの、

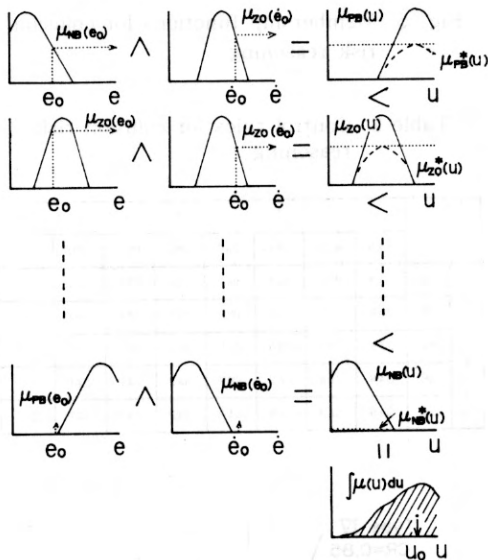


Fig. 3 Process of fuzzy reasoning

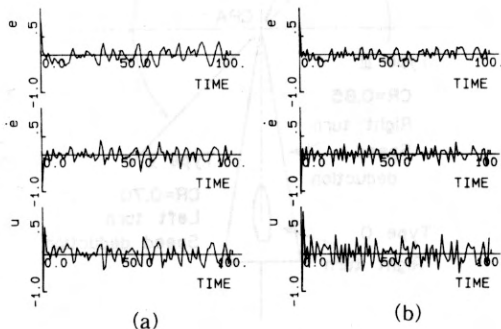


Fig. 4 Comparison between fuzzy and PD control

(b)は比較のため同一外乱を与えて行ったPD制御例である。ここでは、質点の運動特性は考慮していない。PD制御では、もちろん、制御定数にもよるが、外乱のひとつひとつに則した動きがみられるのに対して、Fuzzy制御では、あたかも人間が行っているような一種の「フィルタ効果」が見られる。

### 2. 3 汎用FuzzyコントローラとFuzzyモニタ

Fuzzy制御は本来、制御対象の数学モデルが作成できないか、できても複雑すぎる場合、人間ならば経験や勘からうまく制御できることに着目して開発された方法である。一般に、プラントの制御——大は原子炉の出力制御から小はおでんの味付けまで——では計器類のメータはもとより、炉全体の温度分布を視覚で感じとったりするような漠とした情報から、これまた、経験による漠とした知識をもとにして、例えば石灰の投入時期と投入量を決めるといった作業をベテランのオペレータは苦もなく行っている。さらに、ちょっとしたメータの不自然な動きや投入剤の温度による色変化から、「何番バルブのフィルタがそろそろつまってきたようだ」といった故障診断も行っている。こういった一連の作業——情報収集、状況判断、制御、推論——がFuzzy理論を導入することにより計算機で代替可能となり、種々の分野で実用化されつつある。

その際、問題となる点がいくつかある。ひとつは、演算時間である。前節で述べた手法の説明は計算機で行うための集合の積や和、面積の重心計算といった処理が含まれているが、実は、人間なら、直感的に求めている作業なのである。この部分に多くの計算時間を費やすようでは役に立たない。本研究では、次のような汎用Fuzzyコントローラを作成して、演算時間で1/3～1/5の短縮を得た。

1) メンバーシップ関数の形状を台形もしくは三角形に限定する。また、同時に二つ以上の概念(言語変数)が重ならない。本来、Fuzzyな概念の表現であるので、例えば、Fig. 1で破線のように近似しても出力に大差はない。これにより交差点計算、面積計算が簡単となる。また、メンバーシップ関数の設定および入力楽となる。

2) 二入力一出力Fuzzyコントローラに限定し、制御則をマトリックス表現(ex. Table 1)にする。行列演算とソーティングを組み合わせることにより、If文の多用を避けることができる。

もう一点は、(2)式によって求めた出力のメンバーシップ関数に双峰性がある場合である。この時、例えば、「右に曲がれ」という山と「左に曲がれ」という山がほぼ同じで「真直ぐ進め」に山がなくても、(3)式の結果は「真直ぐ進め」ということになる。この問題は

与えた制御則がまずいとも言えるが、どんな制御則を与えても全く起こらないとは言えない。一つの対策は、(3)式で求めた  $u_0$  周りの二次モーメントを計算してチェックすることにより計算機にも「おかしい」とわかる。

直接の対策ではないが、本研究では、Fuzzy モニタを作成して、時々刻々、システムの状況がモニタ画面でわかるようにして、適宜監視できるように工夫した。現に、このモニタ画面を見ながら、メンバーシップ関数の変更、制御則の改良、追加を行った。

