

8 港内操船の自動化への挑戦

長谷川和彦^{*}・山本郁夫[†]・正司公一[‡]

Challenge to Automatic Harbour Navigation System

Kazuhiko HASEGAWA, Ikuo YAMAMOTO and Kouichi SHOUJI

Summary

Automation in harbour manoeuvring is one of the most challenging problems in the automation of ship navigation. The problem can be characterised as track-keeping or guidance control, but at the same time it will be characterised as multiple variables to be controlled. A ship has normally poor controllability in low speed, but is required accurate sensor measurements and control result, to meet the safety issue. In this paper, the survey of recent researches as well as the theories applied for harbour manoeuvring are briefly but clearly introduced. Then two cases applied to the actual ships are introduced. Lastly, future technical trends for harbour automatic or guidance manoeuvre are forecast including the development of various supporting infrastructures on shore, system integration and new ship management system.

8.1 序

船舶は自動化の進んだ交通機関である。その長時間で過酷な労働環境のゆえ古くからオートパイロットが開発され、また、機関の自動化も進んでいる。しかし、いくら大洋航行中の自動化が進んでも狭水路や港湾域では人手に頼らざるを得ないのが現状である。

こうした状況への自動化を始めて推進したのは昭和57(1982)年8月に出された運輸技術審議会の第13号答申最近における産業構造の変化、要素技術の進展等に対応して今後推進すべき造船技術開発についてである¹⁾。本題からややそれるがその後のプロジェクト開発の契機となった答申であるのでその後の経緯を含めて紹介する。この答申の中では高信頼度知能化船(Fig.1)¹⁾および造船ロボットが今後取り組むべき重要な技術開発課題として取り上げられた。このうち、高信頼度知能化船について言えば、さらに、高信頼度プラント、海陸一体化と知能化による高度自動運航システムそして新居住・救命システムが具体的課題として提案された。このうち、海陸一体化と知能化による高度自動運航システムが日本造船研究協会のプロジェクト高度自動運航システムの研究開発(Fig.2)²⁾³⁾として昭和58(1983)年から昭和63(1988)年まで産官学の参加のもと行われた。この研究では、さらに最適自動運航システムと出入港自動化システムに分け、前者では衝突座礁予防システムが後者では自動離着岸システムが特に重要なサブテーマとして研究が進められた。

時は折しも人工知能研究の最盛期であり、同じ頃日本造船研究協会のプロジェクトとして始まった造船CIMSプロジェクトと同様、エキスパートシステムのかっこうの応用例として種々のパイロットシステムが開発され、最後は運輸大臣を招いた公開模型実験を行って、華々しく終了した。

^{*} 大阪大学工学部 [†] 三菱重工業(株)技術本部 [‡] 石川島播磨重工業(株)技術研究所

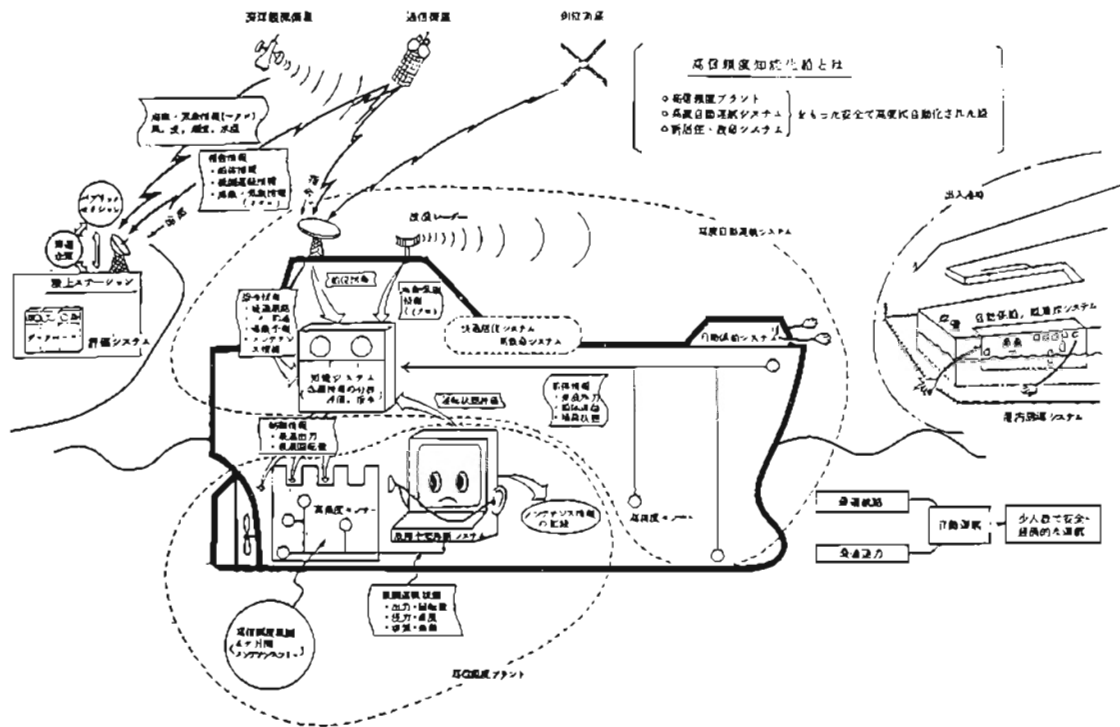


Fig.1 Concept of intelligent and high-reliable techniques to be applied to a ship¹⁾

その後の研究は、各事業所毎あるいは研究者毎の開発ないし研究へと移って行ったが、実用化へ向けての研究は必ずしも順調とは言えない。原因としては、バブル崩壊などの経済的理由もあるが、ひとつには小山⁴⁾が指摘するように、機能が高度化するほど装置の安全性の証明が困難になる点があげられる。いかに要素技術として完成していても、システムとなるとその信頼性を上げるためにはシステム統合技術はもちろん、社会システムや法律への対応など技術以外への対応が必要なことも大きい。

しかし、高度自動運航システムプロジェクト終了直後に起こったエクソンバルディス号の原油流出事故を始め、世界中でタンカーの座礁や衝突などによる原油流出事故は多発しており、日本でも、ナホトカ号の事故を契機にタンカーの安全運航に関する対策を世界レベルで規制しようとする動きがますます活発になると思われる。

一方、世界的に見ると港内操船の自動化に関する試みは日本のプロジェクト以外ほとんどなく、この点でも日本はすでに技術的にはかなりのレベルにあると言える。こういう状況で港内操船の自動化への挑戦と題した章を起こすことにはふたつの大きな意味があると思う。ひとつは高度自動運航システムプロジェクトで得た技術を過去の産物とすることなく持続して研究開発を促すこと、そして、もう一つはこの種の研究をただ単なる要素技術の応用として捉えるのではなく、常に実用化のための努力を惜しまないことである。この章を通して著者らの挑戦をくんでいただければ幸いである。

最後にこの章の概略を述べる。まず、高度自動運航システムプロジェクト以降に行われた研究を中心とした紹介を兼ね、港内操船の自動化に必要な要素技術を展望する。次に、現在の制御技術を概説し、港内操船の自動化に必要な制御方法について述べる。また、新しい技術に基づく最新の理

