システム/制御/情報, Vol. 38, No. 5, pp. 268～275, 1994

解　説

インテリジェント・シップ
― 超自動化船への挑戦

長谷川　和彦*

1. はじめに

シーマンシップという言葉がある.「最近の乗組員はシーマンシップに欠ける」といった使い方をする. 日本ではフレンドシップやリーダシップという言葉からの連想か, 船乗りの精神論を説いた言葉のような誤解が多いが, 実は純粋に操船技術のことである. もっとも, この機械化, 自動化の時代に, 未だに双眼鏡と海図が手放せない船舶の運航の実態を考えると, この精神論もまんざらうそではなさそうである.

ところが, 近年の船員不足, それを補う外国船員の言語や慣習, 教育の違いなどによるまさにシーマンシップの低下に伴い, 船舶の運航の高度自動化に関する関心が急激に高まった. 日本では運輸省が主導して, 超自動化船プロジェクト (1983 年度～88 年度) が産官学の共同で実施され[1], 現在は各造船所レベルで実用化のための開発研究が行われている. その後, それに刺激されてか, イギリスやオランダをはじめ各国で同様のプロジェクトが進行中, もしくは計画中である.

一方, アメリカでは 1989 年アラスカ沖で起きた大型タンカー Exxon Valdez の座礁に伴う大量の原油流出事故が契機となり,「バルディスの原則」と呼ばれる企業活動の環境責任に関する原則が公布された. さらに, OPA '90 の名で知られる油濁法が制定されるに至って, もしひとたびアメリカ領土で原油流出事故を起こすと, 従来の保険ではカバーできないばかりか企業の存続にも影響を与える莫大な環境修復費用がかかるようになった. 国際海事機関 (IMO) でもそれに伴って, タンカーの二重船殻化の業務付けや操縦性能の基準化を行い, 操縦不良船の排除とともに, 船員の資質の規定を実施しようとしている.

こういった背景のもと, 船舶の自動化は,

(1) 乗組員の負担を軽減するための自動化の時代 (1920 年～70 年)

(2) 省エネルギーなど徹底的な合理化のための自動化の時代 (1970 年代)

を経て, 新たな転換を求められてきている. 今これを仮に,

(3) 人間と環境にやさしい自動化の時代 (1980 年～)

と呼ぶことにしよう. それぞれの時代に古典制御理論, 現代制御理論, そして, AI, ファジィ, ニューロネットワークといった理論が登場しているのが興味深い.

本稿では, 運輸省の超自動化船プロジェクトの概要と, それと一部オーバラップする形で行った筆者の研究を中心に紹介し, 船舶の運航の自動化の最新の状況の一報告としたい.

2. 船舶の運航形態とその特徴

船舶は他の乗り物といくつかの点で違った側面をもっている.

運動面では,

(1) 運動の時定数が大きい.

(2) 低速時, 逆転停止時に針路不安定となる.

機能面では,

(3) 方向指示器がない.

(4) 能動的ブレーキがない.

交通管制面では,

(5) 平面交通である.

(6) 交差点に信号がないし, あったとしてもすぐには止まれない.

(7) 航路のない海面がほとんどである.

(8) 管制官や他の船舶との交信は一般に難しい.

環境面では,

(9) 東京湾・大阪湾・瀬戸内海などの過密水域では, 漁労船やプレジャーボートと混在している.

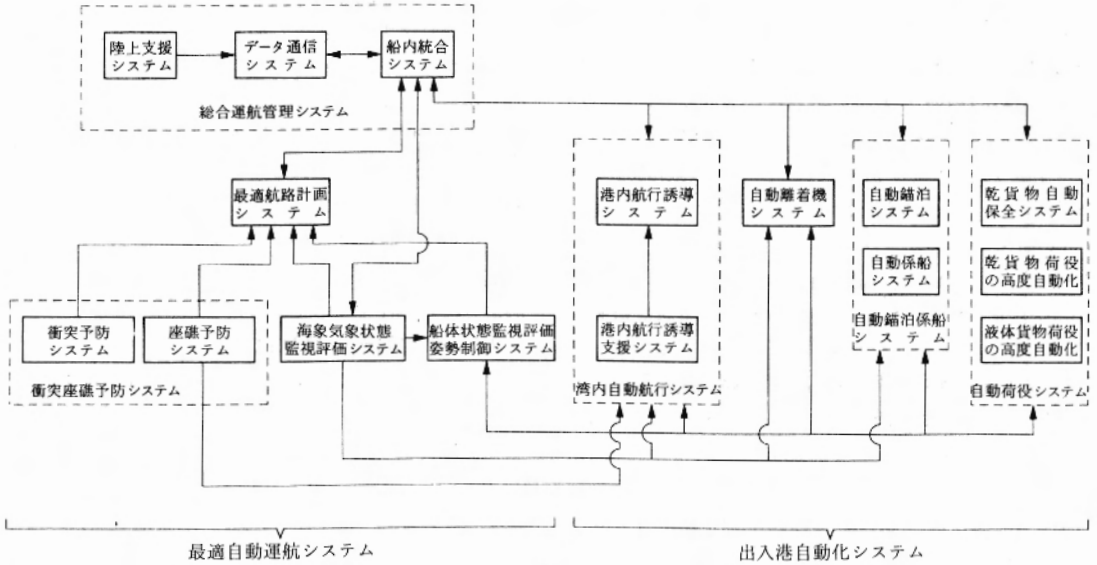
(10) 内海や港湾域では風や潮流の影響, 外海では風浪の影響が大きい.

