ショートノート

ファジィニューラルネットワークによる 回避戦略・戦術知識の獲得[†]

中山 正一^{*1} 古橋 武^{*2} 平賀 一郎^{*2} 内川 嘉樹^{*2}

制御システムの高度化を目指して、人間の制御知識の獲得に関する研究が盛んになされている。本論文では、大きな動的遅れを有する大型船舶を制御対象とし、自船に向かって来る相手船を回避する操船問題を扱う。この問題では、オペレータの直感に合った回避ルールの獲得が困難であった。

本論文では、ファジィ推論ルールの自動獲得とメンバーシップ関数の自動調整の可能なファジィニューラルネットワーク (FNN) を用いて、オペレータが観測していると思われるデータから、オペレータの持つ回避戦略ルールが明確に抽出できることを示す。さらに本手法が、従来手法の危険度を推論するファジィルールと、危険度に基づくディシジョンテーブルのうち、相手船の後に回り込むルールを自動獲得していることを示す。

キーワード：知識獲得、ファジィ制御、衝突回避、ファジィニューラルネットワーク

1. はじめに

移動ロボットの衝突回避やナビゲーション等が重要な問題として盛んに研究されている。制御システムの高度化を目指して、人間の制御戦略に基づく衝突回避制御等に関する研究の報告も種々なされている^{[1] - [7]}。人間の知識に基づく制御では、オペレータからの知識獲得が重要となるが^{[1] [2]}、実際に知識を獲得するには多大な労力が必要である。金湖は3層BP (Back-Propagation) 型のニューラルネットワーク (Neural Network : NN) を用いて操船における衝突回避を試みており、オペレータから操船知識の自動獲得を行っている^[3]。しかし、獲得された知識はNN内の結合荷重に分散記憶されるため、その解釈が難しい。荒木らはルールを逐次的に生成するファジィモデリング手法により、オペレータの回避操作から移動ロボットの静的障害物回避ル

ルの自動獲得を行っている^[4]。この手法によれば、オペレータの知識をファジィルールとして獲得できるが、推論誤差の低減に三角型メンバーシップ関数の種類数を増加させる手法を用いているため、獲得されたルール数が多くなりがちである。また、獲得されたルールについて特に検討はされていない。前田・山中は移動ロボットの動的障害物回避制御において、CMAC (Cerebellar Model Arithmetic Computer) により人間の回避操作から回避戦略を自動獲得する手法を提案している^[5]。この手法では、ロボットと障害物の相対位置から静的危険度 α を、相対速度から動的危険度 β をファジィ推論により求め^[6]、危険度 α , β と回避方向の関係をCMACにより同定している。この手法は、危険度 α , β を介することで人間の制御戦略を間接的に獲得している。一方、実際のオペレータの回避操作はロボット、障害物をスクリーン上に見ながらなされており、獲得された知識がオペレータの持つ回避知識にあっているのか疑問が残っていた。

筆者らはこれまでに、ファジィ推論ルールの自動獲得とメンバーシップ関数の自動調整の可能な

[†] Knowledge Acquisition of Control Strategy and Tactics for Collision Avoidance Using Fuzzy Neural Networks
Shoichi NAKAYAMA, Takeshi FURUHASHI, Ichiro HIRAGA and Yoshiki UCHIKAWA

^{*1} 富士通 VLSI 株式会社
Fujitsu VLSI Limited

^{*2} 名古屋大学 工学部
Faculty of Engineering, Nagoya University

ファジィニューラルネットワーク (Fuzzy Neural Network : FNN) [8] を用いて、オペレータの操作履歴からオペレータの持つ制御戦略・戦術知識を明確なファジィルールとして自動獲得する手法を提案してきた [7]。

本論文では、制御システムの高度化を目指して、人間の制御知識獲得を行う研究の一環として、大きな動的遅れを有する大型船舶を制御対象とし、自船に向かって来る相手船を回避する回避知識獲得問題を扱う。オペレータの操舵には、衝突回避をするための制御戦略と船のダイナミクスを考慮した制御戦術が含まれることになる。本論文では、FNN に船の相対的な位置・速度とオペレータの操舵結果の関係を直接学習させることにより、オペレータの直感によく合った回避戦略ルールを明確に抽出できることを示す。さらに、本手法が、前田らの危険度 α, β を推論するファジィルールと、 α, β に基づくディシジョンテーブルのうち、動的障害物(相手船)の後に回り込むルールを自動獲得していることを示す。