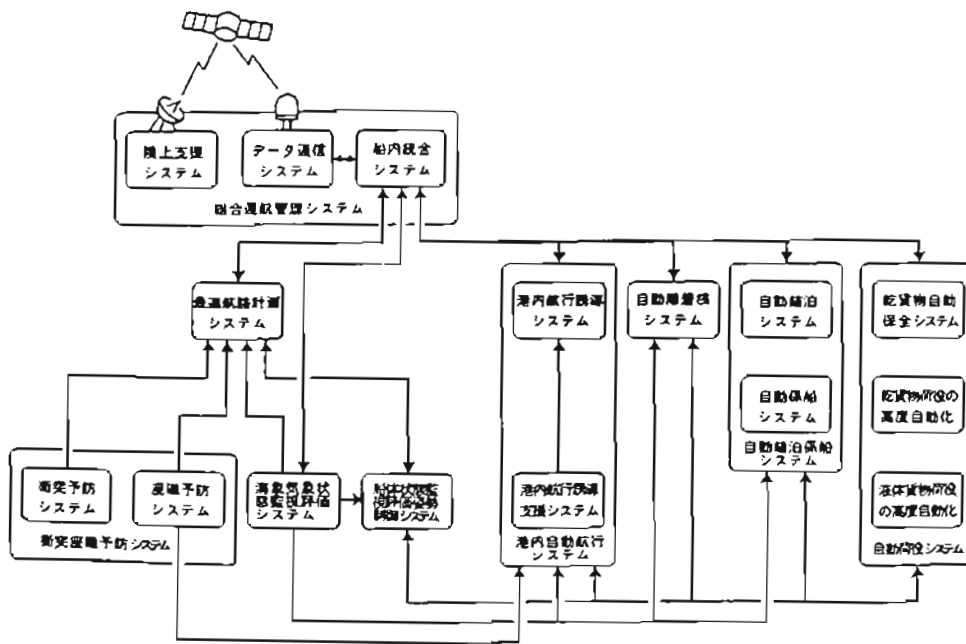


Fig.2 Overview of highly automated navigation system³⁾

論を実船へ適用された2例について述べ、最後に、近未来船のコンセプト等を含めた将来の展開を論じる。

8.2 港内操船自動化の技術展望

8.2.1 港内操船自動化に必要な要素技術

ここでは、港内操船に必要な要素技術および問題点について述べてみたい。前節で述べたように日本における港内操船の自動化研究は日本造船研究協会の高度自動運航システムプロジェクトによって始まった。このプロジェクトの経緯および結果については前述の文献^{2),3)}および第8回運動性能研究委員会シンポジウム船の運航自動化技術第3章⁵⁾および第4章⁶⁾に詳しいのでそちらに譲る。

港内操船の自動化では例えばFig. 3に示すようにいくつかのサブシステム、センサー技術や通信技術が必要である。ここでは、それをもとにして要素技術別に次のように分類してみる。

(1) 港内統合システム

これは全体を統合総括する部分であり、現在の船内LANおよびシステム統合化技術により可能と思われる。しかし、問題はむしろソフトであり、前節で述べたように巨大システムの信頼性を上げるための統合化は予想以上に難しいはずである。この辺の事情は本シンポジウム第10章に詳しいので、そちらに譲る。

(2) 港内船位確認装置

クリントン米大統領は1996年3月29日、科学技術局(Office of Science and Technology)のGPS政策を発表した⁷⁾。それによると、アメリカは今後、いっそうの国家機密および外交上の保護を計った

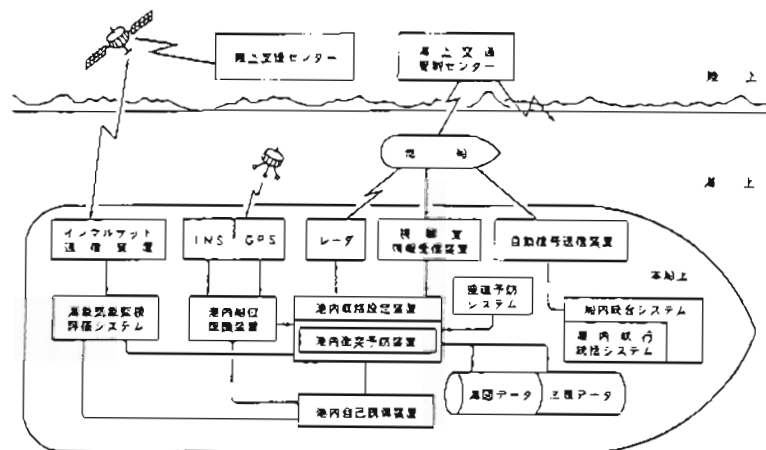


Fig.3 Overview of automatic harbour navigation system⁵⁾

上で、商用および科学目的のGPS使用を推進する。そのため、民間レベルの投資を進め、運輸その他の分野での安全と効率向上を推進する。またその中で、現在、GPSの信号の中に（軍事目的以外の用途では）意識的に混入させているSA(Selective Availability)を10年以内に撤廃する。この政策により、アメリカではGPSを使ったシステムが急増すると思われる。事実、すでにアメリカでは1996年3月にはUSCG（沿岸警備隊）によりDGPS網が北米沿岸域、ミシシッピ川流域および五大湖をカバーしている。また、ヨーロッパでは民間のサービス会社が中心にほとんどの地域をカバーしている。日本でも、すでにいくつかのシステムが稼働しているが、近い将来、官公庁および民間のサービス会社により日本の多くの海岸線がDGPS網でカバーできるようになると思われる。したがって、一般の沿岸域での航行にはDGPSがECDIS（電子チャート）とともに使われるようになると思われる。しかし、港内操船の目的には現状のDGPSではまだ十分ではなく、リアルタイム・キネマティック(RTK)GPSを使用する必要があるのではないだろうか。

Fig. 4にDGPSとRTK-GPSの精度検証結果の一例を示す。DGPSでは1~2m、RTK-GPSの場合cm単位まで正確に求めることができる。また実際にRTK-GPSを船舶に応用して、TSL着積システム⁹⁾や船舶入出渠誘導システム¹⁰⁾の開発が行われている。Fig. 5はTSLの着積状況をRTK-GPSで計測した例であり、非常に滑らかに航跡が描かれているのがわかる。

なお、GPSの現状と展望に関して、日本航海学会がシンポジウムGPS/DPGS利用技術の展望¹¹⁾を開催しており、国内では唯一のGPSに関するまとまった文献として利用できるであろう。詳しくはそちらを参照いただきたい。

また、高度自動運航システムプロジェクトで行われたように、岸壁に光学的船位計測システムを設置し、船位および対岸壁接岸速度を求める方法もある。この場合は2~3cmの精度が得られる。

船速については、対地速力であればGPS/DGPS/RTK-GPSから求めればよいが、対水速力の場合は前後、横方向の船速が検出できる電磁ログが使用できる。精度は約0.15ノットである。

方位についてはGPSから求めることもできるが、通常のジャイロコンパスで十分だと考えられる。精度は約0.1度である。

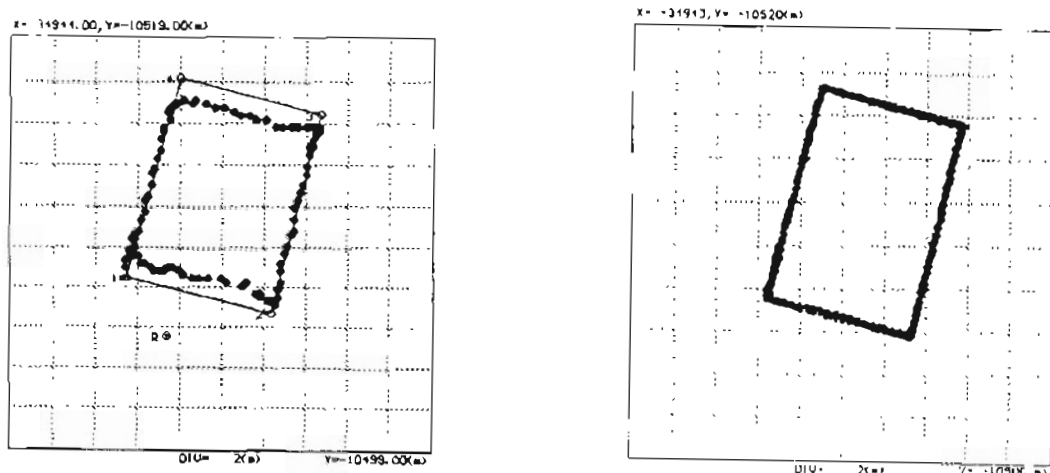


Fig.4 Comparison between DGPS (left) and RTK-GPS (right) by calibrated measurements⁸⁾