そして, 最後に,

(11) 原則として, ビルや家と同じ単品生産品であり, 同時建造でない限り同じ性能のものはない.

* 大阪大学　工学部

Key Words : intelligent control, ship navigation, collision avoidance, berthing control, safety assessment.



第1図　「高度自動航行システム」の全体構成[2)]

こうした船舶の特徴から，航海士と操舵員が機能分離していたり，内海や港湾域ではその海域を知り尽くしたパイロット（水先案内人）が操船の指示をすることになっている．船舶の運航の自動化にあたってはこの辺の事情を知っていないとなかなかうまくいかない．

3. 船舶の自動航行システム

第1図に運輸省が主導し日本造船研究協会が1988年度から6年にわたって行った，高度自動運航システムの全体構成を示す[2)]．自動運航システムと書いてある部分が大洋航海中と入港直前までの部分で，出入港自動化システムと書いてある部分がその後，着桟までを自動的に行う部分である．このシステムが完成すると，完全に無人化した船の運航が可能となるわけであるが，筆者自身が直接関わった訳ではないので，このシステムの目指した自動化のレベル[3),4)]はわからない．しかし，機能的には何をしようとしているのか理解いただけると思う．

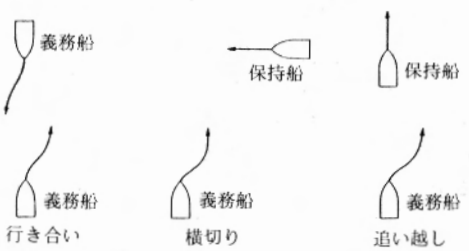
ここではそのうち，衝突予防システムについて紹介したい．

3.1　衝突のおそれと回避動作

衝突を防止するときもっとも重要なのは，衝突する危険を検知すること，検知したら，いつ，どのように衝突を回避するかを決定し，行動することである．最近は，工場内搬送ロボットなどにおいて同様のことが行われているので，すでにそのアルゴリズムは明らかのように思われるが，工場内搬送ロボットの場合には，比較的近距離の固定物標が主な対象であるのに対して，船舶の場合にはまず，実際に行動している他の非自動化船と同様に法規に則って行動しなければならない点，種々の方向（主には同航船と反航船）からくる速度の違う物標に対して行動しなければならない点が大きく違う．そこで，まずは少し堅い話になるが，法規の話から始めよう．

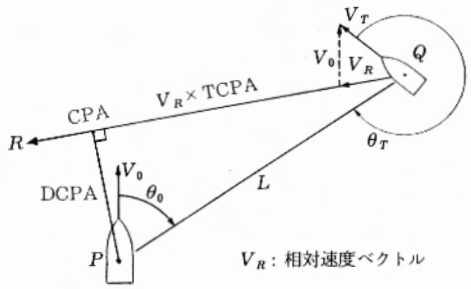
船舶には，なだしお裁判で問題となったのでご存知の方もおられると思うが，衝突回避（避航と呼ぶ）を行う際の基本動作がある．原則的には相手を右手にみる方に避航の義務があり（避航義務船と呼ぶ），逆に相手の船には針路や速力を保持する義務がある（保持船と呼ぶ）．そして，回避動作は船舶が右側通航であること，相手船の後ろ側を通過する必要から一般的には右側に避ける．第2図にこの関係を示す．

そして，法律（海上衝突予防法第2章航法より抜粋，一部省略）によると，(1)「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判断しなければならず」とある．航海士が接近中の相手船のコンパス方位をときどき