### 3. 自動避航システムの構成

本システムは、次の各部よりなる。

- (A) 避航指令部
  - (B) 航路指令部
  - (C) 操舵および回転数指令部
  - (D) モニタ部
  - (E) 自船および相手船の運動計算部
- それ以外に、コンピュータ・シミュレーションを行うために、
- (D) モニタ部
  - (E) 自船および相手船の運動計算部
- を持っている。

以下に、各部の機能の概要を示す。

#### 3.1 避航指令部

本システムにおいて最も重要な部分であり、自船に接近する物標を監視して、必要に応じて、避航開始時機および避航方法を指示する部分である。

なお、実際のシステムにおいては、レーダの画像信号から要監視物標を抽出する、いわゆる、レーダ・プロットングの作業が必要であるが、すでに衝突予防援助装置において実用化されている内容であるので、ここでは触れない。

抽出された要監視物標（以後、相手船と称す）の相対位置から避航の判断を行うための基準として種々提案されている<sup>3)~5)</sup>。

その中で共通に現れているのは、最接近距離(DCPA; Distance of Closest Point of Approach)と最接近時間(TCPA; Time of Closest Point of Approach)であり、操船者の判断も、この二つの量に大きく依存している<sup>6)</sup>。

ここでは、岩崎・原<sup>5)</sup>と同様にTCPAとDCPAよりFuzzy推論により衝突危険度CR(Collision Risk)を求める。用いたメンバーシップ関数と制御則をFig.5とTable 2に示す。そして、衝突危険度CRがある値以上になったところで避航するよう指令する。

次に避航のしかたを決める必要がある。それには、法規によって定められた(避航)義務船、(針路)保持船の区別を考慮しなくてはならない。本研究では、

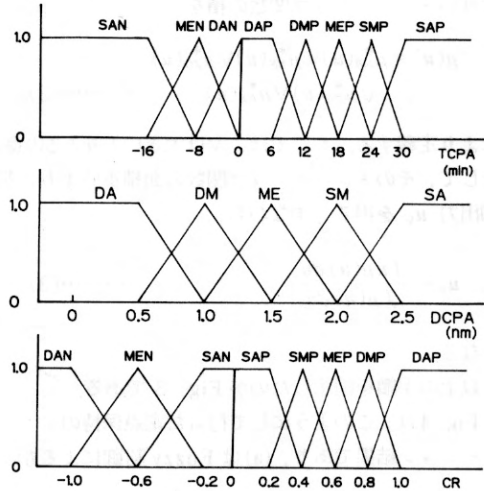


Fig. 5 Membership functions for collision risk reasoning

Table 2 Control rules for collision risk reasoning

		T C P A							
		SAN	MEN	DAN	DAP	DMP	MEP	SMP	SAP
D	DA	SAN	MEN	DAN	DAP	DMP	MEP	SMP	SAP
	DM	SAN	SAN	MEN	DMP	MEP	SMP	SAP	SAP
C	ME	SAN	SAN	SAN	MEP	SMP	SAP	SAP	SAP
	SM	SAN	SAN	SAN	SMP	SAP	SAP	SAP	SAP
P	SA	SAN	SAN	SAN	SAP	SAP	SAP	SAP	SAP
	SA	SAN	SAN	SAN	SAP	SAP	SAP	SAP	SAP

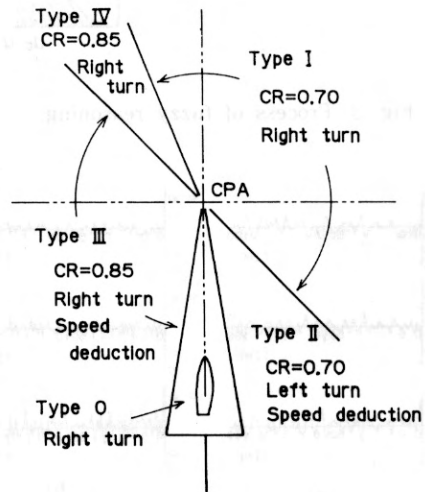


Fig. 6 Pattern definitions of collision avoidance manoeuvres

自船が保持船で避航する必要がない場合でも、相手船がこちらに気付かず直進してくる場合を想定して、Fig. 6 に示すような全ての見合い関係について避航行動を想定した。

この図は、縦軸に自船の針路を、原点に最接近点 (CPA; Closest Point of Approach) をとったものであり5つの避航形態 (Type) の境界 (そのものは厳密なものではない) と、そこでの避航行動を示したものである。例えば、Type 1 の中に相手船がいる場合、CRが0.70になったら、右変針により避航を開始することを意味する。