(3) 港内航路設定装置 (含狭域衝突予防装置)

これについてはFig. 2で示した衝突座礁防止システムが応用できる。なお、第8回の運動性能研究委員会シンポジウム⁵⁾以降の自動避航/航路決定エキスパートシステムの研究としては、福戸ら¹²⁾および長谷川ら¹³⁾のものなどがあるが、ここではこれ以上は触れない。

(4) 港内自己誘導装置

港内航路設定装置 (含狭域衝突予防装置) により設定された航路を忠実に航行する装置である。いわゆるtrack-keepingであるが港内では船速が遅く、舵による制御だけでは難しいことが多い。したがって、この問題はtrack-keepingとしての誘導制御の問題と、アクチュエータの問題にわけることができる。

前者の研究は特に海外において多くあり、ここではすべてを紹介できないので、もれがあることを承知でZhangら²⁵⁾にしたがって、いくつか紹介する。カルマンフィルターを用いた方法¹⁴⁾、最適および準最適フィードフォワード (optimal and suboptimal feedforward) 制御を用いた方法¹⁵⁾、多変数積分 (multivariable integral) 制御を用いた方法¹⁶⁾、セルフチューニング (self-tuning) 制御を用いた方法^{17), 18)}、統計的 (stochastic) 制御を用いた方法¹⁹⁾、LQG (Linear Quadratic Gaussian) 制御を用いた方法²⁰⁾、多変数最適 (multivariable optimal) 制御を用いた方法²¹⁾、 H_{∞} 制御を用いた方法²²⁾ などありとあらゆる制御方法が適用されている。もちろん、PID制御を用いた方法も実際には多く使われている。また、小川原らの提案した逆システムを利用した学習型フィードフォワード制御方式^{23), 24)}も他変数制御系として誘導問題には適しているし、人間の操作にならってFuzzy制御を用いる方法²⁵⁾もある。ちなみにZhangら^{26), 27)}はニューラルネットワークを用いた方法を提案している。

一方、アクチュエータについては次のような組み合わせが考えられる。

1) FPP (1軸) + 普通舵

港内操船ではタグボードまたはサイドスラストが必要である。多変数入力多変数出力システムであるため、操作が難しく、かつ、船や積載状況に応じてシステムの挙動が変わるため、熟練が必要である。しかし、特に、タグボードを使った着棧の場合は伝達の遅れや人間による誤認や錯誤があり²⁸⁾、自動化が望まれるゆえんでもある。その第一歩として複雑なアクチュ

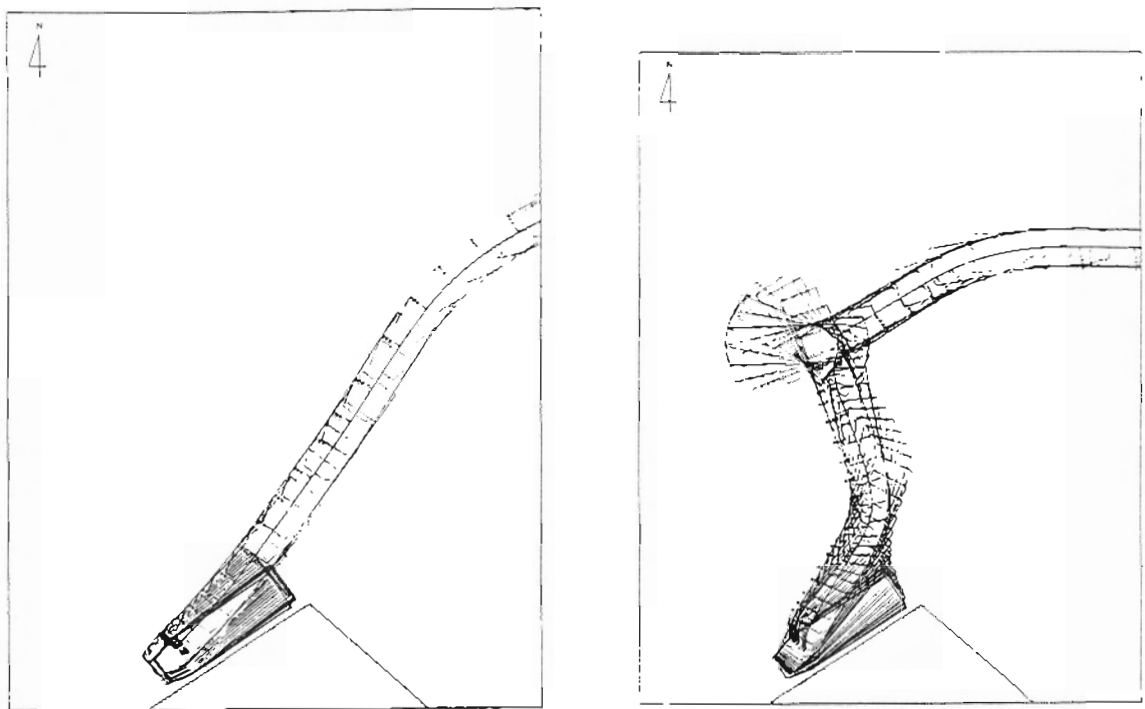


Fig.5 Measured trajectories by RTK-GPS for TSL berthing (left)/deberthing (right) ¹⁰⁾

エータの操作を一元化してジョイスティックで操作するいわゆるジョイスティック・コントローラが各社により開発され、実用化されている。ここでは不公平を承知でたまたま最近の学会誌に紹介されていた2例^{29),30)}を引用するに止める。前者にはこの種のシステムで不可欠な推力配分のアルゴリズムが紹介されているし、後者は内航タンカー近代化船へ適用された例であるが、他の造船・舶用機関メーカーのものについては個々にお問い合わせいただきたい。なお、推力配分のアルゴリズムについては8.3.1で詳しく述べる。

タグボートまたはサイドスラストを用いた自動着棧システムについては、8.3.2で詳しく述べる方法以外にもすでに種々の方法が提案され、シミュレーションが行われている^{31),32),33),34),35),38),37)}。また、高度自動運航システムプロジェクトに関連して公開模型実験³⁸⁾や東京商船大学の練習船「汐路丸」を使った実船実験³⁹⁾も行われている。

なお、港内操船に必要な船の低速時、浅水時、風・潮流影響などを含めた操縦性能に関する実験的・理論的研究、それらを用いたシミュレーション計算に関するものは、通常MMGモデルと称される数学モデルをもとにして非常に多くあり、その全貌を紹介することはこの章の目的ではないので触れない。ただし、第12回の運動性能研究委員会シンポジウム操縦性研究の設計への応用⁴⁰⁾の各章が非常によくまとめてあるのでぜひそちらを参照いただきたい。ただし、その中であまり触れられていない要素部分についてはここで紹介する。

マリナー舵

ここでいう普通舵とはほとんどがマリナー舵であり、ホーン部が可動部の約15%の直圧力を発生することが知られている^{41),42)}が、その性能推定については、可動部の面積と等しい矩形舵とみなし、藤井の式⁴³⁾を適用することで、可動部とホーン部に働く舵直圧力が簡便に推定できることが実験的および理論的に指摘されている^{41),42)}