第2図　出合い状況による義務船と保持船

調べているのはこのためである．レーダを使用している場合には第3図のような関係となる．すなわち，自船から見た他船の相対ベクトルが自船に向かっていれば（第3で相手船の相対ベクトルが $\vec{QP}$ の方向を向いていれば）衝突する．一般的には，TCPA（最接近時間）後に，CPA（最接近点）において，DCPA（最接近距離）で最接近する．この作業はかつてレーダ上でマーカを使って行われていた（レーダプロッティングと呼ぶ）．最近の大型船では，ARPA (Automated Radar Plotting Apparatus) と呼ばれる自動追尾・警報装置が搭載されていることが多く，これが自動的に行う．しかし，東京湾や大阪湾，瀬戸内海などの超過密海域では警報が鳴り止まず，結局は警報を切って，やはり双眼鏡で人間が見張っている現状では問題点が多い[5]．



第3図　自船から見た相手船の動き

次に衝突回避の時期と行動であるが，先の法律はさらにこう規定している．(2)「船舶は，他の船舶との衝突を避けるための動作を取る場合は，できる限り，十分に余裕のある時期に，船舶の慣行に従ってためらわずにその動作をとらねばならない．」そして，その行動として，(3)「針路又は速力の変更を行う場合は，できる限り，その変更を他の船舶が容易に認めることができるように大幅に行わなければならない．」では，どのように避けるかというと，(4)「他の船舶との間に安全な距離を保って通過することができるように」行動し，(5)「その動作の効果を当該他の船舶が通過して十分に遠ざかるまで慎重に確かめなければならない．」

杓子定規な法律文でありながら肝心なところは波線で示したようにあいまいで結局よくわからない．(1)の衝突のおそれもどこまでが安全でどこからが危険なのか，「ぶつかれば，危険なのに行動した航海士が悪い，事故が起こらないうちは安全である」といった航海士の負担に安全をまかせた結果ともいえる．(2)の余裕のある時期にとはいっても，極端だが横浜を出たての船がサンフランシスコを出港したばかりの反航船とのDCPAが0だからといって避航する必要はなく，(3)は船舶に方向指示器か，船舶間の通信体制（無線とは限らない）が整っていればすむわけで，前方をのろのろ走っている車の後ろからパッシングをしたり，車体を左右に揺すっていやがらせをするトラックの行動のようなことをわざわざ法律文で規定している．基本的には双方が法規に則って行動しているのであれば，(4)，(5)を実行すればよいわけであるが，実際には他の船舶が一隻であることはなく，東京湾でこの法律のとおり実行しようとすると，高速道路の合流路で入るタイミングを逸した新米ドライバのように立ち往生するのは必定である．

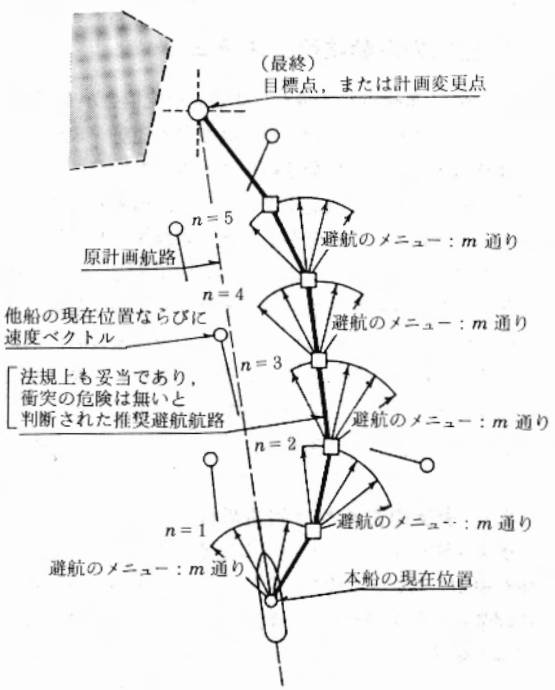
3.2　衝突回避の自動化

このようにあいまいでかつ，複雑な位置関係にも対応しなければならない避航動作を自動化することは，船舶の自動航行システムが絶対に避けては通れない問題である．

この問題に対するアプローチにはさまざまな提案があるが，大きく分けてふたつある．

(1) 避航経路探索法[6]

第4図に示すように，自船が現在取り得る経路水域を木表現し，予測時間の経過に沿って異なったレベルの階層に分け，それぞれのレベルごとに衝突危険度最小の条件を始めとする避航経路長，操舵頻度，法律などの条件を勘案してコスト評価する方法である．



第4図　避航経路の探索法[6]

(2) ファジィ推論・制御法[7),8)]

上述したように，法律および実際の避航動作はクリスプなものではなく，連続的に状態が変化した中から判断し行動していることに着目し，衝突のおそれ（衝突危険度）を DCPA と TCPA からファジィ推論し，その後の避航動作もファジィ推論した衝突危険度に応じて決定し，決められた行動はやはりファジィ制御により実現する方法である．人間は状況に応じて自身のもつ概念を臨機応変に変えているが，この方法では言語変数（たとえば，近い，遠い）の定義域を変えることにより，大洋中から狭い水域まで同一の推論で実現できるなど，人間の判断に近い行動戦略が使用できる．

