

船舶自動航行ファジィエキスパートシステム(SAFES)

正員 長谷川 和 彦* 正員 上 月 明 彦**
 村 松 徹*** 小 峰 博 文****
 渡 部 勇 治*****

Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System (SAFES)

by Kazuhiko Hasegawa, *Member* Akihiko Kouzuki, *Member*
 Tooru Muramatsu Hirofumi Komine
 Yuuji Watabe

Summary

Growing the demand for new generation of automation in ship navigation and for various assessments in harbours and waterways, so-called fast-time simulation technique becomes important as well as man-in-the-loop simulation such as ship handling simulator experiments.

In the fast-time simulation technique, the mathematical model of the ship dynamics in various environmental conditions should be of course carefully investigated, but the modelling of navigators is another important factor which governs the inputs of simulation. In this paper the authors have developed an automatic navigation system called SAFES in combination of fuzzy theory and expert system, which is applicable to automation of ship navigation and also to the modelling of navigators in the fast-time simulation. The system can treat various ship operations in open sea and restricted waterways as well as under multi-ship encounters. Some results of the application of SAFES are shown, which were actually used for certain assessment and design of waterways.

In the modelling of ship navigators, fuzzy control and reasoning are used for the basic controls such as course-keeping, course-changing and path-keeping, and for the reasoning of collision risk between other ships and boundary of navigational lane. Further in the path-keeping algorithm, fuzzy reasoning of the nearness to the course-changing point is included. It is not necessary to introduce fuzzy control even in course-keeping, but it is found that fuzzy autopilot can operate smoothly from course-keeping to course-changing and vice versa without large overshoot nor slow settling. The describable knowledge of ship navigators for ship operation and process control is represented in the rule base of the expert system.

As conclusions of the paper, the authors can point out the following two points as well as the availability of the proposed system. As the first point, the expert system approach is essential for the description of complicated navigators' decision process, which cannot be easily implemented in the sequential programming style such as in FORTRAN. On the contrary, each function of navigators' orders and behaviour of helmsmen may be represented also by non-fuzzy description. However, the authors would like to stress as the second point that once we prepare a general-purpose fuzzy controller/reasoner which passes one fuzzy output from two fuzzy inputs, almost all functions can be easily handled by fuzzy control/reasoning, because most functions of human operation are originally given by only fuzzy descriptions.

* 大阪大学工学部

** 三菱重工業(株)神戸造船所(研究当時, 大阪大学工学研究科在学)

*** 日本電装(株)(研究当時, 大阪大学工学部在学)

**** (株)日立製作所(研究当時, 大阪大学工学部在学)

***** 大阪大学理学部聴講生(研究当時, 大阪大学工学部在学)

1. 緒 言

船舶は時定数の大きい乗り物である。一般に時定数の大きい乗り物では運転のテンポが遅いため、その制御は難しい。あらかじめ、ある指令に対する応答を予測し、その指令に対する運動が発達しない前に次の指令を与える必要が

ある。発達してからでは遅く、自励振動を引き起こす。人間は訓練によりこういった時定数の大きいあるいは本来不安定なシステムでも制御する能力を持っている。船舶の運航に船長や航海士、パイロットの長年の経験と勘が必要とされるゆえである。

これが、他の船舶との衝突回避-避航と呼ばれる一となると事態はさらに深刻になる。相手船の指令を知ることなくその行動を予測しなければならない。船舶には方向指示器はなく、通信手段も一般には特定の船舶との間では困難である。ここに、相手船との信頼関係が重要になる。すなわち、海上衝突予防法が規定する(避航)義務船、(針路)保持船(権利船とも呼ばれる)の関係である。自船と相手船のこの法律が定める信頼関係のもとに船舶の運航の安全が成り立っているといっても過言ではない。

しかし、この唯一の信頼関係も特に東京湾や大阪湾、瀬戸内海などの超過密海域では保証の限りでない。もちろん、見張り不十分で相手船に気づかなかつたとか、気づいても衝突せずに通過できるだろう、あるいは相手船が避けてくれるだろうとかの初歩的な判断ミスは論外である(実際にはこういったことが衝突事故の主要原因であることは衆知の通りである)。しかし、避航したくても航路に制限がある、減速中で針路制御が自由にならない、といった障害が多い。さらには、自船がある船に対しては義務船で、同時にまた別のある船に対しては権利船となる複数船との見合い関係が日常的に起こるのである。ここでは人間の持つマイナス面が現れている反面、優れた判断能力、たとえば、総合的な状況把握能力とか、一部の行動が規制されていてもあるいは、たとえ一時的に判断を誤ってもすぐに他の行動で補償できる特殊な制御能力が役立っている。