変針による避航は、実際の操船パターンを参考にし、次のように定めた (Fig. 7)。

(A) 変針部

相手船へ避航意志を伝えるため最低 30°変針する。そして、その針路で直進した場合の TCPA 秒後の衝突危険度 ( $\hat{CR}$  とする) を求め、 $\hat{CR} \leq 0.70$  となるまで、変針角を増加させる。

(B) 平行移動部

平行移動部への移行は、(A)の変針部において時々刻々、原針路へ復帰したと仮定した時の衝突危険度 ( $\hat{CR}$  とする) を計算しておき、この  $\hat{CR}$  が 0.70 となった時に行う。そして、その終了は、本当の CR が若干負になったときに行う。

(C) 航路復帰部

航路復帰は、次の変針点に向かう針路をとる。次の変針点が非常に遠い場合は、ほぼ原航路と平行となるし、直線航路であっても、小刻みに変針点を置けば、ほぼ航路復帰型の避航となる。また、次の変針点が非常に近い場合、次節で述べるような変針点近傍での針路指令を行う。

3. 2 航路指令部

原則的には、現在、航路から偏って航行しているとき、常に次の変針点に船首を向けるような針路を指令

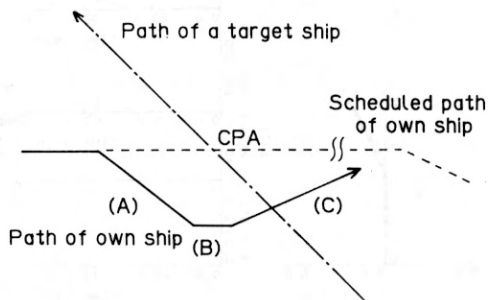


Fig. 7 Path of own ship during collision avoidance

する。しかし、航路航行で意外と難しいのが変針点通過である。実際の操船では新針路試験のデータを基に、変針時機と操舵量、そして転舵時機を決定しているよ

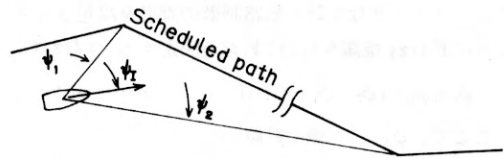


Fig. 8 Course command near a course changing point

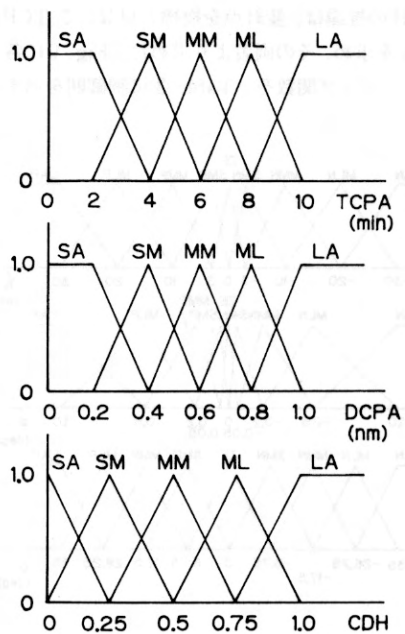


Fig. 9 Membership functions for course changing algorithm

Table 3 Control rules for course changing algorithm

		T C P A				
		SA	SM	MM	ML	LA
D	SA	LA	ML	MM	SM	ZE
	SM	ML	MM	SM	ZE	ZE
C	MM	MM	SM	ZE	ZE	ZE
	ML	SM	ZE	ZE	ZE	ZE
A	LA	ZE	ZE	ZE	ZE	ZE

うであるが、そのままの形で計算機に代行させるのは無理がある。不破ら<sup>7)</sup>は変針点の手前で制御のタイミングを早める方法<sup>8)</sup>を用いたが、そのタイミングをどう決定するか判断が計算機には困難である。本研究では、スムーズな変針と航路制御の両者を満足させるようにFuzzy推論を用いて針路を決定する。すなわち、

$$\psi_1 = \psi_1 + (\psi_2 - \psi_1) \cdot CDH \quad \dots\dots(4)$$

ここで、 $\psi_1$  : 指令針路  
 $\psi_1$  : 次変針点へ向かう針路  
 $\psi_2$  : 次々変針点へ向かう針路  
 CDH : 次々変針点参照度 ( $0 \leq CDH \leq 1$ )  
 (Fig. 8 参照)