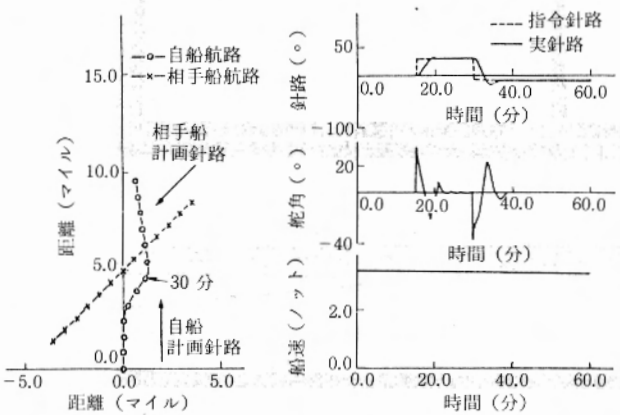
先に述べた「超自動化船」プロジェクトでは **(1)** を，筆者は **(2)** を用いている．

以下，筆者の用いた方法による結果を示す．

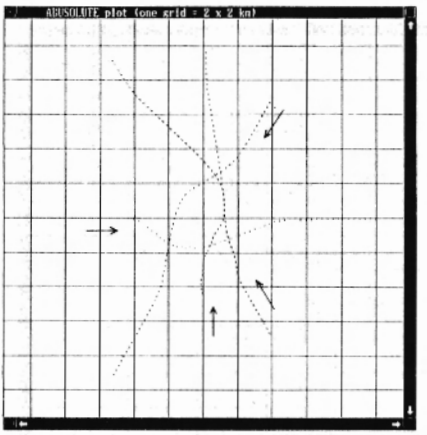
第 5 図に，**(2)** の方法による斜め横切り船の避航例を示す[8)]．左が航跡で 30 分後に 5 マイル先で衝突する設定のシミュレーション結果である．自船が義務船なので衝突の約 15 分前に「避航のための変針指令」が出され，それを実現するために操舵して避航している．

さらに，複数船が航行している状況に対応するため，このシステムをエキスパートシステム化したのが筆者らの提案する SAFES (Ship Auto-navigation Fuzzy Expert System) である[9)]．第 6 図は SAFES による四船避航の例であり，図中央で四船が衝突する設定であるが，それぞれの状況に応じて避航している．

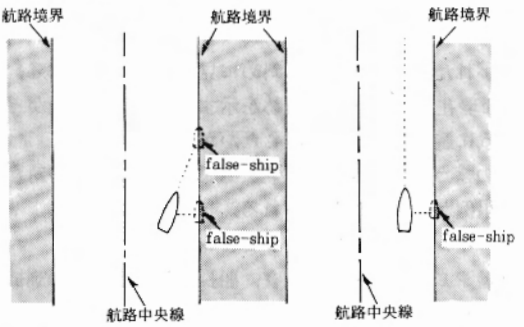
さらに，この SAFES では，変針点は衝突しなければならないブイとして[7),8)]，また，航路境界に対しては第 7 図に示すように，自船の船首方向ベクトルと航路境界との交点，および自船と航路境界の法線方向ベクトルとの交点に航路境界に沿って航行する二隻（左図），または一隻（右図）の架空の相手船 “false-ship” という概念[9)]を導入して，ともに他船と同様に扱っている．第 8 図に狭水路を二船が行き合いながら通過するシミュレーション結果を示すが，ちょうど図中の点 A で二船が出合い，主に西航船が航路境界の制限範囲内で避航している．



第 5 図　ファジィ推論・制御による避航操船例[7),8)]



第 6 図　SAFES による複数船避航の例[9)]



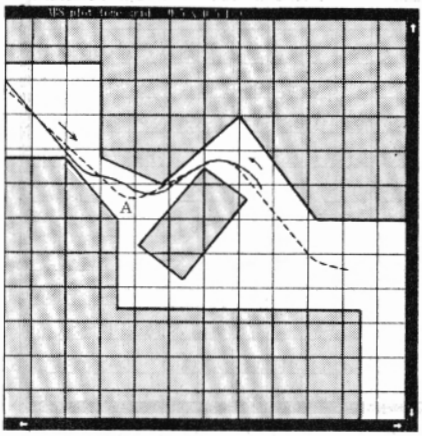
(a)　架空の相手船二隻　　(b)　架空の相手船一隻

第 7 図　“False-ship” の概念による航路認識[9)]