2. ファジィニューラルネットワーク

本論文では、ファジィ推論ルールの自動獲得とメンバーシップ関数の自動調整の可能なファジィニューラルネットワーク (FNN) [8] により、オペレータの操作結果から制御戦略知識の自動獲得を行う。本論文で用いる FNN は簡単のため文献[8]の Type I とする。この FNN は、ファジィルールの後件部が定数で表される簡略化ファジィ推論を BP モデルで実現したものであり、入出力として確定値を扱う [8]。簡略化ファジィ推論は、 x_1, x_2 を入力、 y を出力とする 2 入力 1 出力の場合には次のように表される。

$$R^i : \text{If } x_1 \text{ is } A_{i1} \text{ and } x_2 \text{ is } A_{i2} \text{ then } y = f_i \quad (i=1, 2, \dots, n_R) \quad (1)$$

$$\mu_i = A_{i1}(x_1) A_{i2}(x_2) \quad (2)$$

$$y^* = \sum_i \mu_i f_i / \sum_i \mu_i = \sum_i \hat{\mu}_i f_i \quad (3)$$

ここで、 R^i は i 番目のファジィルール、 A_{i1}, A_{i2} はファジィ変数、 f_i は定数、 n_R はルール数、 μ_i は R^i

の前件部適合度、 $\hat{\mu}_i$ はその総和が 1 となるように規格化された μ_i 、 y^* は推論値である。添え字 i_j は i 番目のルールにおける入力 x_j の前件部メンバーシップ関数の種類を意味する。本 FNN はネットワークの構成を工夫することで、前件部メンバーシップ関数の調整および後件部定数の同定を BP 法に基づく学習アルゴリズムにより自動的に行うことができる。FNN の構成法および結合荷重の更新方法は文献[8]に詳しいので本論文では割愛する。

3. 動的遅れを持つ大型船舶の操船

本論文で行うシミュレーションについて概説する。自船の操船は、オペレータが自船および相手船を CRT 上に見ながらマウスを操作することで行っている。衝突回避するには船の大きな動的遅れを考慮しながら操舵する必要がある。船のダイナミクスは、文献[1][7]に倣い次式の簡単な一次遅れ系で近似した。

$$T d\omega/dt + \omega(t) = u(t) \quad (4)$$

$$\theta(t) = \int \omega(t) dt + \theta(0) \quad (5)$$

$$dx/dt = V \sin \theta(t), \quad dy/dt = V \cos \theta(t) \quad (6)$$

ここで、 T は時定数、 V は自船の速度、 u は操舵角、 ω は旋回角速度、 θ は絶対方向角、 x, y は自船の位置座標である。文献[7]と同様に時定数 $T=5$ 秒とした。図 1 に制御対象である自船と障害物となる相手船の位置関係を示す。位置座標の y 軸を北の方角に一致させ、自船の絶対角 θ は北の方角からのずれとする。自船と相手船との距離を D 、自船の進行方向と自船から見た相手船の方向との相対角度を δ_0 、自船と目標とのずれ角を δ_G とする。自船の速度 V と相手船の速度 V_0 の相対

図1 自船と相手船、目標との相対角度、距離

速度を V_R とする。相対速度 V_R と相手船から見た自船方向との角度を ϕ とする。 ϕ が 0 に近いほど、相手船は自船の方向へ針路をとっていることを示し、相手船が自船の前を通過するときに正の値、後を通過するときに負の値をとる。また、相手船が自船に向かってきて $\phi = \pm 90$ 度の時に双方の船は最接近し、その後相手船が後方に離れてゆく。このとき ϕ は 90 度より大きくなる(もしくは -90 度より小さくなる)ので、 $\phi > 90$ 度、 $\phi < -90$ 度になった時点で相手船との距離を負とした。シミュレーションは図 2 に示すように目標へ自船がまっすぐ進んでいる状態、すなわち $\theta(0) = 0$, $\omega(0) = 0$ から始める。自船および相手船は一定速度 (V , $V_0 = \text{一定}$) で進行するものとし、それぞれの速度は同一とする。相手船は一隻であり、自船の進行方向に対して前方から来るものとし、双方の船が衝突する場合のある設定とした。

図2 シミュレーション条件

4. 制御戦略知識の獲得

衝突回避の戦略ルールを獲得するために、FNN の学習にはオペレータの操作結果である自船の軌跡を教師信号として用いることにする。図 3 は FNN の学習に用いた衝突回避の軌跡の例を示す。(a) は相手船が左 22.5 度から来る場合、(b) は相手船が正面から来る場合である。FNN の学習は、