船舶の運航の自動化は時代の要請である。しかし、そこには自動化が困難な高度な判断、経験や知識といった問題が含まれている。本稿では海上での船舶の運航の自動化と安全を考える上で重要な狭水路航行、複数船との衝突回避行動などを人間の判断機能に近いとされるファジィ理論を用いて表現し、さらに、船長などの知識や経験の記述に便利なエキスパートシステムを組み込むことによって自動的に行なうシステム(SAFES: Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System)を開発した。

2. 船舶自動航行ファジィエキスパートシステム(SAFES)の構成要素

本システムは、ファジィ制御を用いた船舶自動航行システム(ACAS)をベースにして、それを複数船との避航判断や航路の境界線の認識を行うために OPS83 を用いてエキスパートシステム化したものである。ファジィ理論やエキスパートシステムについてはすでに数多くの成書があるのでここでは説明を省略する。また、エキスパートシステムはその構造がダイナミックに変わるのが特徴であり、シス

テムの記述を明示的に行なうのが困難であるので、以下には SAFES を構成する要素のうちの知識ベースについて、しかも自動航行に関する部分だけを解説する。

2.1 船舶自動避航システム(ACAS)¹¹⁾

このシステム(ACAS: Automatic Collision Avoidance System for ships using fuzzy control)は相手船が1隻の時の避航判断および行動をファジィ制御を用いて行なう部分であり、本システムの基本となっている部分である。詳しくは文献¹¹⁾に譲るが、衝突危険度の判定、避航航路の計画、変針指令、保針指令などにすべて人間の判断機能に近いファジィ制御やファジィ推論を用いている。本システムではこれを OPS83 と C 言語に書き換えてエキスパートシステムの中に組み込んでいる。ここでは、各項目毎に他の研究例もレビューしながら概説する。

a) 衝突危険度の判定

衝突危険度という概念は海上衝突予防法によると「接近してくる他の船舶のコンパス方位に明確な変化が認められない場合は、これと衝突するおそれがある」ということになっている。しかし、この表現は極めてあいまいであり、従来から衝突回避の自動化を考えている人々を悩ませ続けてきた概念である。現にこの衝突危険度やそれに伴う避航の判定基準や避航の開始時期をテーマにした論文がすでに数多く発表されている³⁾。

簡単な方法として、閉塞領域⁴⁾⁵⁾⁶⁾と呼ばれる一種のバンパー領域を自船の回りに考えそこに他船が入ってきたら避航する(さもなくば衝突の危険がある)という方法も考えられ、特に簡便な交通流シミュレーションなどで効果をあげている⁷⁾⁸⁾⁹⁾。しかし、この方法は相手船の相対速度が0と考えたことになっており、本来はある航路の許容通航量などを求めるのに考察されたものである。

また、自船、相手船ともに現在の針路、速力を保持すると仮定して幾何学的に求まる最接近距離(DCPA)、最接近時間(TCPA)のふたつの物理量から推定する方法がある³⁾¹⁰⁾。鶴田ら¹⁰⁾はこのふたつの量から衝突危険度を5つの領域に分けて判断した。

さらに、両者を考慮した提案¹¹⁾、海上衝突予防法の定義に近い提案¹²⁾もある。

一方、前述したように衝突危険度というのは非常にあいまいな概念である。しかし、以上述べた方法はいずれもクリスプな(オンオフ的な)、あるいは段階的な判断しかできない。こういった判断にファジィ推論を適用する方法が当然考えられる。James¹³⁾は閉塞領域から求める方法に、岩崎ら¹⁴⁾および長谷川ら¹⁵⁾は DCPA と TCPA から求める方法にそれぞれファジィ推論を適用した。岩崎らと長谷川らの方法は前者が TCPA を船長船速比で、DCPA を船長で無次元化していること、後者が TCPA の負の領域でも衝突危険度を定義している点を除けばほぼ同じである。確かに大洋航行中では DCPA を船長で無次元化することは意味が

あるが、同じ船でも大洋航行中で「近い」と感じる距離と狭水路で「近い」と感じる距離は違っており必ずしも船長で無次元化することが妥当とは思えない。むしろ可航幅などによって心理的に左右される概念ではなからうか。なお、SAFESにおいてはDCPAの横軸の最大値を適用する航路内で行合い船がある場合、お互いに避航しないでも行き違えるように決定した。他の言語変数については最大値からの比率が同じになるように自動的に決定した。その他のメンバーシップ関数や制御則、言語変数の定義、TCPAの負領域の考え方などは文献¹¹⁾¹⁵⁾¹⁶⁾を参照いただきたい。