3.3　リアルな航行環境の再現とその応用

SAFES は，前述のように自動化船への応用を目指して開発してきた訳であるが，第 8 図に示すようなシミュレーションを繰り返すうちに新たな応用例が見えてきた．それが，航行環境の再現である．相手船を統計データによりその海域の交通量に合わせて自動作成し発生させれば，その海域の交通が再現できる．一種のモンテカルロシミュレーションであるが，各船が自分の航路計画に沿って航行しながら必要なら避航を行うかなりリアルなシミュレーションが可能である．

第 9 図に実際の備讃瀬戸航路をモデル化した航路で，現在の交通量に合わせて行ったシミュレーションの例を示す．第 9 図は (a) 現在の航路の状況を真上から見た鳥瞰図であり，現在は二十余隻の船が航行中である．それをカメラ



第8図　SAFESによる狭水路航行の例[9]

と書かれた位置の上空から斜めに見たのが (b) である．(c) は現在までの各船の航跡を示す．それぞれの船がどのように避航したり追い越したかがわかる．

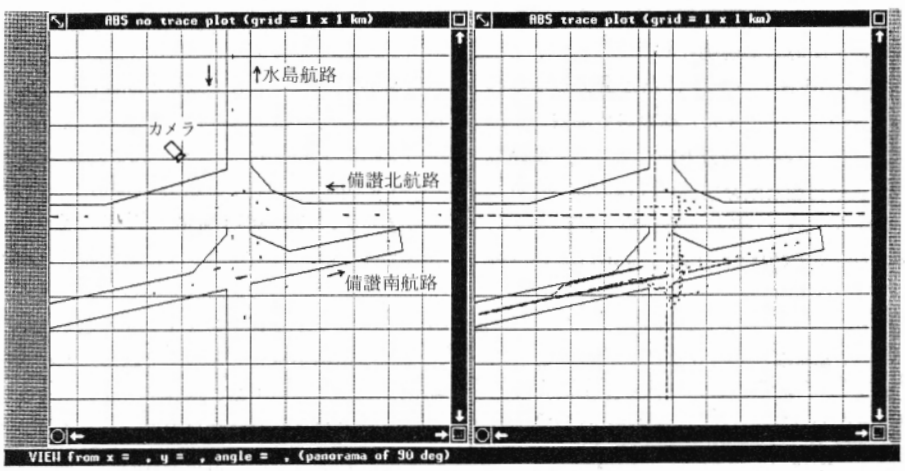
このように航行環境が再現できると，SAFES の新たな応用例がいくつか考えられる．

(1) インテリジェント・シミュレータ[10]

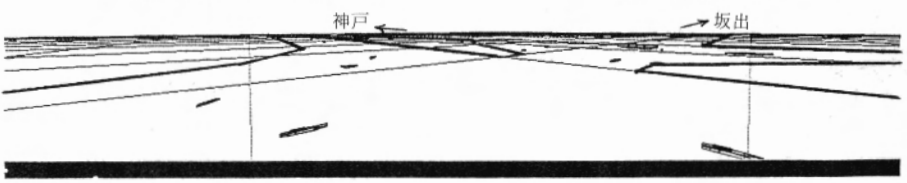
操船シミュレータは，現在，船長・航海士などの訓練をはじめとした目的のため，世界各国で広く使用されているが，輻輳海域での操船訓練のためにも使用できる．今までのシミュレータでは，相手船はすでに決められた行動しか取れず，あるいはオペレータが作意的に針路変更などをさせていた．このシステムを使うと，相手船は法規に則って航行する（すなわち，自船が権利船である場合は避航してくれる）とともに，もし，自船が不適切な措置を取ったときにも相手船がそれに合わせて行動する．実際にシミュレータとして使えるためには，推論時間とグラフィックス処理時間の大幅な短縮が必要である．ただし，第9図の場合，すべての船が他のすべての相手船に対して行動していたのに対し，インテリジェント・シミュレータでは，自分の視野に入る船舶にのみ SAFES の機能をもたせればよいので，いくらかの手抜きは可能である．

(2) 自動化システムの評価検証

ある自動化システムによって行動する船を，この環境の中で航行させることによって，種々の状況における自動化船の行動がわかるので，システムの検証ができる．現に第9図は，SAFES 自身の検証のため種々の出合い状況を自動的に再現できるように開発したシミュレーションプログラムである．このシミュレーションにより，知識ベースのチューニングや追加を行った．