CDHの推論は、変針点を物標と見なしてTCPA, DCPAを求め、その両者より求めた。Fig. 9に各々のメンバーシップ関数を、Table 3に制御則を示す。

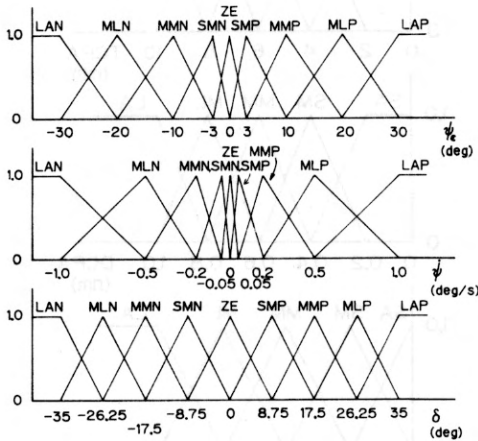


Fig. 10 Membership functions for fuzzy control autopilot

Table 4 Control rules for fuzzy control autopilot

		HEADING ERROR								
		LAN	MLN	MMN	SMN	ZE	SMP	MMP	MLP	LAP
D	LAN					MLP	LAP	LAP		
	MLN				MMP	MLP	LAP			
	MMN	MMN	SMN	ZE	SMP	MMP	MLP	LAP	LAP	LAP
P	SMN	MLN	MMN	SMN	ZE	SMP	MMP	MLP	LAP	LAP
	ZE	LAN	MLN	MMN	SMN	ZE	SMP	MMP	MLP	LAP
H	SMP	LAN	LAN	MLN	MMN	SMN	ZE	SMP	MMP	MLP
	MMP	LAN	LAN	LAN	MLN	MMN	SMN	ZE	SMP	MMP
I	MLP				LAN	MLN	MMN			
	LAP				LAN	LAN	MLN			

### 3.3 操舵およびプロペラ回転数指令部

操舵指令は、通常のPD制御でも可能であるが、変針部分と保針部分がスムーズに移行できるようなFuzzy制御を考えた。人間が行うような連続的なゲインの変更がこれにより簡単に行える。Fig. 10に針路偏差 $\psi_e$ 、施回角速度 $\dot{\psi}$ および舵角 $\delta$ のメンバーシップ関数を、Table 4にその制御則を示す。

プロペラ回転数の指令は、Fig. 6に示すType IIとType IIIにおいて避航開始時に減速(今回はHalf)を、終了時に増速(Full)を指令している。プロペラ回転数あるいは船速の選定そのものは、今回行っていない。

### 3.4 モニタ部

2.3で述べたように、モニタ部では、自船および相手船の状況、各Fuzzyコントローラの入出力等をディスプレイに表示して、運動や制御の状況が時々刻々モニタできるようにしている。

### 3.5 自船および相手船の運動計算部

この部分は、実際のシステムでは必要ない部分であり、コンピュータ・シミュレーション用のものである。本研究では、演算時間を短くするため、施回角速度、船速とも一次遅れとし、操舵および施回による船速低下等は考慮していない。相手船は一定船速で直線あるいは折線上を航行する。

## 4. 自動避航システムのシミュレーション

### 4.1 供試船と計算条件

供試船は船長325m、船速10ノットの"ESSO OSAKA"とし、相手船も船速10ノットとした。避航システムは10秒毎に情報の収集および指令を行う。シミュレーションはすべて自船の初期位置が(0, 0)で、針路0°でスタートする。自船のその後の設定航路はほとんどの場合が(15, 0)マイルの直線航路であるが、任意の折線航路が設定可能である。相手船の初期位置

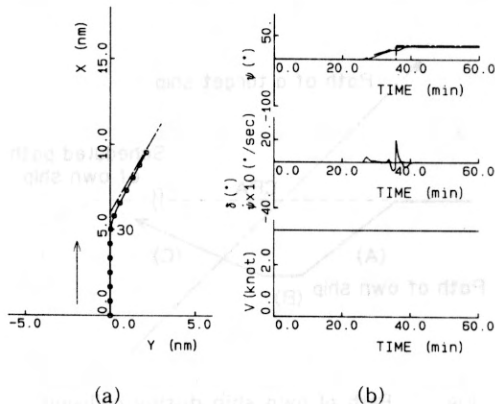


Fig. 11 Simulation of scheduled path navigation



と設定針路は各シミュレーションの条件に合わせて変更できる。

#### 4.2 自動避航システムの各部の検証

Fig. 11 に自船が折線状の航路を航行するシミュレーション結果を示す。(a)は絶対航跡で、一点鎖線は設定航路、実線は実航路であり、○印は5分毎の船位を、数字は時間(分)を示す。(b)は上から針路(一点鎖線:設定針路、破線:指令針路、実線:実針路)、舵角(実線)および回頭角速度( $\times 10$ , 破線)と船速(破線:指令船速、実線:実船速)のそれぞれのタイムヒストリーである。針路指令部および操舵指令部ともうまく動作していることがわかる。