タグボート

また、シミュレーション計算などでは、タグボートの推力として通常、単独のボラードブル時のものを使用することが多いが、港内操船では本船との干渉、速度影響などを考慮する必要がある。この点に関しては小瀬ら⁴⁴⁾の広範な実験的研究がある。タグボートを使用した港内操船のシミュレーションや実験については高品^{45),46)}や小林(弘)ら⁴⁷⁾、そして、タグボートの支援効果については小林(弘)ら^{48),49),50)}の研究を参照されたい。

サイドスラスト

サイドスラストに関しても前進速度影響などがあることが知られており、岡本ら⁵¹⁾や貴島ら^{52),53),54)}の実験的または理論的研究が知られている。シミュレーション計算ではそれらを考慮した小林(英)のモデル^{55),56)}がある。

2) CPP (1軸または2軸) + 特殊舵 (シリング舵、フラップ舵)

この場合、前進方向の推力をある程度横方向に振り分けることができる。たとえば、斜め後ろ方向への移動の場合、横移動と後進を繰り返すことにより実現できる。PCCや内航タンカーなどに多数実装されている。

なお、CPPの翼角の変節速度は約2度/秒である。

特殊舵 (シリング舵およびフラップ舵)

シリング舵およびフラップ舵、そしてそれぞれの舵を装備した船の操縦性能に関しては文献^{57),63),58),59)}などを参照されたい。また、こうした船の離着棧にはジョイスティック操船システムが有効であることが知られているが、そのアルゴリズムや有効性については、遠藤ら^{60),61)}の研究がある。

3) FPP (1軸) + 特殊舵 (ベクツインラダーシステム)

ベクツインラダーシステムとは一言で言えば、中央で2つに等分したシリング舵を1つのプロペラの後ろに左右対称に配置したものである⁵⁸⁾。通常の舵と違って、各々外側に105度、内側に25度とることができ、プロペラ正転のまま、Fig. 6に示すような前進から後進までのいくつかの基本パターンの操船がジョイスティックにより操作可能である。

ベクツインラダーシステム

ベクツインラダーシステムを装備した船(ベクツインラダー船)の操縦性能に関しては文献^{62),63),64),65)}を参照されたい。文献⁶⁴⁾ではMMGモデルをもとにしたベクツインラダー船の操縦数学モデルが提案され、シミュレーションにより確認されている。また、文献⁶⁵⁾にはこれまでの実績船の乗組員からの聞き取り調査一覧もある。それによると、低速での舵効きがよく、タグボートなしで自力で離着棧できる、と現場では好評のようで、離着棧の頻度の高い内航船やフェリーを中心に採用されるケースが増えている。

さらに、バウスラストを組み合わせることにより、任意の姿勢のまま任意の方向への移動が可能である。こうした制御システムをさらに上位のジョイスティック・コントロールシステムとして用意すれば、操船者はこうした要素操船を組み合わせるだけでより簡単に離着棧操船を行わうことができる。

なお、ベクツインラダーの操舵速度は約5.5度/秒である。

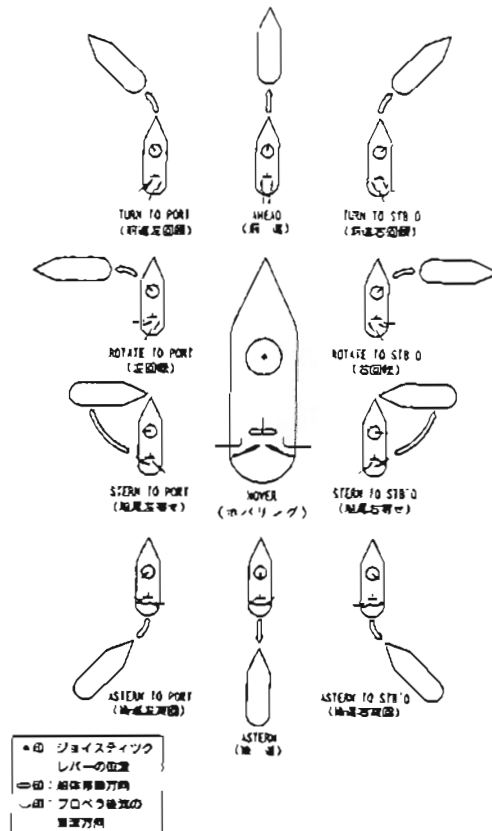


Fig.6 Basic available patterns of VecTwin Rudder System⁵⁸⁾

4) アジマス(azimuth)スラスト (Z型(Z-drive)推進器)

360度方向に首を振ることができるスラストであり、スタンスラストが不要となる。一番多いのはタグボート等の作業船に使われるケースであるが、最近では、観測船などに採用の傾向がある。また、昇降式にしてバウスラストとして採用するケースもある。首振り速度は約18度/秒である。

Inselら⁶⁶⁾はボスポラス海峡を航行する船長約60mのダブル船橋(double-ended)フェリーのフィジビリティスタディを(1)従来型のプロペラに普通舵、(2)従来型のプロペラに高揚力舵、(3)アジマススラスト、(4)ホイットシュナイダー(Voith Schneider)プロペラの4種類の推進/操舵装置、4種類のタスク(着棧、離棧、定点保持、航路保持)、7種類の環境条件(風、波、潮流)について行った。

Fig. 7がその結果である。少し見にくいので説明する。まず、4種類の推進/操舵装置毎に前後左右方向にどのような推力がでるかを示してある。(1)では当然ながら前進方向の推力が0では横方向の推力は0である逆8字型であるのに対し、(2)、(3)ではまゆ型にそして(4)ではほぼ小判型の特徴が現れている。そして、その中にさらに7つの扁平な楕円があるがこれはそれぞれ違った外乱下でそれぞれのタスクを行うのに必要な所要推力を計算して示している、その楕円がさきほどの能力範囲であれば、そのタスクを遂行することができるが、その範囲外であれば外乱により流されることになる。離着棧ではほぼ前進速度が0の時以外は4種類ともほぼ所要推力を達成しているのに対し、定点保持や航路保持では従来型の装置になるほど困難であることがわかる