b) 避航航路の計画

上に述べたように衝突のおそれがあると判断したら、続いて避航に移らねばならない。避航のパターンについてもすでに多くの研究がある。しかし、人間の操船パターンは画一的なものではなく、レーダによる実態解析やレーダシミュレータ、操船シミュレータの実験結果など統計的な方法に頼らざるを得ない。しかもその多くは避航の自動化を目的としたものではないため閉塞領域的な他船との航過距離やその他の特徴量の抽出がほとんどである³⁾⁴⁾⁵⁾。そのパターン化を試みた研究¹⁷⁾¹⁸⁾でもモデル化までは行っていない。したがって、避航の自動化を行なうにあたってはこれらの研究を参考にしつつもそれぞれ独自のモデル化が行なわれている¹⁹⁾²⁰⁾¹⁴⁾¹⁸⁾¹⁰⁾²¹⁾。本システムはACASの延長であり、文献¹⁾とまったく同じモデル化を行なっている。この方法の特徴は3種類の衝突危険度を使い分けて避航操船を行なう点である。

c) 保針・変針指令

保針とは周知のように針路を保持するための操船であり、変針とは一般にある決められた針路に定針するための操船をいう。変針は大洋航行中や航路が指定されていない海域で次の航路に向かうとき、あるいは避航するときに行われる。航海士が変針を行なうとき、変針角を指令するときと変針するための舵角を時々刻々指令するときがある。変針だけなら前者で十分である。もちろん、変針角をオートパイロットに設定すると自動的に変針する。しかし、それは変針をしたのではなく針路誤差が急に大きくなった保針をただけである。オートパイロットは基本的にはPID制御であるから針路誤差が大きいとそれに比例した舵角を取る。そして誤差が小さくなるにしたがって次第に舵角が小さくなる。しかし、人間はある一定の舵角(例えば15度)をとり、旋回角速度が発達して針路が指令された針路の何割かになると(必要なら)舵中央に戻し反対舷に当て舵をとる。そして、ちょうど指令された針路になるころに同じく旋回角速度もほぼ0になるように当て舵のタイミングと角度を決める²²⁾。この操舵は零付きバンバン制御と呼ばれ変針時間が最短となる²³⁾ことを人間は感覚的に知っているようである。しかし、このような非線形な制御は機械には向かずまた、無理に非線形特性を与えると位相遅れを伴っ

て制御系の安定性が悪くなる²⁴⁾。意外と自動化が難しい。ここでも人間の判断に近いファジィ理論を適用しようという考え方がある²⁵⁾¹⁾。Amerongenらの方法²⁵⁾では舵角のメンバーシップ関数を小舵角と大舵角に離散化することによって人間の変針操舵に非常に近い結果を得ている。一方、長谷川¹⁾は逆に針路誤差と回頭角速度のメンバーシップ関数の0付近を密に定義することにより同様の結果を得た。いずれの方法もファジィ制御を使うことにより非線形な制御を位相遅れなく連続的に実現している。ファジィ制御のこういった特徴は船速調整にファジィ制御を用いた研究²⁶⁾でも如実に現れている。ここではこれをファジィオートパイロットと呼ぶ。

d) 航路指令

航路指令とはある決められた航路を航行するための指令であり、一種の変針指令である。しかし、単なる変針ではなく、航路に沿って変針するためには最初の転舵時機が非常に難しい。なぜなら、緒言に書いたように船は時定数が大きく自分の指令した運動が発達する前にその運動を予測して次の指令を発令しなければならないからである。実際には船長などの経験、新針路試験結果などから判断しているようである。これを自動化する試みは大別するとフィードバック制御による方法²⁷⁾、最適レギュレータとカルマンフィルタを用いた方法²⁸⁾、変針点の手前で針路指令を与えるタイミングを決定する方法²⁹⁾、そしてファジィ理論を用いた方法¹⁾がある。本システムではファジィ理論を用いた方法¹⁾によったが、この方法の特徴は変針点を停止した船舶あるいはパイとみなして衝突危険度の反対に変針点からの近さを船の位置や方位、船速を考慮して判断できる点にある。そして、見かけ上は変針操舵だけで航路制御が実現できる。これにより航路航行中、変針点付近であろうがなかろうがさらには避航中の変針であろうが関係なく適切な針路指令が出されるので、あとは前述のファジィオートパイロットに任せることにより適切な舵角指令が行なえる。この制御方式は人間のやり方とかなり違うが、なんらかの原因により変針点付近で計画航路よりかなりはずれて航行しているときには従来の方法では計画航路に戻ろうとする動きが大きくなるのに比べるとむしろ次の変針点に向かおうとするので人間に近い判断ができる¹⁵⁾¹⁶⁾。航路の制限が大きい場合には仮の変針点を近くに置けばよい。