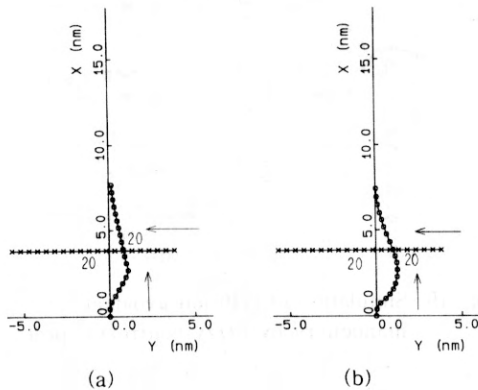


Fig. 12 Simulation of collision avoidance manoeuvre by fuzzy control in comparison with human behaviour<sup>9)</sup>

Fig. 12 は避航指令部の動きを人間による避航動作と比べてみたものであり、(a)が本システムによるシミュレーション結果、(b)がSR 151 操船シミュレータで、乗船経験26年の航海士が行ったものである<sup>9)</sup>。(b)の場合、自船は390mの大型タンカーであり、しかも、ループ幅 $4^\circ$ の針路不安定船であるため、航路に膨らみがみられるが、避航開始点、最接近距離(DCPA)、航路復帰のタイミングのいずれも非常に良く似ており、各 Fuzzy コントローラの設定値が妥当でかつ、制御則が人間のそれに近いと言える。

なお、○印は自船の、×印は相手船の、それぞれ2分毎の船位である。

次に、Fig. 6の各避航パターン(Type 0~Type IV)に対するシミュレーション結果をFig. 13~17に示す。図中の(a),(b)はFig. 11のそれと同じであり、(c)自船を原点に置いた時の相手船の相対航跡、(d)は、上から順に衝突危険度 CR, 最接近時間 TCPA, 最接近距離 DCPA のタイムヒストリーである。なお、DCPA

は TCPA が負の時も、全く幾何学的に求めているが、特に意図はない。相手船の初期船位と針路(および船速)は違うが、全て(5, 0)マイルの地点で30分後に衝突するように設定した。いずれのパターンでも所定の避航動作がとられていることがわかる。

#### 4.3 変針点付近での避航

本システムでは、避航動作は航路指令に優先して割り込み処理されるようになっている。したがって、変針直前、変針中、変針直後のいずれの場合でも、避航の必要が生じた時点で航路指令部とは別個に、別の針路指令を出すようになっている。そして、避航終了とともに、航路指令部の針路指令を受けるようになっており、変針点付近での避航も可能である。

Fig. 18 はその一例であり、一点鎖線の航路を航行中、ちょうど変針点(6, 0)で右から横切る相手船と衝突する状況をシミュレートしたものである。避航終了後、設定航路に復帰しつつ、次の変針点(11, 3)を目指しているようすがわかる。

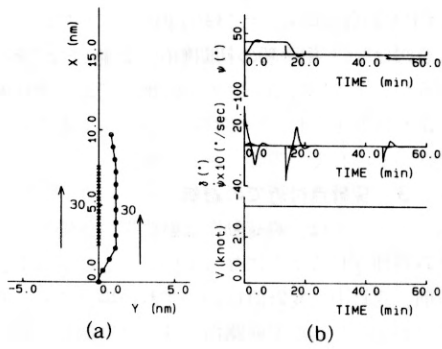
#### 4.4 相手船の行動による影響

本システムでは、さらに、避航開始後も相手船を監視し続け、相手船が行動を起こした時にもそれに対応できるよう設計されている。

例えば、Type IIIやIVで、自船が避航開始した後、自船に気付いて避航を開始した時に、特にその干渉が問題となる。Type II, IIIに限らず、相手船が協力的に(言い換えるとより安全側へ)避航する場合には、何ら問題なく、むしろ、相手の動きに応じて自船の変位を抑えるように動く。最も危険なのは、相手船の避航がかえって危険な場合(Type IIIで相手船が右変針)や、相手船が自船に気付かず、避航中に危険側へ変針する場合である。こういった相手船の非協力行動にも臨機応変に対応できることが、本システムの実用化の上で非常に重要である。