(a)　ある時刻での船影　　(c)　全般船の航跡



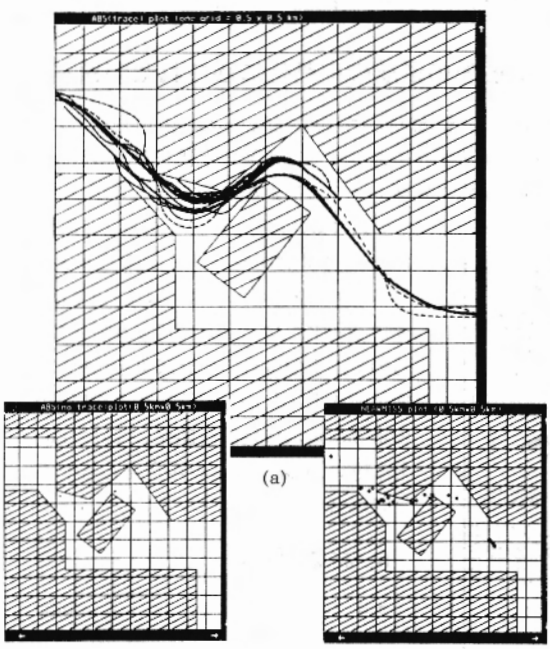
(b)　カメラからみた航路

第9図　SAFES による海上交通環境の再現

(3) 安全性評価手法[11]

ある新しい航路を計画するときは，その費用が莫大であり，安全性の確認が必要である．今までは，単純に平均的な航行船舶の運動性能などから航路幅などを決めていた．また，許容交通量などについてマクロシミュレーションと呼ばれる方法が使われたり，航海士の操船感覚について操船シミュレータが用いられていた．しかし，本システムを用いることにより平均的な技術をもった航海士の行動を再現できるので，統計的にどのような危険が潜在しているか，どこが航行上危険かなど客観的に評価することができる．

第10図は，先ほど狭水路において（i）最狭部を行き合い航路にする案と，（ii）南側の航路を整備して最狭部を一方通航にする代替案の安全性評価を行った結果のうち，（ii）案のものである．(a) が5時間後の全航跡，(b) は現在の航路の状況，(c) にはそれまでに起きたニアミス（○印）と航路の逸脱（座礁）（×印）である．ここでニアミスとは，ファジィ推論した衝突危険度が“非常に危険”な点のことである．屈曲部ではかなり危険であるが，反面，図では見にくいが，航路の逸脱は4か所と意外と少ない．最終的には屈曲部でのニアミスの少ない（ii）案を提案した．このように，代替案の評価を定量的に行うことができる．



第10図　SAFESによる輻輳海域の安全性評価例[11]

4. 船舶の自動着桟システム

運輸省の超自動化船プロジェクトのもうひとつのサブシステムは，出入港自動化システムである．

最初に述べたように，船は低速では操舵性が悪く，自分の制御力（舵，プロペラ）だけでは着桟できない．カーフェリーなどに乗ると，あたかも，自宅の駐車場に一度の切り替えしもせずにピタッとつけるベテランドライバと同様の印象をもつが，この場合，船首や船尾にある横向きに作動するサイドスラスタと呼ばれる補助推進器を併用しており，しかも，船長はウィング（船橋から船側に張り出した部分）から身を乗り出すようにして岸壁との距離をセンチ単位で調整している．なにせ，質量が大きいので加速度が小さくてもその衝突力は大きく，まして，大型タンカーにおいては何隻ものタグボートに助けられて着桟している．

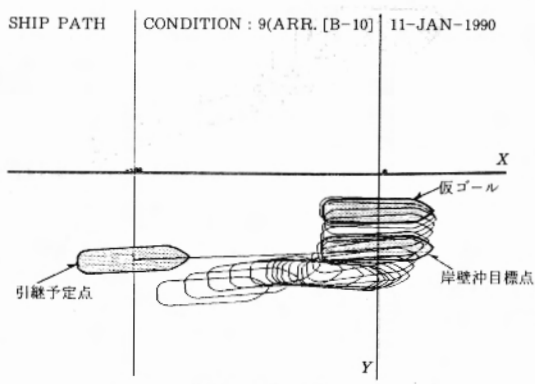
自動車においてさえ，未だに自動駐車装置（これがあれば助かる人は多いはず）が無いのに，はたして，船の着桟を自動化できるのかと疑われる方も多いと思う．しかし，それほどその作業は大変であり，自動化の要求は強い．

これに対しても，いくつかのアプローチがすでに提案されている．

(1) フィードバック・フィードフォワード併用方式[12),13)]
(2) 最適制御方式[14),15)]
(3) 予見ファジィ制御方式[16)]
(4) ニューロネットワーク方式[17),18)]
(5) 知識ベース方式[19)]