2.2 複数船避航戦略

ACASを用いると1隻に対する避航判断と行動を決定することができた。しかし、緒言でも述べたように適密海域では複数船との見合い関係が多く、1隻だけの避航判断では安全に航行することができない。しかし、複数船との避航判断をすべて列挙してルール化することは、その状況が千差万別であることから不可能に近く、また、意味がない。現に操船者はそういった個々のケースについての行動パターンを持っているのではなく、その場に応じた総合的

な判断をしているものと思われる。相手船も同様な判断をしているため1対複数ならまだしも複数対複数の避航判断は手続き型プログラムではまず不可能である。

Colley ら⁸⁾は Goodwin の domain⁶⁾を改良した RDRR (range to domain over range rate)⁶⁾を用いた避航モデルを提案しているが、複数船との避航は自船と衝突のおそれのある相手船のうちもっとも TCPA の小さい相手船に対して行なうという戦略を用い、3隻間の避航シミュレーションを行なった。岩崎ら¹⁴⁾はファジィ推論を用いた避航モデルを提案し、3隻の反航船との連続避航のシミュレーションを行なったが、複数船との避航戦略の一般化は行っていない。

一方、複数船との避航戦略のモデル化に有効と思われるエキスパートシステムを用いた避航システムがすでにいくつかある。Blackwell ら³⁰⁾はC言語を用いて開発したが、避航モデルとしては前述の Colley らの方法⁶⁾を踏襲している。ついでながらその結論においてより現実的な状況のシミュレーションを行なうためにはファジィ的な取扱いが必要であると述べている。一方、鶴田ら¹⁰⁾は Prolog を用いた避航システムを開発しているが、複数船との避航戦略については「海上衝突予防法に定められた基本的な考え方を尊重しつつ、経験からのルールにより対処する」と述べるにとどまっている。本格的な複数船対複数船の避航シミュレーションをはじめて行なったのは Koyama ら²¹⁾であり、OPSS5 を用いて4隻間の避航を種々の条件でシミュレーションした。複数船との避航戦略については明記されていないものの、避航対象船 (target ships) の状態のみならず、避航対象船の避航対象船 (target ships' targets) をも加味して避航計画を立て状況の変化に応じてその計画を修正する方法を提唱している。この手法で重要な役割を担っているのが OPSS5 のエレメントクラス target である。

ここでは Koyama らの方法²¹⁾を参考にした複数船との避航戦略を示す。本システムには船 (ship) エレメントのほかに危険船 (target) エレメントがある。これが Koyama らの target クラスに対応する。この target エレメントは ship エレメントとは独立して存在しており、ある船からみた衝突危険度 (CR) を調べその危険度、自船と相手船の識別番号、その他の必要な情報とともにいったん作成される (Table 1)。そしてワーキングメモリ (OPSS83 においてシステム内の状態がエレメントの形で記述された場所) 内の target エレメントを調べ衝突危険度がある一定の範囲 ($0.7 \leq CR < 0.9$) にあれば避航指令を発令する (Table 2)。すべての船についてこれを行なうので n 隻いるとすると最大 $n \times (n-1)$ 個の target エレメントが存在する。しかし、危険でない船どうし、あるいは、避航などの行動により危険でなくなった場合は消去される。ship エレメントと独立しているのはこのためである。

Table 1 および Table 2 は OPSS83 のルールの記述であ

Table 1 A rule to make "target" element

```
rule c11_1
{
  &0 (goal operation = [c11];
      status = [active]; );
  &2 (ship check_own = -1;
      calst = 0; );
  &3 (ship id_number <> &2.id_number;
      check_target = 0;
      calst = 0; );
  ~ (target id_number = &3.id_number;
      owner = &2.id_number; );
-->
  modify &2 ( check_target = 1;
              calst = 1; );
  modify &3 (check_target = -1; );

  make (target time = &0.time;
           id_number = &3.id_number;
           owner = &2.id_number;
           check_nearmiss = 0;
           navist = &2.navist;
           calst = 1;
           long = length(&2, &3);
           opriority = cal_prio(&2, &3, 'p');
           oome = cal_prio(&2, &3, 'o');
           teme = cal_prio(&2, &3, 't');
           oect = cal_pa(&2, &3, 'o');
           tect = cal_pa(&2, &3, 'e');
           omv = &2.actv;
           tarv = &3.actv;
           risk.dc = cal_pa(&2, &3, 'D');
           risk.dcpa = cal_pa(&2, &3, 'd');
           risk.tc = cal_pa(&2, &3, 'T');
           risk.tcpa = cal_pa(&2, &3, 't');
           risk.CR = cal_cr(&); );
}
```