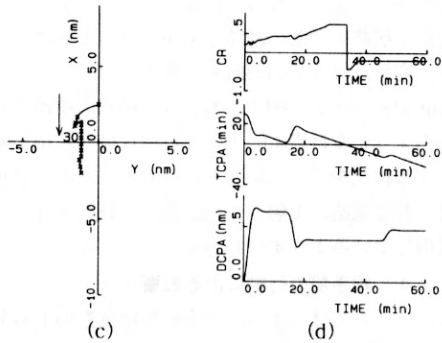
Fig. 19とFig. 20はこうした状況をシミュレートしてみたものであり、いずれも、自船が避航直後に相手船が自船に向かって $30^\circ$ 変針している。Fig. 19では22分ごろそれに気付いて、当初約 $30^\circ$ 変針していたのをさらに約 $20^\circ$ 増して多段避航している。Fig. 20では、自船が保持船であったため、避航開始が遅かった上に減速中でもあり、実船では相当に切迫した状況であろう。避航当初約 $45^\circ$ の変針と減速を指令後、すぐに状況の変化に気付く、連続的に変針角を増やして約 $90^\circ$ の変針を行って相手船を先行させた後増速しながら原航路に向かっている。両者とも対応するFig. 14, Fig. 16と見比べるとその行動の違いがよく分かる。前者では約0.8~1.0マイルの最接近距離であったのに対し、約0.3マイルと、ニアミスに近い状態で





(a)

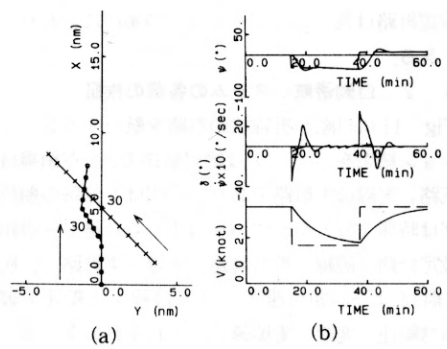
(b)



(c)

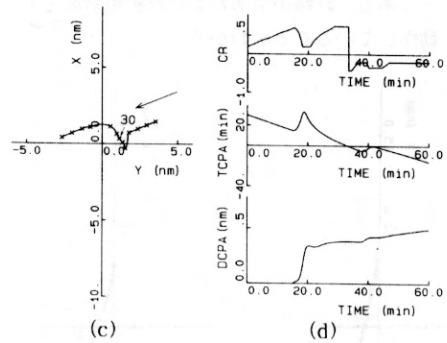
(d)

Fig. 13 Simulation of collision avoidance manoeuvre by fuzzy control (Type 0)



(a)

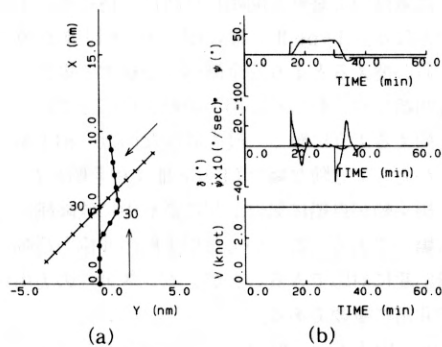
(b)



(c)

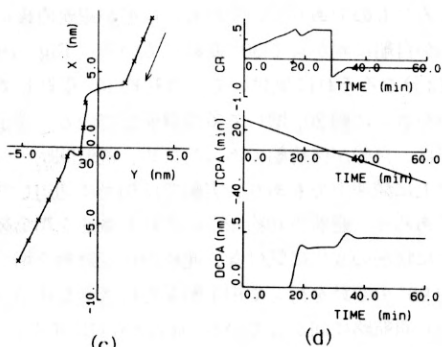
(d)

Fig. 15 Simulation of collision avoidance manoeuvre by fuzzy control (Type II)



(a)

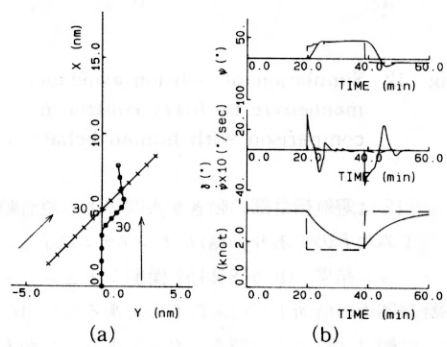
(b)



(c)