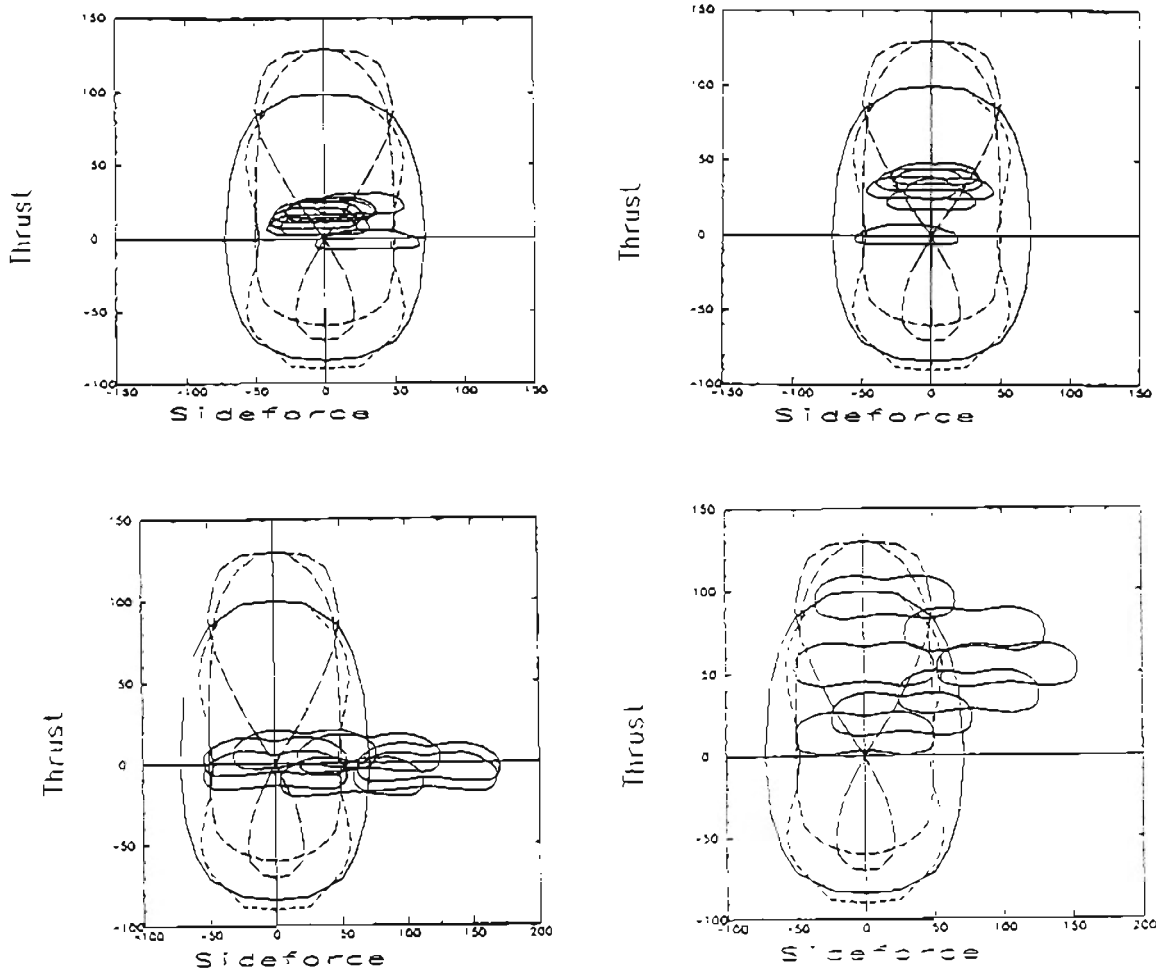


Fig.7 Thrust requirement and availability for harbour manoeuvring with various propulsion/manoeuvring apparatus⁶⁶⁾

- berthing : *upper-left*, deberthing : *upper-right*,
- position-keeping : *lower-left*, track-keeping : *lower-right*
- Voith Schneider : *solid line*, azimuth thruster : *dotted line*,
- high lift rudder : *short broken line*, conventional : *broken line*

(5) 自動信号送信装置

これは港内統合システムからの指令を受けて他船または陸上に対して諸信号を自動的に送る装置⁵⁾である。インターネット時代になって、これらの技術的問題はほとんどない。問題はソフトと価格であるが、アメリカではすでにINMARSATに代わる船舶とのデジタル通信サービスがいくつか始まったようである。

1) MiTS、ISIT、ATOMOS

それを加勢しているのが、急速に進展しつつある船舶の運航管理システムの陸上支援体制である。それに伴って、こうした情報の通信プロトコルの標準化が重要となってきた。すでに、MiTS(Maritime information Technology Standard)⁶⁷⁾やISIT(Integrated Shipboard Information Technology) Platform⁶⁸⁾といった標準フォーマットが提唱され、すでにいくつかの実船に適用さ

れているようである。MiTSの提唱母体はノルウェーのSINTEFFで、一方のISITはもともとアメリカの7つの組織(MMS, Ultimate East Technologies, ABS Marine Services, Sperry Marine, GE Marine, Radix Systems, M. Rosenblatt & Son)が1995年に提唱したものであるが、その後、SINTEFも開発メンバーに加わっており、インターフェースにはMiTSを使っているようである。さらに、欧州連合(EU)は同様の目的でATOMOS(Advanced Technology to Optimise Maritime Operational Safety)⁶⁹⁾、ATOMOS IIといったプロジェクトを進めており、この種の船舶管理のためのマネジメントシステムはますます重要になってくるであろう。日本では、技術的問題の解決ばかりに目が向いているようであるが、こうした地盤固めが先決ではないであろうか。

8.2.2 港内操船の自動化に必要な制御技術

港内操船自動化に必要なとされる制御方法の分類は、これまでの適用研究に基づく分類⁷⁰⁾を整理、拡張、吟味して、Fig. 8のようにまとめることができる(以下、指標チャートと呼ぶ)。

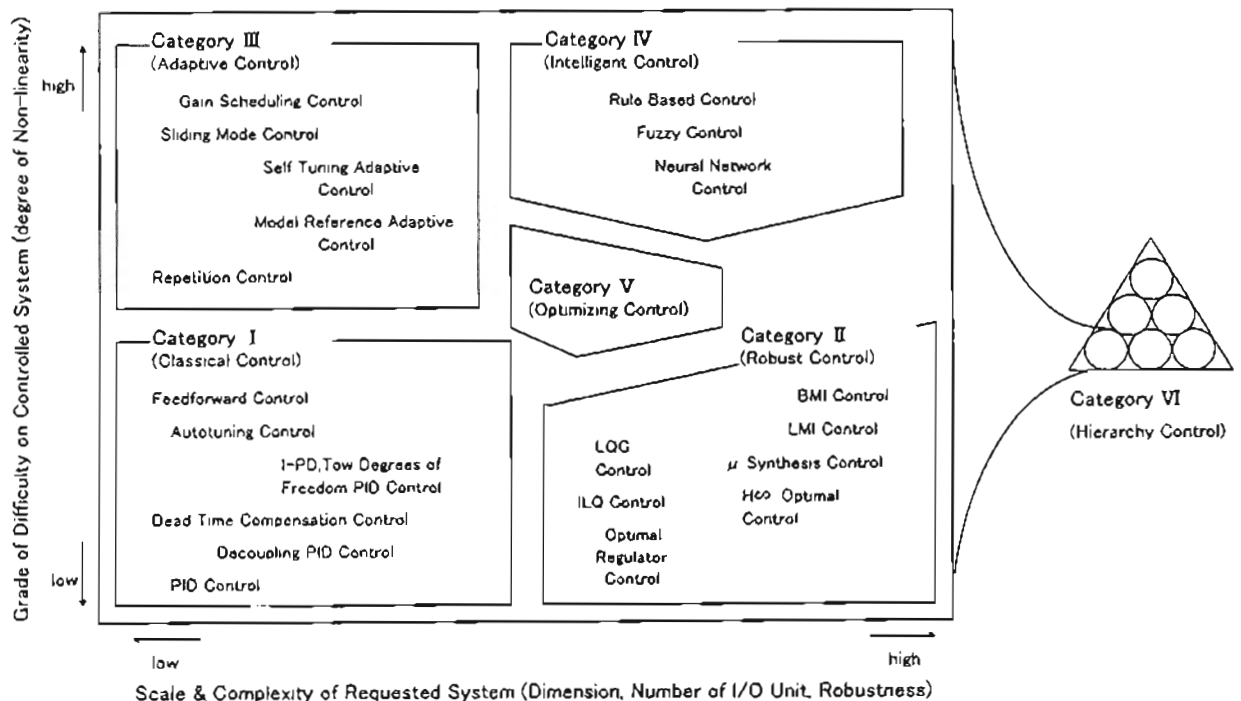


Fig.8 Control system design index chart

指標チャート中、縦軸は制御対象のモデルの難易度、すなわち非線形性の度合いを示したものであり、横軸は要求される制御システムのスケールと複雑性、すなわち制御系次数と多入力多出力多目的性の度合いを示したものである。数々の制御方法を過去の経験をベースに整理すれば、図に示すような分類が可能である。また、個々に制御の特徴を Table 1にまとめる。以下概要を解説する。