Table 2 A rule to take collision avoidance action

```
rule c12_2
{
  -- HIKOH_part1
  &0 (goal operation = [c12];
      status = [active]; );
  &2 (ship check_own = -1;
      navist = 0;
      calst = 0; );
  &3 (target owner = &2.id_number;
      (@.risk.CR >= 0.7 /\ @.risk.CR < 0.9); );
  [&3.risk.CR]
-->
  call calvelo(&2, &3);

  modify &2 (actstptime = &0.time;
            actstp_x = @.x;
            actstp_y = @.y;
            actc = course(&, &3);
            bc = @.cc;
            bt = &0.time;
            cv = velo(&, &0);
            cc = psi(&, &0);
            x = move(&, &0, 'x');
            y = move(&, &0, 'y');
            navist = 1;
            calst = 1; );
}
```

り若干の補足説明がある。“—>”より前が LHS すなわち条件部、そして後が RHS すなわち実行部である。条件部ではエレメントの存在あるいはエレメントのある要素が記述された条件を満たすかどうか調べられる。“&数字”は RHS でそのエレメントを参照するときに使われる一種の変数名、“/\”は“and”、“\|”は“or”、“~”は“not”、“@”は自分自身のエレメントを意味する。最後には Table 2 で“—>”の直前に“[]”で囲まれた部分があるのは優先度 (priority) であり、このルールが競合集合に上がったとき

の優先順位 (他にも競合解消のためのルールがいくつかあるが)になる。ここではこの優先度に、参照する target エレメントの衝突危険度を入れている。そしてこの危険度がファジィ推論によるファジィ数であるためにこのルールの適合度を表わす一種の確信度 (certification factor: cf) となっている。複数の危険な関係の船が存在する場合、このルールが複数適合するので競合集合に上がるが衝突危険度が優先順位になっているためいちばん危険な target に対しての避航が優先して実行される。しかし、競合集合には他の target に対する避航要求が残っているため次のタイムステップでは再び競合集合の中で衝突危険度を優先順位にした競合解消が行なわれる。これを存在するすべての ship エレメントに対して、かつ、各タイムステップに対して行なうのである。Fig. 1 はこの戦略を概念的に表わしたものである¹⁶⁾。この戦略は Koyama ら²¹⁾のように相手船の行動を予測して避航の判断をしているのではなく 1 隻との避航行動をあくまでも基本にしたものでありむしろ Colley ら⁹⁾の考え方に近い。そのために総合的な判断ができないなどの不都合な点もあろうが逆にいうと相手船がどのように動いても対処できる非常に簡単な方法である。また、この方法では左から接近してくる 1 隻に対して右に避けたら次のタイムステップでは右から接近してくる別の船に対して危険になり今度は左に避ける (この場合実際はさらに右に避けるが)、次はまた左の船に対して右に避け・・・とジグザグを続ける可能性がある。しかし本システムではファジィ理論を用いたメリットとして少々の変化に対しては柔軟に対応するようである。Fig. 2 は 4 船が同時に一点で出

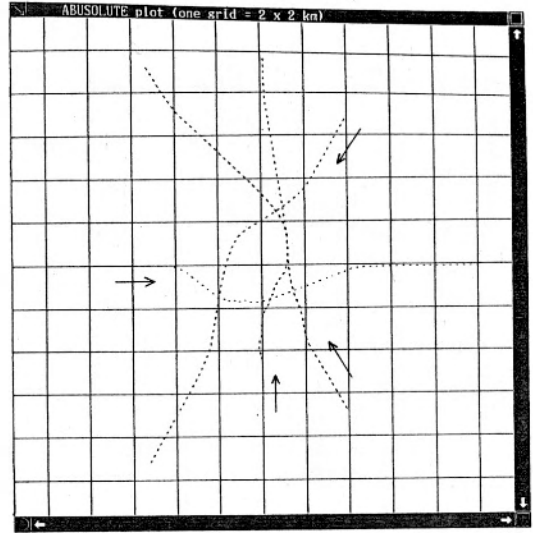


Fig. 2 An example plan view of simulation of a multi-ship encounter

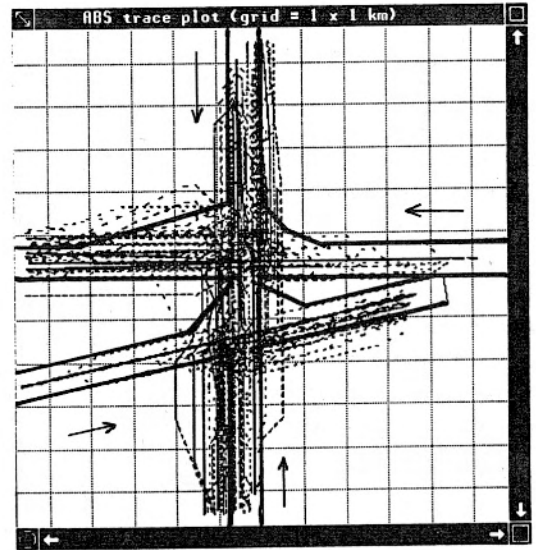


Fig. 3 An example plan view of marine traffic simulation

うような状況におけるシミュレーション例¹⁶⁾であり、Fig. 3 はさらにそれを発展させて井型航路の海上交通シミュレーションを行なった例²¹⁾である。

2.3 航路認識モデル

狭水路などにおける航行ではさらに航路の境界線を認識した操船が必要である。当然航路の中心線上を航行するように操船する。ここでは、航路に幅があり、しかも何かの原因で航路の中心線からはずれて航行しているとしよう。例えば Fig. 4 のような状況を考える。通常は航路制御が働