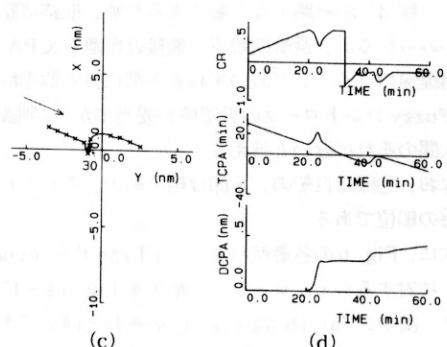
(d)

Fig. 14 Simulation of collision avoidance manoeuvre by fuzzy control (Type I)



(a)

(b)



(c)

(d)

Fig. 16 Simulation of collision avoidance manoeuvre by fuzzy control (Type III)

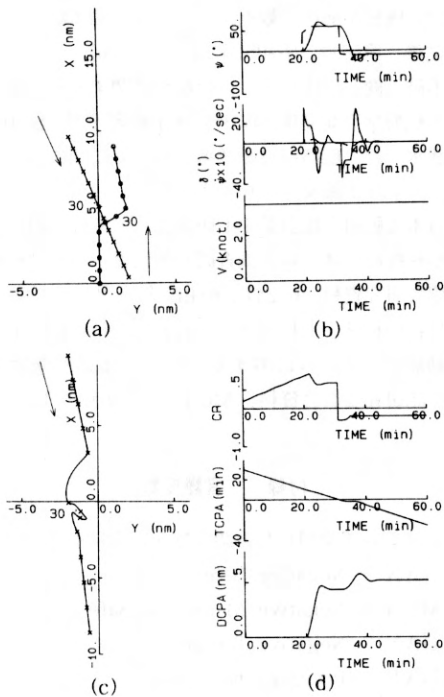


Fig. 17 Simulation of collision avoidance manoeuvre by fuzzy control (Type IV)

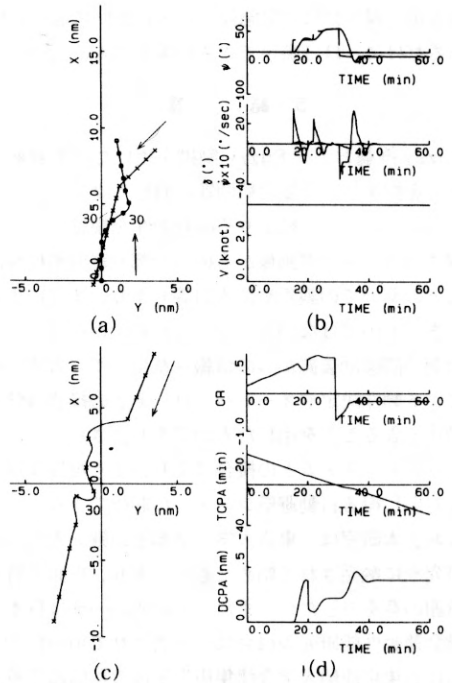


Fig. 19 Simulation of collision avoidance manoeuvre by fuzzy control (Type I; effect of a target ship's conflicting behaviour)

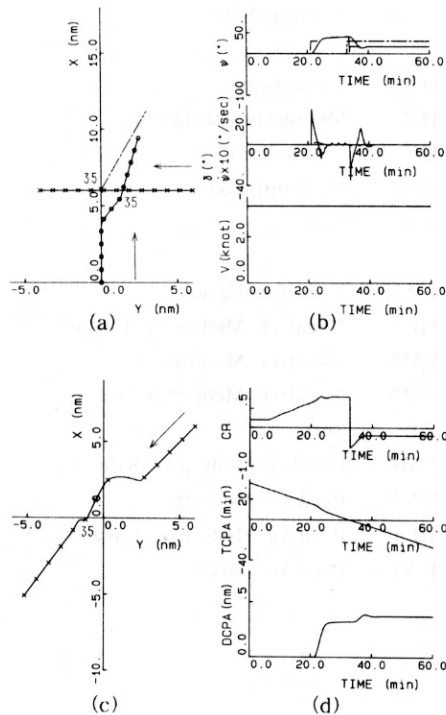


Fig. 18 Simulation of collision avoidance manoeuvre by fuzzy control (Type III; near a course changing point)