(1) 古典制御カテゴリー

本カテゴリーは、PID制御に代表される古典制御のカテゴリーである。指標チャート中、縦軸のモデル難易度は低く、すなわち、モデル化が容易であり、横軸の制御システムの複雑性も小さい系である。1入力1出力系の制御系設計が本カテゴリーでは大半であり、最大でも2入力2出力連成系までである。本カテゴリーでは、PID制御及びその応用形を主体とした古典制御理論により、系の制

御系設計は十分に可能である。

(2) ロバスト制御カテゴリー

多入力多出力連成系を制御対象としかつ制御目的、制御条件の高度性・多様性を要求される系においては、古典制御カテゴリーでの制御系設計法では限界が生じる。本カテゴリーでは、モデル難易度は古典制御カテゴリー同様低く、制御システムの複雑性が大きな系を扱う。ロバスト制御カテゴリーでは、制御系設計用モデルが推定もしくは導入できるためモデル難易度は低いが、多入力多出力連成問題、複数目標値高追従性、安全性、外乱へのロバスト性等の様々な要求仕様が課せられるため制御システムの複雑性は大となる。本カテゴリーでは最適レギュレータ、 H_∞ 制御に代表されるロバスト制御理論に基づく制御系設計の実施により上記要求仕様を満足する制御系の実現が可能となる。また、カルマンフィルタによるモデル推定法がロバスト制御系設計において、しばしば併用される。

(3) 適応制御カテゴリー

本カテゴリーは、モデル難易度が高く、制御システムの複雑性が小さな系を対象とする。モデル難易度が高いためモデリングが難しい反面、制御システムはさほど複雑でないため、適応制御により解決を図る。モデル難易度が著しく大きな場合、ゲインスケジューリング制御やスライディングモード制御にて制御系設計が行われ、簡易モデル等考慮ができる場合はセルフチューニング適応制御やモデル規模型適応制御が有効である。また、古典制御系やロバスト制御系との組み合わせにより航走条件に応じた対応を図るケースも実用面ではみられる。

(4) インテリジェント制御カテゴリー

モデル難易度が高くかつ制御システムの複雑性が大きな系がこのカテゴリーに属する。すなわちモデル推定が難しく、制御システムへの要求仕様が複雑な場合であり、本カテゴリーではファジィ制御、ニューラルネット制御、ルールベース制御を中心としたインテリジェント制御の適用がキー技術となる。また、本カテゴリーの制御系はロバスト制御系等、他のカテゴリー制御系にてフィードバック系を構成したものに対し、制御機能を高めるために使われるケースも多い。

(5) 最適化制御カテゴリー

(1)~(4)のカテゴリーで述べたモデル難易度と制御システムの複雑性を指標としたカテゴリーにて制御対象単体の制御系設計はほぼ実現できるが、本カテゴリーは他のカテゴリーと種類を異にするが、制御系の重要な構成要素としてしばしば使われる最適化制御と称せられる配分制御を扱う。制御問題を定位置制御問題と追従制御問題とに分けた場合、特に前者においてはホバリング性を得るための推力配分制御が前述のカテゴリーの制御則と併用して使われる。このような配分処理や計画設計問題を解くためには最適化制御が重要である。線形計画法や非線形計画法を制御則として組み込むことが、このカテゴリーに有効である。

(6) 離散事象制御カテゴリー

本カテゴリーは制御対象単体の制御ではなく、単体同士を有機的に結びつけるネットワークの制御を扱い、離散事象問題の制御と関連が大きい。本カテゴリーは、ハイアラキー制御構造を一般に有し、ネットワーク理論としては、自律分散制御、エージェントネット、ペトリネットなどで単体相

互の関係を記述し、制御を行う。

8.3 実船への適用例

8.3.1 多機能操船システム

(1) 理論

船舶の操船システムにおいては、ひとつの制御系により船速保持、方位保持、定点保持、航路保持、離着桟などの様々な操船運航モードに対して対応できることと、様々な操船、アクチュエータ（プロペラ、舵スラストなど）に対して広く適用できることが強く望まれている

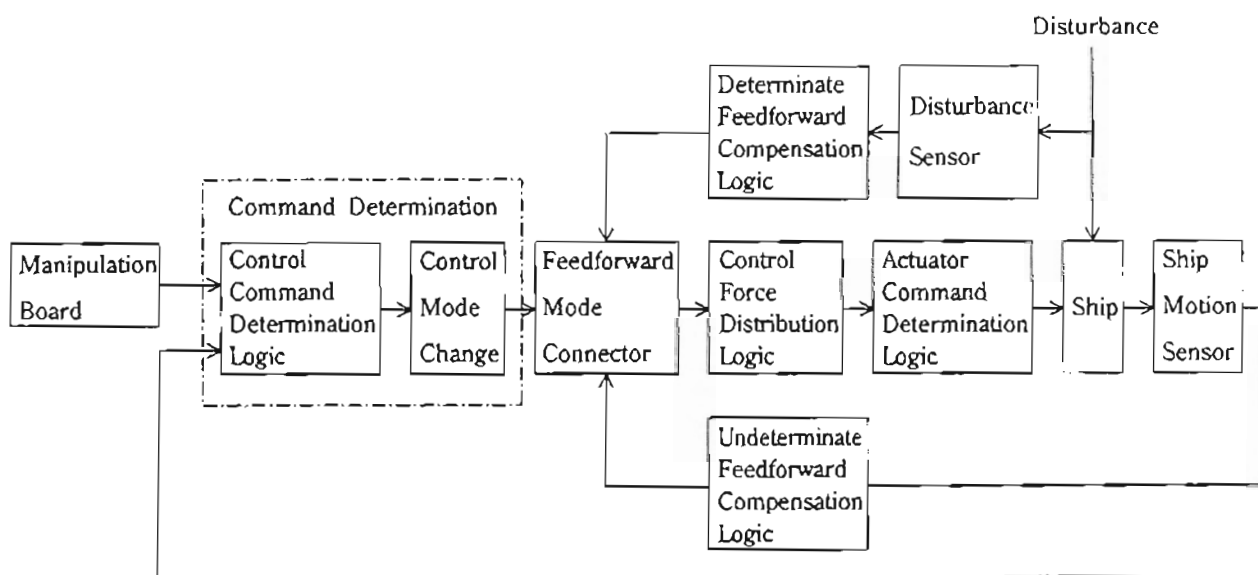


Fig.9 Basic control logic⁷¹⁾

制御系の基本部は、Fig. 9 に示す構成となる⁷¹⁾。制御部は推力配分部を中心に構成され、推力配分部入力前に、設定値自動追従のためのコマンド決定部、既知および未知外乱補償のための外乱フィードフォワード補償部、ジョイスティック手動操作指令入力のためのジョイスティック制御処理部、推力配分部出力後にアクチュエータ指令信号設定処理部を設ける。制御対象部は船体とアクチュエータから構成され、船体としては船舶、アクチュエータとしては任意個数のプロペラ、舵、スラストを考える。センサ部は船体運動検出センサと風などの既知外乱検出センサより構成される。また、センサにて検出できない外乱を一括して未知外乱として取り扱い、制御部の外乱フィードフォワード補償部の中でカルマンフィルタにより未知外乱力、モーメントを推定する。

本方法の特徴は次のとおりである。

- 1) 推力配分法ベースのロジックによりアクチュエータ個数変化に容易に対応できる。
- 2) 非線形計画法の応用により非線形評価関数の組み込みなど、非線形問題に対処できる。
- 3) 多目的な運動形態をコマンド決定部内のモード切り替えにより実現できる。