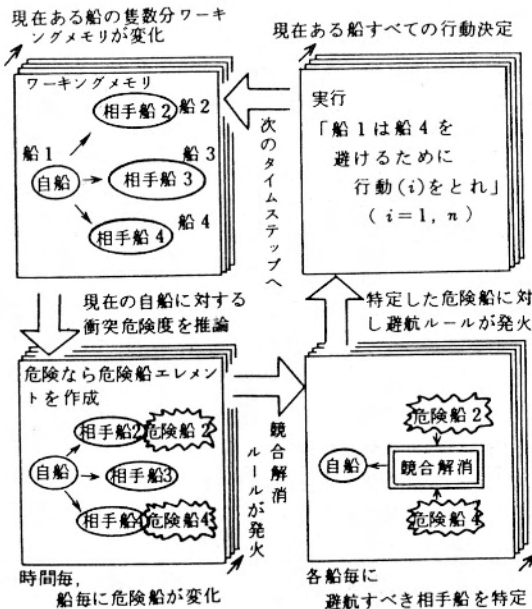


Fig. 1 Conceptual description of the collision avoidance strategy in multi-ship encounter situation

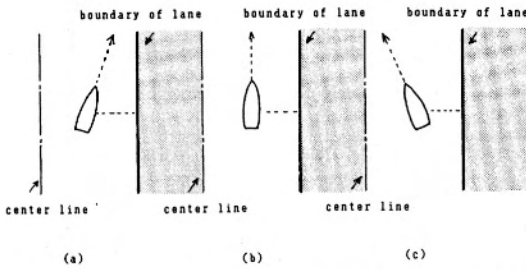


Fig. 4 A ship located offset from a center of a navigation lane

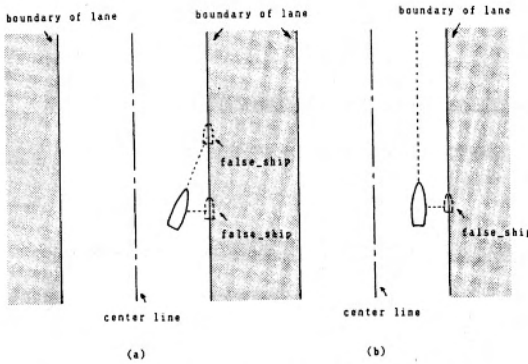


Fig. 5 The "false ships" concept for recognizing the boundary of navigation lane

きもとの設定航路（中心線）に戻る。しかし、航路内で他の船を避航中かどうか。航路内では減速のみで避航するとすれば別だが一般には航路幅が許す範囲で変針するであろう。ここで、航路幅が許す範囲とは何か。これをルール化するためには人間の持つ感覚を表現する必要がある。今までに知られている研究は著者らの知るところない。

Fig. 4 の a~c ではどれを一番危険と感じるか。同然 a である。c だとほっておいてもよい。すなわち、航路境界線からの横移動距離が人間の感じる評価量ではないことは明らかである。では自船進行方向と航路境界線との距離はどうか。良さそうな気もする。しかし、航路境界線の間際を並進しているときに困る。また、同じ距離でも船速が違えば緊迫感も違うであろう。こういった検討から本システムは次のモデルを提案する。

Fig. 5 に示すように自船のまわりに自船とともに航行する 2 隻の架空の船 (false-ship) を航路境界線上におく。1 隻は自船と同じ航路方向の速度で並進し、他の 1 隻は自船が回頭するにつれて前後に移動しながら並進する。自船が航路と並行に航行しているときは両側に並進する false-ship になる。そして、自船の右側の false-ship なら左側に左側の false-ship なら右側に避ける。避けられなければ減速する、false-ship どうしは避航しないとといった若干の修正だけであとは通常の避航ルールが適用できる。この