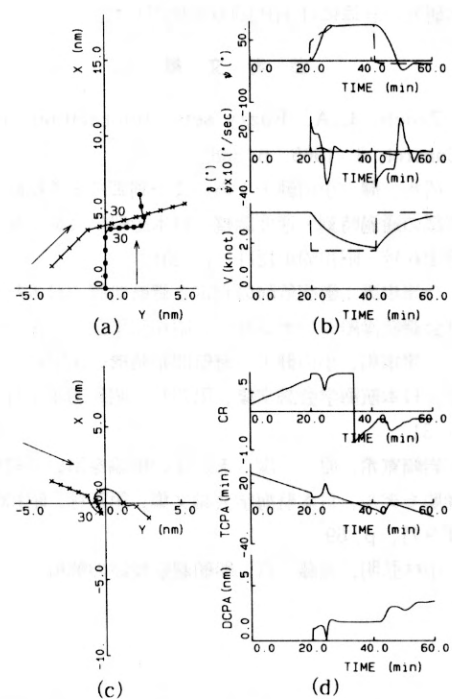


Fig. 20 Simulation of collision avoidance manoeuvre by fuzzy control (Type III; effect of a target ship's conflicting behaviour)

はあるが、現実には、緊急停止か35°施回に近い状態であるだけに、ほぼ満足できる結果と言える。

## 5. 結 言

Fuzzy 推論および Fuzzy 制御を用いた自動避航システムを提案し、一隻避航問題に対してコンピュータ・シミュレーションによりその有効性を検証した。

現実には、レーダ画像からの入力部や絶対船位検出部などの部分での誤差や誤入力等もあり、すぐに実用化できるものではない。しかしながら、現在はレーダや衝突予防援助装置からの情報を基にして、人間の行っている動作決定やオートパイロットとの接合部分を自動化できることを示したものであり、さらに、エキスパート・システムとの接合により、より複雑な状況にも対応し得る自動避航システムが期待できる。

なお、本研究は、東京大学工学部小山健夫先生らの御研究<sup>2)</sup>に触発されて始めたものであり、紙面を借りて感謝の意を表したい。また、本研究の一部は日本造船学会運動性能研究委員会にて発表させて頂いた<sup>10)</sup>。さらに、東京商船大学今津隼馬先生には私信にて多くの根本的かつ重要な御討論を頂いた。神戸商船大学原 潔先生には折りにふれ、種々の御助言、御援助を頂いた。ここに厚くお礼申し上げる。

本研究の計算には HP 1000 を使用した。

## 参 考 文 献

- 1) Zadeh, L.A.: Fuzzy sets, Information and Control, 8, 1965, p. 338
- 2) 清水 健, 小山健夫: あいまい制御による航路交差部の通過時刻・速度調整, 日本造船学会論文集, 第156号, 昭和59年12月, p. 201
- 3) 今津隼馬: 衝突危険の判定と避航処置, 日本航海学会避航操船シンポジウム, 昭和52年3月, p. 25
- 4) 今津隼馬, 小山健夫: 避航開始時機の決定について, 日本航海学会論文集, 第70号, 昭和59年1月, p. 31
- 5) 岩崎寛希, 原 潔: あいまい推論を用いた避航操船モデル, 日本航海学会論文集, 第75号, 昭和61年9月, p. 69
- 6) 小林弘明, 遠藤 真: 船舶避航操縦の解析 —— 人間・機械系解析の観点より。——, 日本航海学会論文集, 第56号, 昭和51年12月, p. 101
- 7) 不破 健, 田中邦彦: 自動航行に関する一考察, 日本航海学会論文集, 第73号, 昭和60年9月, p. 101
- 8) 清水 健: 航路内自動誘導システムに関する研究, 東京大学修士論文, 昭和59年3月
- 9) 日本造船研究協会第151研究会: 大型化に対応する船舶操縦システムの調査研究報告書, 日本造船研究協会研究資料 No. 247, 昭和51年3月, p. 39
- 10) 長谷川和彦, 上月明彦: Fuzzy Control による自動避航システムに関する研究, 日本造船学会運動性能研究委員会資料, MC 12-4, 昭和62年2月

## 〔付録〕 言語変数

本システムで使用した言語変数を以下に示す。

- SAN : Negative Safe
- MEN : Negative Mediumly Safe
- DAN : Negative Dangerous
- DAP : Positive Dangerous
- DMP : Positive Mediumly Dangerous
- MEP : Positive Medium
- SMP : Positive Mediumly Safe
- SAP : Positive Safe
  
- DA : Dangerous
- DM : Mediumly Dangerous
- ME, MN : Medium
- SM : Mediumly Safe
- SA : Safe
  
- LAN : Negative Large
- MLN : Negative Mediumly Large
- MMN : Negative Medium
- SMN : Negative Mediumly Safe
- ZE : Zero
- SMP : Positive Mediumly Safe
- MNP : Positive Medium
- MLP : Positive Mediumly Large
- LAP : Positive Large