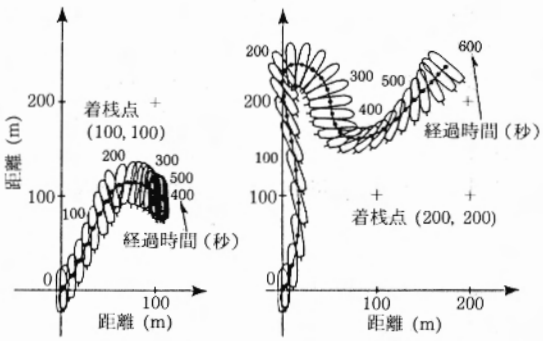
それぞれの方式についての詳しい説明は，紙面の関係で原典を見ていただくとして，ここでは船の着桟制御がどのように行われるのかを見ていただくために，いくつかの例を示す．

第11図は，はじめて実船を用いて行われた自動着桟

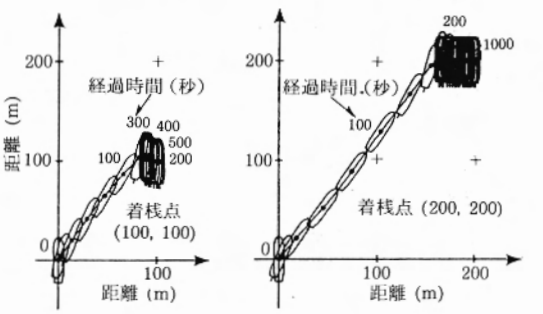


第11図　実船による自動着桟実験例[13)]

の結果である[13]．もともとは上記(3)の方式[16]を導入する予定であったのだが，実際には堅実な上記(1)の方式を用いている．今後，この種のシステムが実用化されるにあたって何かの示唆を与えているようにも見える．第12図は線形レギュレータと最適制御理論を用いたシミュレーションの比較で，目標への偏差が大きい場合に最適制御理論が有効であることを示している[15]．

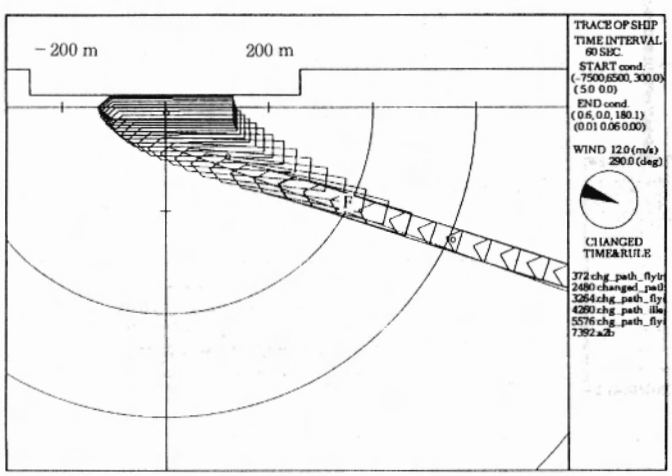


(a)　線形レギュレータによる着桟運動



(b)　最適制御理論による着桟運動

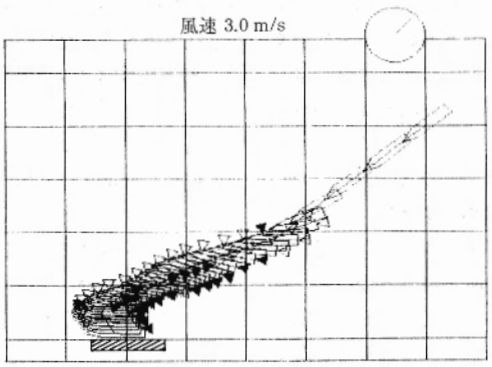
第12図　線形レギュレータと最適制御理論による着桟運度の比較[15]



第13図　知識ベースによる自動着桟例[19]

一方，手足は動くが明示的にルールが表現できないときは，ニューロネットワークが利用できる．大和ら[17]は当初この方式を用いていたが，その後は知識ベース方式に変更した[19]．第13図にその例を示す[19]．

筆者らは大和ら[17]の追試を目的に，舵とプロペラのみを使う着桟点近傍までのシミュレーションを行い，予想以上の成果を得た[18]ので，現在，タグを使った最終段階を含めて，ニューラルネットワークにより行うシステムに拡張中である．第14図にその一例を示す[20]．図中，船の周りに見えるタグボート（▽が押し，▼が曳き）であり，やや見にくいがタグボートで微妙に姿勢を調整しながら着桟している．



第14図　ニューラルネットワークによる自動着桟例[20]