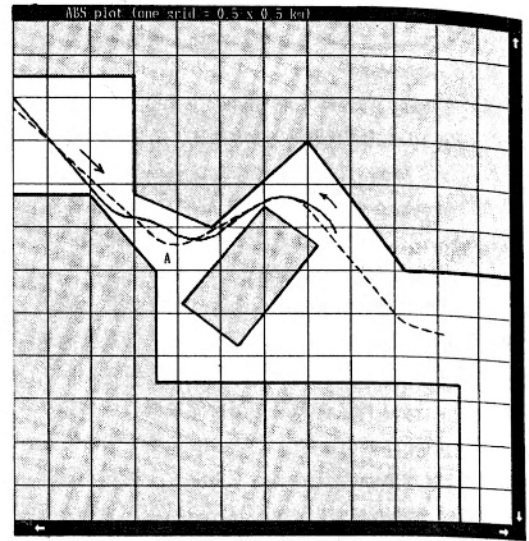


Fig. 6 An example plan view of simulation in a narrow waterway

方法なら直線航路だけでなく屈曲した航路でも計画航路（中心線）と併用することによって航行できる。Fig. 6 はその一例で 2 隻の船が屈曲航路を自動航行しながら A 点付近で最接近し西航船が避航し、逆に南西の海岸線とぶつかりそうになったので避航を早めに切り上げて原航路に復帰している。

3. 結 言

本稿に示したように、船舶の自動航行にはオートパイロットから避航判断にいたる種々の問題が含まれている。したがって、引用した参考文献でもわかるようにこれらの領域で行われてきた研究成果は膨大であり、本稿中では引用しなかったが興味ある論文も多数ある。

しかし、船舶の高度な自動航行に関する研究はまだ始まったばかりである。本稿はその一端を担うものとして始め、航海士や操舵手の知識や判断機能をファジィ理論とエキスパートシステムを用いて行なった。しかし、人間の知恵に迫れば迫るほど、その深い知識や常識、階層的に整理された知識では及びもつかない toss の判断などがあり、知識処理研究としての奥の深さを感じる。最後に本研究の遂行により得られた主な結論を述べる。

- 1) 大洋航行、狭水路航行を問わず計画航路に沿って自動航行し、さらに複数船が行き合う環境でも自動的に避航できる自動航行システムを開発した。
- 2) 本システムは自動航行システムの開発を目的として始めたが、その評価のため作成した操舵者機能を含んだシミュレーションプログラムは、その応用分野として航行自動化システムの評価³²⁾、航路や海上交通システムのアセスメントや計画³¹⁾³³⁾、航行環境をより現実化したイン

テリジェントシミュレータなど、船と人間と環境が一体化した新しいシミュレーションの方法論としての将来性が期待できる。

さらに、本研究の開発を通して感じたこととして次の2点を指摘したい。

3. 航海士の知識表現、複雑な状況での行動決定にあたってはエキスパートシステムの適用が有効であり、かつ不可欠である。

反対に、航海士や操舵手(オートパイロット)のモデル化にあたっては必ずしもファジィ理論を適用する必然性もないし、すべての機能をファジィ制御やファジィ推論で表現したからといって総合的に制御判断能力が増加するわけではない。むしろ、本研究がファジィ理論をほとんどの機能に用いた利点は次にある。

4. 本来、航海士や操舵手が持っている個々の行動ルールはファジィ制御/推論則で表現しやすい。言語変数の変更(人間の持っている概念の再定義、例えば、大洋航行と狭水路航行における危険度の感覚の違い)により同一のファジィルールが全く違う局面にも適用できる。さらに、高速で処理できる二入力一出力の汎用ファジィ制御/推論関数を用意することにより、簡単な関数呼び出しだけでファジィ制御/推論ができる。

なお、本研究の実施にあたり、文部省科学研究費補助金、(財)セコム科学技術振興財団研究助成金の交付を受けたことを付す。

参 考 文 献

- 1) 長谷川和彦, 上月明彦: Fuzzy 制御による自動避航システムに関する研究, 関船誌, 第205号(昭和62年6月), pp. 1-10.
- 2) Hasegawa, K.: Automatic Collision Avoidance System for Ships Using Fuzzy Control, 8th Ship Control Systems Symposium (以下SCSSと略す), Hague, Vol. 1. 2 (Oct. 1987), pp. 34-58.
- 3) 概説されたものとして例えば, 今津隼馬: 避航と衝突予防装置, 初版, 成山堂書店, 昭和59年, pp. 77-96.
- 4) 例えば, 藤井弥平, 巻島勉, 原 潔: 海上交通工学, 初版, 海文堂, 昭和56年, p. 121.
- 5) Goodwin, G.: A Statistical Study of Ship Domains, J. of Navigation, Vol. 28, (1975), pp. 328-344.
- 6) Colley, B. A., Curtis, R. G. and Stockel, C. T.: Manoeuvring Times, Domains and Arenas, J. of Navigation, Vol. 36, (1983), pp. 324-328.
- 7) 長沢 明: 避航を考慮した海上交通シミュレーション, 航海, 第80号(昭和59年6月), pp. 28-34.
- 8) Colley, B. A., Curtis, R. G. and Stocken, C. T.: A Marine Flow and Collision Avoidance Computer Simulation, J. of Navigation, Vol. 37 (1984), pp. 232-250.
- 9) 小林弘明, 恩田裕治: 海上交通の安全評価に関する