4) ジョイスティック手動操作機能、外乱フィードフォワード補償機能などのオプション機能を容易に制御系に組み込める。

5) 船体に作用する未知外乱を推定補償できる。

次に上記特徴の実現への中核となる推力配分部、コマンド決定部、外乱フィードフォワード補償部について説明する。

推力配分部は非線形計画法応用制御により構築する。推力配分は、各方向の要求推力と要求モーメントを各アクチュエータに最適分配するものである⁷²⁾。

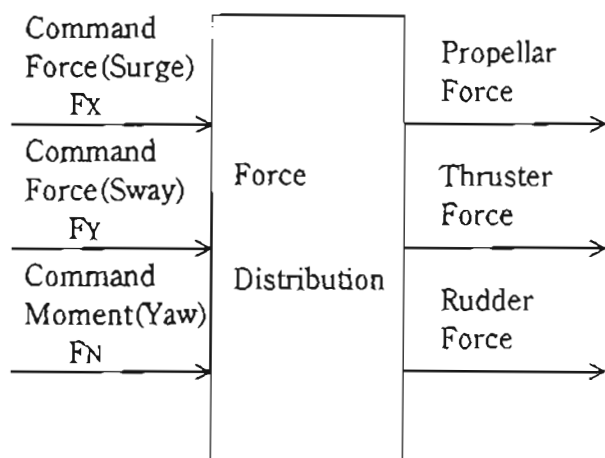


Fig.10 Outline of distributing forces

Fig. 10に示すように、要求推力およびモーメントを、装備されたアクチュエータで発生させるため推力配分を行う。たとえば、Fig. 11のような2軸2舵、バウスラスター、スタンスラスター装備の船舶では、Table 2に示す各アクチュエータの推力、その最大値、取付位置座標値を基に、アクチュエータにより発生しうる各方向の推力およびモーメントは次のようになる。

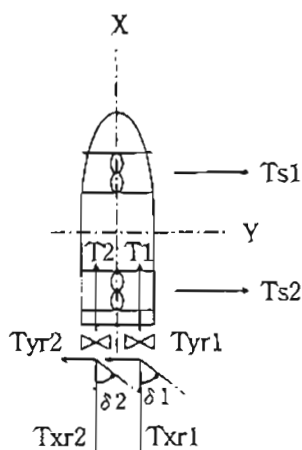


Fig.11 A sample ship

サージ方向力

$$T_x = T_1 + T_2 + T_{xr1} + T_{xr2} \quad (1)$$

スウェイ方向力

$$T_y = T_{s1} + T_{s2} + T_{yr1} + T_{yr2} \quad (2)$$

ヨー方向モーメント

$$T_n = -T_1 Y_{p1} - T_2 Y_{p2} + (X_{s1} - X_c) T_{s1} + (X_{s2} - X_c) T_{s2} \\ + (X_{r1} - X_c) T_{yr1} + (X_{r2} - X_c) T_{yr2} - T_{xr1} Y_{r1} - T_{xr2} Y_{r2} \quad (3)$$

ここで、 X_c は旋回中心である。また、舵力はプロペラ推力と次の関係があるものとする。

$$T_{xr1} = K_{xr1} \frac{\delta_1}{\delta_{max}} \max(T_1, 0) \quad (4)$$

$$T_{yr1} = K_{yr1} \frac{\delta_1}{\delta_{max}} \max(T_i, 0), \quad i = 1, 2 \quad (5)$$

ここで、 T_i はプロペラ推力、 δ_i は舵角、 K_{xr1} 、 K_{yr1} は定数で要求推力、モーメントと、アクチュエータが発生しうる推力、モーメントとが等しくなるように、各推力および舵力を非線形計画法を用いて求める。方法は、混合ペナルティ法と準ニュートン法をベースとする。

等式条件は、

$$F_x = T_x \quad (6)$$

$$F_y = T_y \quad (7)$$

$$F_n = T_n \quad (8)$$

であり、不等式条件は、

$$|T_1| \leq T_{max} \quad (9)$$

$$|T_2| \leq T_{max} \quad (10)$$

$$|T_{s1}| \leq T_{smax1} \quad (11)$$

$$|T_{s2}| \leq T_{smax2} \quad (12)$$

$$|\delta_1| \leq \delta_{1max} \quad (13)$$

$$|\delta_2| \leq \delta_{2max} \quad (14)$$

である。添字 $_{max}$ は最大値を示す。

評価関数は様々な関数が可能であるが、たとえば、アクチュエータ力2乗総和が最小となるように設定すれば、次式となる。

評価関数

$$J = \sum_{i=1}^2 (T_i)^2 + \sum_{i=1}^2 (T_{si})^2 + \sum_{i=1}^2 (T_{xri})^2 + \sum_{i=1}^2 (T_{yri})^2 \quad (15)$$

上記の等式、不等式を満足し、かつ、評価関数を最小にするアクチュエータ力を非線形計画法より求める。本推力配分法を用いることにより、アクチュエータ個数変化への対応と非線形問題への対応が図れる。

推力配分部の入力前にコマンド決定部を置くことによって、船舶の様々な運動形態への制御対応が可能となる。コマンド決定部への入力には操作盤からの目標値指令とセンサ部からの船舶運動検出

値等であり、コマンド決定部内で各運動形態実現のための制御力指令値を演算し、推力配分部への信号とする。

船速保持を実現するためには、船速信号を用い、例えば次の制御則にて制御力指令値を演算する。

$$T_x = K_{px}(u^* - u) + K_{ix} \int (u^* - u) dt + K_{dx} \dot{u} \quad (16)$$

図で示すと Fig. 12の構成となる。

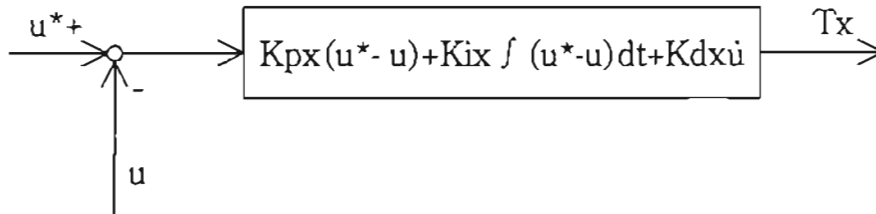


Fig.12 Logic of speed control

ここで、 u 船速、 \dot{u} は加速度、 u^* は船速目標値、 K_{px} 、 K_{ix} 、 K_{dx} は比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲイン、 T_x は前進方向推力である。

方位保持を実現するためには、船首方位角および回頭角速度センサ信号を用い、例えば次の制御則にて船首方位角を目標値に移動保持するよう制御力指令値を演算する。

$$T_n = K_{pn}(\psi^* - \psi) + K_{in} \int (\psi^* - \psi) dt + K_{dn} \dot{\psi} \quad (17)$$

図で示すと Fig. 13の構成となる。

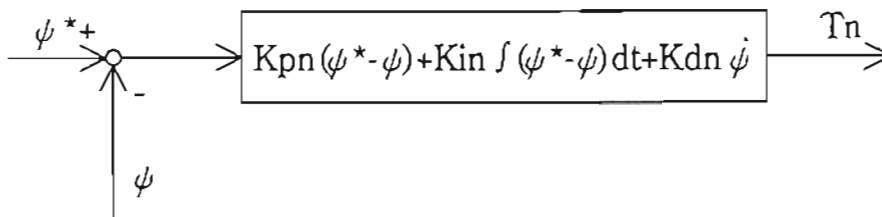


Fig.13 Logic of autopilot

ここで、 ψ は船首方位角、 $\dot{\psi}$ は回頭角速度、 ψ^* は船首方位目標値、 K_{pn} 、 K_{in} 、 K_{dn} は比例ゲイン、積分ゲイン、微分ゲイン、 T_n は回頭モーメントである。