5. 船舶の運航の自動化に残された問題

ここでは紙面の都合で触れなかったが，自動化システムを実用化するにあたって，非常に重要な問題のひとつに画像情報の処理，センサ技術がある．

いわゆるコンピュータビジョンであり，GPS（衛星測距システム）などの計測システムであるが，これらについては急速にハード，ソフト共に日々進歩しているので，その分野の研究成果を船舶にも応用できる．しかし，着桟時の接岸速度のように新たな装置を開発しなければ十分な精度が保証されない場合もあるので，注意が必要である．

6. おわりに

エキスパートシステム，ファジィ制御，ニューラルネットワーク，遺伝的アルゴリズム等々インテリジェント・シップを実現するためのツールは整いつつある．しかし，フィードバック制御に代表され

る古典制御手法は今も健在である．それはちょうど，ハイテク機器に囲まれた船橋で，双眼鏡で目視し，海図にコンパスで距離を書き込んでいる現状と似ている．大阪の新交通システム“ニュートラム”の事故のように，自動化システムには必ず思いもよらない落とし穴がある．

筆者は自動化船を目指して研究を続けているが，その奥には常にライバルとしての人間がいる．人間のもつ驚異的な総合的判断能力，計算機も何も使わないに最適解を導く本能，そして，とっさの判断など，当分人間の能力との競争は続きそうである．しかし，ヒューマンエラーがある限り，自動化機器には将来がある．自動化システムの弱点が見えるかどうかがシーマンシップの条件となる．そして，「シーマンシップの高い機械」と言われるようなシステムの開発をこれからも続けていきたい．

(1994年3月12日受付)

参考文献

1) 大島ほか：高信頼度知能化船（高度自動運航システム（その1）～（その13））；日本造船学会誌，No. 721～723, No. 725～729 (1988～1989)
2) 原，大和：海陸一体運航技術とインフラ整備；日本造船学会誌，No. 769, pp. 455～462 (1993)
3) T. B. Sheridan : Telerobotics, Automation, and Human Supervisory Control, MIT Press (1992)
4) 稲垣：誰のための自動化？；計測と制御，Vol. 32, No. 3, pp. 181～186 (1993)
5) 長谷川，山下：船舶の衝突予防援助装置の利用実態と問題点；第17回安全工学シンポジウム講演予稿集，pp. 69～72 (1987)
6) 葛西：狭水域航行の自動化；日本造船学会運動性能研究委員会第8回シンポジウム，pp. 59～87 (1991)
7) 長谷川，上月：Fuzzy制御による自動避航システムに関する研究；関西造船協会誌，No. 205, pp. 1～10 (1987)
8) 長谷川：船舶の衝突回避システム；オートメーション，Vol. 33, No. 6, pp. 42～49 (1988)
9) 長谷川，上月，村松，小峰，渡部：船舶自動航行ファジィエキスパートシステム (SAFES)；日本造船学会論文集，Vol. 116, pp. 445～452 (1989)
10) K. Kose, K. Hasegawa, H. Iwasaki and F. Ohkawa : On an Intelligent Harbor Maneuvering Simulator and Its Applications ; Proc. of MARSIM & ICSM 90, pp. 151～158 (1990)
11) 長谷川，藤田：船舶自動航行エキスパートシステムの狭水路航行アセスメントへの適用；関西造船協会誌，No. 220, pp. 129～133 (1993)
12) 小瀬，福戸，菅野，赤木，原田：船の自動離着桟システムに関する研究；日本造船学会論文集，Vol. 160, pp. 103～110 (1986)
13) 高井，大津：汐路丸による自動離着桟実験について；日本航海学会論文集，Vol. 83, pp. 267～276 (1990)
14) 小山，金（雁），金（奎）：船の自動離着桟のシステム的考察（第1報）；日本造船学会論文集，Vol. 162, pp. 201～210 (1987)
15) 正司，大津，堀田：最適制御理論による操船の最適化と自動化について（第一～三報）；日本造船学会論文集，Vol. 172～174 (1992～1993)
16) T. Takai and H. Yoshihisa : An Automatic Manoeuvring System in Berthing ; Proc. of 8th Ship Control Systems Symposium (SCSS), Vol. 3, pp. 3. 183～201 (1987)
17) H. Yamato, H. Uetsuki and T. Koyama : Automatic Berthing by the Neural Controller ; Proc. of 9th SCSS, Vol. 3, pp. 3. 183～201 (1990)
18) 長谷川，木寺：ニューラルネットワークと知識ベースを併用した自動着桟システム；関西造船協会誌，No. 220, pp. 135～143 (1993)
19) 大和，小山，中川：エキスパートシステムによる自動着桟制御；日本造船学会論文集，Vol. 174, pp. 327～337 (1993)
20) K. Hasegawa and K. Fukutomi : On Harbour Manoeuvring and Neural Control System for Berthing with Tug Operation ; Proc. of Intern'l Conf. Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC '94), (1994) (to appear)