相手船が正面、左 5, 10, 15, 22.5, 30, 45 度から来るものに対し回避に成功したものを、正面から相手船が来る場合を除き表裏反転した軌跡についても行った。また、相手船が自船の前後を通過する場合にはただ目標へ向かうように教示した。

図3 衝突回避軌跡(学習用データ)

FNN の入力変数は、自船と相手船との距離 D 、自船と相手船の相対角度 δ_0 および目標点への角度 δ_c 、自船と相手船の相対速度の角度 ϕ の 4 入力とした。もちろん、衝突の危険性を表す最接近距離 DCPA^[2] や危険度 α , β ^[6] 等を用いることもできる。しかし、これらの指標を用いるとオペレータの知識を間接的に獲得することになる。そこで、オペレータが直接観測して(言語的に)把握していると思われる入力を選んだ。なお、今回は、FNN の入力に相対速度 V_R を用いていない。将来、船の速度制御を行う際に考慮していきたい。FNN の教師信号には文献[7]と同様、自船の現時点の方位 $\theta(t)$ と T 秒後の方位 $\theta(t+T)$ との相対角度 δ_R を用いた。

$$\delta_R = \theta(t+T) - \theta(t) \quad (7)$$

ここで T は(4)式の自船の時定数である。衝突回避に成功した操船結果から学習データを収集し、FNN の学習を 500 回行った。FNN の前件部メンバーシップ関数は最低限必要と思われる種類数を用意した。すなわち、相対角度 δ_0 , δ_c , ϕ につい

ては3種類(左, 正面, 右)とした。距離 D についても3種類(遠い, 近い, 去る)とした。距離 D において、“去る”は前章で述べた $\phi > 90$ 度, $\phi < -90$ 度の状況を意味する。学習により獲得された回避戦略ルールを表1に示す。表1の値は(1)式の後件部定数 f_i に相当し、自船の針路を示す相対角度 δ_R (度)である。正の値は右に、負の値は左に針路をとることを意味する。

5. 獲得した戦略ルールの考察

表1は、自船に対して相手船が後を通過する場合(①②③), 接近してくる場合(④⑤⑥), 前を通過する場合(⑦⑧⑨)に分かれ、さらにその相手船が前方で遠い場合(①④⑦)と近い場合(②⑤⑧), 去り行く場合(③⑥⑨)に大きく分かれている。これらの回避ルールは船の回避操作の経過とともに順次使われている。図3の操作例にそれぞれの時点で主に用いられているルール表の番号を示す。回避操作には主に④→⑤→⑧→⑨のルールが用いられている。

相手船が接近してくるルール④と⑤をみると、相手船が遠い④のルールでは、相手船が正面の場合にのみ早めに回避を始めることがわかる。また相手船が近づいた⑤のルールでは、目標が正面にある状態から針路の推移が始まる。相手船が正面および右から来れば右に、左から来れば左

に針路をとっている。自船の針路が右(左)に変わることにより目標が左(右)に見えるようになる。また、相手船は次第に正面もしくは左(正面もしくは右)に見えるようになり、さらに、右(左)に針路をとっている。すなわち、④⑤のルールにより相手船の後へ回り込むように回避操作が行われている。

相手船の後に回り込むように回避を行うので、次には相手船が自船の前を通過するようになる。相手船が前を通過するルール⑧⑨をみると、その基本的なルールは目標が左なら左に、右なら右に針路をとることである。よってルール⑧⑨ではルール⑤によって衝突回避した自船を再び目標に向けていることがわかる。衝突回避の問題設定は前方から相手船が来るものとしている。このため、相手船が後方から接近してくるルール⑥は、値が0でありルールは存在しない。また、ルール①②③では、相手船が後を通過するため回避する必要がなく、直進すればよいので値はほぼ0となっている。獲得した回避ルールは我々の直感に良くあっており、FNNの教師信号に船の軌跡を用いたことが妥当であったといえる。

前田らは、動的障害物の方向 δ_o とその距離 D から静的危険度 α を、障害物と移動ロボットの相対速度 V_R とその方向角 ϕ から動的危険度 β をファジィ推論で求めている。ファジィ推論の基本的