- 研究, 航海論, 第79号(昭和63年9月), pp. 17-23.
- 10) 鶴田三郎, 松村尚志, 稲石正明, 今津隼馬, 杉崎昭生: 船舶航行エキスパートシステムの基礎研究—衝突回避エキスパートシステム, 航海論, 第77号(昭和62年9月), pp. 133-139.
- 11) 長澤 明, 原 潔, 井上欣三: 避航操船環境の困難度-I, 航海論, 第79号(昭和63年9月), pp. 91-100.
- 12) 小林弘明, 遠藤 真: 船舶避航操縦の解析, 航海論, 第56号(昭和51年12月), pp. 101-109.
- 13) James, M. K.: Modelling the Decision Process in Computer Simulation of Ship Navigation, J. of Navigation, Vol. 39, (Jan. 1986), pp. 32-48.
- 14) 岩崎寛希, 原 潔: あいまい推論を用いた避航推論モデル, 航海論, 第70号(昭和61年9月), pp. 69-77.
- 15) 長谷川和彦: 船舶の衝突回避システム, オートメーション, Vol. 33, No. 6 (昭和63年6月), pp. 42-49.
- 16) 長谷川和彦: 船舶自動航行システム, ファジィコンピュータ/ファジィエキスパートシステム(廣田 薫監修), 初版, トリケップス, 昭和63年, pp. 135-159.
- 17) Kemp, J.: Behaviour Patterns in Encounters Between Ships, Internationaler Navigations-Kongress (1973).
- 18) 池田裕二: レーダシミュレータによる避航実験と避航方法について, 航海論, 第74号(昭和61年3月), pp. 109-116.
- 19) 不破 健, 田中邦彦: 自動航行に関する一考察, 航海論, 第73号(昭和60年9月), pp. 49-58.
- 20) 今津隼馬, 小山健夫: 避航判定基準の最適化に関する研究-III, 航海論, 第73号(昭和60年9月), pp. 19-26.
- 21) Koyama, T. and Jin, Y.: An Expert System Approach to Collision Avoidance, 8th SCSS, Vol. 3, Hague (Oct. 1987), pp. 3. 234-263.
- 22) 例えば, 岩井 聡: 新訂操船論, 2版, 海文堂, 昭和53年, pp. 36-38.
- 23) 例えば, 広田 実: 船舶制御システム工学, 初版, 昭和57年, pp. 188-189.
- 24) 野本謙作: 自動操船の安定性に就いて, 造船協会論文集, 第104号(昭和33年12月), pp. 53-61.
- 25) Amerongen, J. van, Nauta Lemke, H. R. van and Veen, J. C. T. van der: An Autopilot for Ships Designed with Fuzzy Sets, 5th IFAC/IFIP International Conference, Hague (1977), pp. 479-487.
- 26) 清水 健, 小山健夫: あいまい制御による航路交差点の通過時刻・速度調整, 船論(昭和59年12月), pp. 201-206.
- 27) Norrbinn, N. H. and Goransson, S.: A Study of the Safety of Two-way Traffic in a Panama Canal Bend, 5th SCSS, Vol. 3, Annapolis (Oct. 1978), pp. (K1 3-)1-36.
- 28) たとえば, Amerongen, J. van and Land, E. F. A.: An Adaptive Autopilot for Trackkeeping, International Symposium on Ship Operation Automation, Tokyo (Nov. 1979), pp. 99-108.
- 29) Koyama, T. and Shimizu, K.: Fundamentals of Automatic Harbour Manoeuvring, 7th SCSS,

- Vol. 3, Bath (Sep. 1984), pp. 123-145.
- 30) Blackwell, G. K., Burns, R. S. and Stockel, C. T.: An Expert Systems Approach to Collision Avoidance, Summer Computer Simulation Conference, Montreal (July 1987), pp. 43-48.
- 31) 長谷川和彦：航路と海上交通システムのための新しいシミュレーション手法—SMARTS, 平成元年度日本航海学会第80回学術講演会にて発表(平成元年5月).
- 32) 不破 健：自動航行システムの安全評価, 出入港自動化システムの評価技術特別講演会講演集(平成元年3月), pp. 84-101.
- 33) Koyama, T. and Jin, Y.: On the Design of the Marine Traffic Control System, 船論, (1st Report), 第162号(昭和62年12月), pp. 193-202, (2nd Report), 第164号(昭和63年12月), pp. 249-261.