表1 FNNの獲得した回避戦略ルール

針路 δ_R		相 対 速 度 の 角 度 ϕ															
		後 通 過						接 近						前 通 過			
距離 D	遠い	①		相手船方向 δ_O			④		相手船方向 δ_O			⑦		相手船方向 δ_O			
				左 正 面 右					左 正 面 右					左 正 面 右			
		目	左	0	0	0	目	左	2	1	0	目	左	0	0	0	
	標	正 面	0	0	0	標	正 面	0	9	-1	標	正 面	4	0	-2		
	δ_G	右	0	0	0	δ_G	右	0	-1	0	δ_G	右	0	0	0		
	近い	②		相手船方向 δ_O			⑤		相手船方向 δ_O			⑧		相手船方向 δ_O			
				左 正 面 右					左 正 面 右					左 正 面 右			
		目	左	0	0	0	目	左	34	15	9	目	左	-33	-31	-31	
	標	正 面	0	0	0	標	正 面	-19	16	19	標	正 面	-4	-7	4		
δ_G	右	0	0	0	δ_G	右	-9	-27	-23	δ_G	右	31	34	33			
去る	③		相手船方向 δ_O			⑥		相手船方向 δ_O			⑨		相手船方向 δ_O				
			左 正 面 右					左 正 面 右					左 正 面 右				
	目	左	0	0	0	目	左	0	0	0	目	左	-27	-8	-18		
標	正 面	5	0	-5	標	正 面	0	0	0	標	正 面	-1	0	2			
δ_G	右	0	0	0	δ_G	右	0	0	-1	δ_G	右	18	4	27			

(Left) - ← 針路 δ_R (deg) → + (Right)

なルールは、障害物が正面で近いほど静的危険度 α は大となる。また、障害物との相対速度が速く、障害物が接近しようとしているほど動的危険度 β は大となる。本論文で獲得した表1の戦略ルールで相手船が前方で遠い①④⑦は α が大でない場合に、相手船が近い②⑤⑧は大となる場合に対応すると考えられる。そして、前田らの危険度 α のルールでは相手船(障害物)が後方となる状況は定義されていないが、本ルールの③⑥⑨は α が大ではない場合としてみる事ができる。また、相手船が接近してくるルール④～⑥は β が大となる場合、相手船が前もしくは後を通過していく①～③, ⑦～⑨は β が大でない場合におよそ対応している。前田らは、これらの危険度 α , β と回避方向の関係を CMAC を用いて獲得している。CMAC により獲得されたディシジョンテーブルでは、危険度 α , β が両方とも危険となる場合について回避が行われている。さらには相手船との相対速度の大きさに応じて相手船の前後どちらに回り込むかが決定されている。表1の回避戦略ルールにおいて α , β がともに大となるのはルール⑤である。ルール⑤は、衝突回避するために、相手船の後に回り込むよう針路を大きく変更するものである。このことから、本回避戦略ルールは、危険度 α , β の推論ルールと α , β に基づくディシジョンテーブルのうち、相手船の後に回り込む回避ルールを獲得していることがわかる。

6. 階層的ファジィ制御器による制御戦略ルールの評価

オペレータの操舵結果と自船の軌跡との間には、船のダイナミクスである旋回挙動を考慮した制御戦術ルールが含まれていると考えられる。そこで文献[7]と同様にして新たにもう一つの FNN に相対角度 δ_R と自船の旋回角速度 ω を入力し、操舵量 u を教師信号としてオペレータの制御戦術ルールの獲得を行った。表2に得られたルールを示す。ほぼファジィ PD 制御器に相当することがわかる。獲得した戦略・戦術ルールの妥当性を検証するために、制御戦略ルールを獲得した FNN により軌道指令値を出力し、制御戦術ルールを獲得した FNN を用いてフィードバックループを構成し、指令値に追従させる階層的ファジィ制御器^[7]により衝突回避制御を行った。図4に相手船が左22.5度(a)、正面(b)、右18度(c)、左4度(d)方向から来たときの衝突回避操船の結果を示

表2 FNN の獲得した戦術ルール

操舵角 u		旋回角速度 ω		
		左	直進	右
針路 δ_R	左	-19.7	-12.8	-10.0
	正面	2.8	0.0	-2.8
	右	10.0	12.8	19.7

(Left) ← 操舵角 u (deg) → (Right)

図4 衝突回避制御の結果

す。(c)(d)は未学習のパターンである。結果は良好で、自船が相手船の後に回り込むように操船をしていることがわかる。このとき、相手船が正面もしくは右方向から来たときは右に、左方向から来たときは左に衝突回避が行われている。ただし、相手船がやや左(4度付近)から来る場合には回避を行うことができなかった。これは、相手船の来る角度が正面と左方向のちょうど中間にあり、自船を左右どちらに回避させてよいか決定できなかったためと思われる。

7. まとめ

本論文では、FNNを用いてオペレータの操作結果から、オペレータの制御戦略知識を明確なファジィルールとして自動獲得できることを示し、獲得された回避ルールが我々の直感によく合っていることを示した。また本手法が前田らの危険度 α , β とその回避ルールを、オペレータが観測していると思われるデータから直接獲得できることを示した。FNNを用いた階層的ファジィ制御器により、獲得した衝突回避知識の妥当性を検証した。

今後は、操舵と速度制御を併用して衝突回避を行う問題を取り上げ、互いに相関のある舵と速度の2つの操作量を考慮する制御戦略・戦術知識の獲得を試みたい。

また、相手船の来る角度によっては衝突回避を行うことができないという問題があるが、FNNが回避針路の決定に迷っていることを判断し、強制的に針路を指示するような機構について検討を進めていきたい。

参 考 文 献

- [1] 榎木, 片井, 岩井: オペレータの操作履歴からの制御則の自動チューニングと知的ファジィ制御, 計測自動制御学会論文集, Vol.26, No.8, pp.854-861, 1990
- [2] 嶋田, 間瀬, 原: 避航操船における操船者の危険度判断ルールの同定, 第7回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.509-512, 1991
- [3] 金湖: 船舶航行におけるニューラルネットワークを用いた衝突回避手法について, 日本機械学会 No.910-39(I)「ファジィ/ニューラルネットの機械システムのダイナミクスと制御への応用」シンポジウム講演論文集, pp.129-134, 1991
- [4] 荒木, 野村, 林, 若見: ルールを逐次的に生成するファジィモデリングの一提案, 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.4, pp.722-732, 1992
- [5] 前田, 山中: CMAC学習に基づくオペレータの制御戦略を有するファジィ障害物回避制御, 第6回ファジィシステムシンポジウム講演論文集, pp.531-534, 1990
- [6] 前田, 竹垣: ファジィ推論を用いた移動ロボットの動的障害物回避制御, 日本ロボット学会誌, Vol.6, No.6, pp.50-54, 1988
- [7] 中山, 古橋, 堀川, 内川: ファジィニューラルネットワークによる制御戦略・戦術知識の獲得, 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.5, pp.929-941, 1992
- [8] 堀川, 古橋, 内川: ファジィニューラルネットワークの構成法と学習法, 日本ファジィ学会誌, Vol.4, No.5, pp.906-928, 1992

(1993年2月17日 受 付)

[問い合わせ先]

〒464-01 名古屋市千種区不老町

名古屋大学 工学部

電子情報学科 内川研究室

平賀 一郎

☎: 052-781-5111(内)2792

☎: 052-781-9263

hiraga@uchikawa.nuem.nagoya-u.ac.jp

著者紹介

中山 正一 (なかやま しょういち)

富士通 VLSI ㈱

昭和61年3月伊勢工業高校電気科卒業。同年4月富士通 VLSI ㈱入社。平成2年8月富士通工業専門学校ソフトウェア工学科卒業。主として半導体製造装置関連のシステム開発に従事。平成3年4月から同5年3月まで名古屋大学工学部電子機械工学科学研究生。ファジィ推論を応用したシステムに関する研究に従事。

平賀 一郎 (ひらが いちろう)

名古屋大学 大学院 工学研究科博士課程前期課程 機械工学及び機械工学第二専攻

平成5年3月名古屋大学工学部卒業。現在、同大学大学院工学研究科博士課程前期課程に在学中。ファジィ推論を用いた人間の制御知識の獲得に関する研究に従事。

古橋 武 (ふるはし たけし)

名古屋大学 工学部電子情報学科

昭和60年3月名古屋大学大学院博士課程修了。平成5年6月から名古屋大学工学部電子情報学科助教授。工学博士。主として、制御システム・エキスパートシステムにおける知識獲得技術の確立を目指して、ファジィニューラルネットワーク、ファジィ推論、遺伝的アルゴリズムによる知識獲得に関する研究に従事。

内川 嘉樹 (うちかわ よしき)

名古屋大学 工学部電子情報学科

昭和44年名古屋大学大学院博士課程満了。平成5年6月から名古屋大学工学部電子情報学科教授。工学博士。ニューラルネットワーク、ファジィ理論、遺伝的アルゴリズム、自律分散システム、バーチャルリアリティ、電子計数法などを利用したシステム技術の基礎および産業への応用に関する研究を行っている。