定点保持を実現するためには、位置および船首を制御するよう、例えば、Fig. 14の構造の最適レギュレータを用いて、制御力を演算する。最適レギュレータは、サージ、スウェイ、ヨー方向の最適レギュレータ式を構成し、ゲインは定常 Riccati 方程式を満足する正定解より最適フィードバック行列を求め、これにより制御力を演算する。

航路保持を実現するためには、設定された変針点情報および変針点間の目標船速を基に、航路保持を行うべく、上記定点保持と同様の原理で、最適レギュレータを用いて位置および船首の制御を行う。

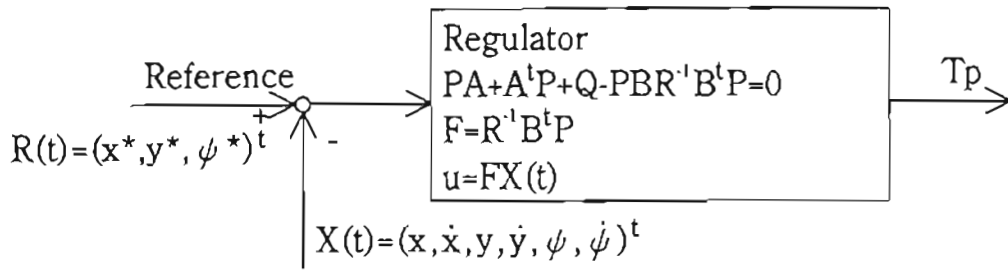


Fig.14 Logic of position control

離着陸を実現するためには、例えばジョイスティックレバーおよび旋回ノブ操作によるサージ、スウェイ方向に発生すべき力および回頭モーメントを演算する。

各運動形態はコマンド決定則内のモード切り替えにより、必要な制御力選択され、推力配分部に入力される。

外乱フィードフォワード補償部は推力配分部の入力の前に設置する。本方法では、外乱力をあらかじめ推定し、外乱制御のための制御力を推力配分部に与える。

外乱フィードフォワード補償部は Fig. 15 に示すとおり、既知外乱補償部と未知外乱補償部から構成される。

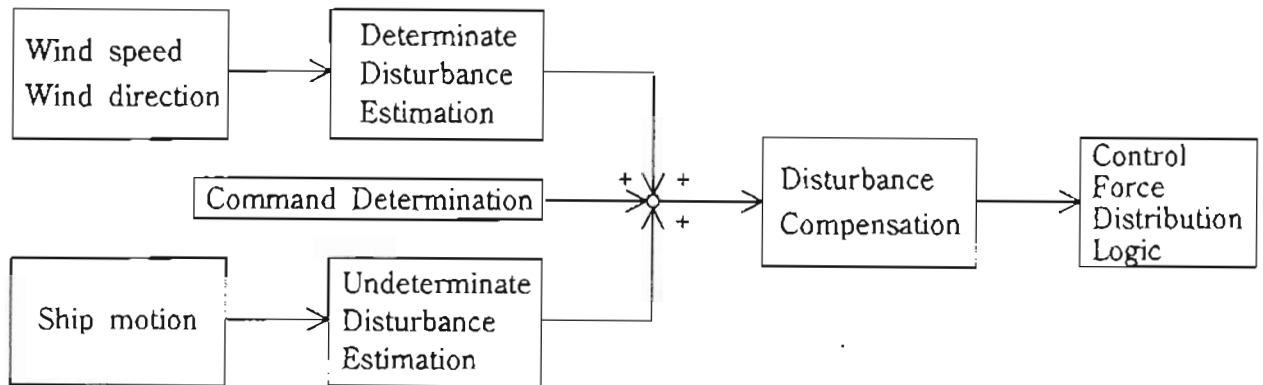


Fig.15 Outline of feedforward compensation system

既知外乱補償部は、風などのセンサ信号より取得できるものから、船体に加わるサージ、スウェイ、ヨー方向の外乱力を推定し、補償力を演算する。たとえば、次式にて推定演算する。

サージ方向力

$$X_A = \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_{AT} C_{XA}(\theta_A) \quad (18)$$

スウェイ方向力

$$Y_A = \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_{AL} C_{YA}(\theta_A) \quad (19)$$

ヨー方向モーメント

$$N_A = \frac{1}{2} \rho_A V_A^2 A_{AL} C_{NA}(\theta_A) \quad (20)$$

ここで、 ρ_A は空気密度、 A_{AT} は正面投影面積、 A_{AL} は側面投影面積、 V_A は相対風速、 θ_A は相対風向、 $C_{XA}(\theta_A), C_{YA}(\theta_A), C_{NA}(\theta_A)$ は風圧力係数である。

また、相対風速および相対風向は時々刻々のとセンサ信号として取り込む。

未知外乱補償部は、船体に働く潮流力などの検出できない外乱の影響を除去すると共に、制御設計時に用いた船体数学モデルと実機特性の相違による制御性能の劣化を除く機能を持つ。本方法ではカルマンフィルタによる未知外乱状態推定器を構成し、状態推定値を用いて未知外乱を補償する。状態推定器の構造は、Fig. 16に示すとおりであり、サージ、スウェイ、ヨー方向のカルマンフィルタ式およびマトリクス構成は次のようになる。

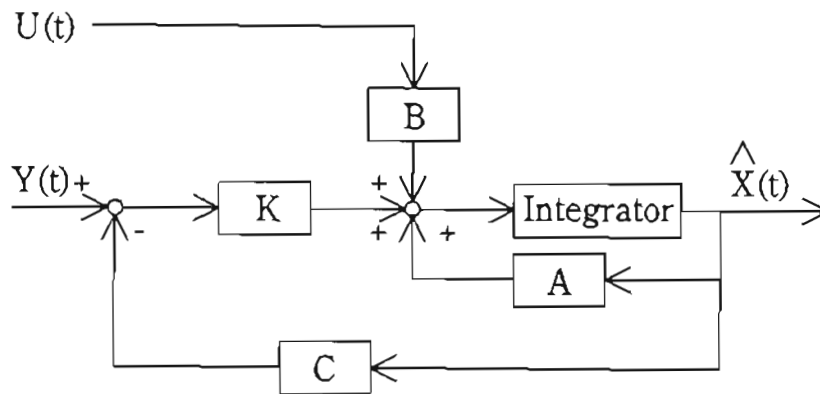


Fig.16 Disturbance estimator

$$\dot{\hat{X}}(t) = A\hat{X}(t) + Bu(t) + K(t)(Y(t) - C\hat{X}(t)) \quad (21)$$

$$K(t) = P(t)C^T R^{-1} \quad (22)$$

$$\dot{P}(t) = AP(t) - P(t)A^T + Q - P(t)C^T R^{-1}CP(t) \quad (23)$$

サージ方向は、

$$\hat{X}(t) = \begin{pmatrix} \hat{x} \\ \hat{\dot{x}} \\ \hat{F}_X \end{pmatrix} \quad (24)$$

$$Y(t) = (x) \quad (25)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{\frac{1}{2}\rho U(S_A C_f V_A^3 C_{ra})}{(M+m_x)} & \frac{1}{(M+m_x)} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (26)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{(M+m_x)} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (27)$$

$$C = (1 \ 0 \ 0) \quad (28)$$

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_1 & 0 \\ 0 & 0 & q_2 \end{pmatrix} \quad (29)$$

$$R = (r_1) \quad (30)$$

である。

ここで、 x, \dot{x} は位置および速度のサージ方向成分、 $\hat{x}, \hat{\dot{x}}$ はそれらの推定値、 M は船体質量、 m_x はサージ方向付加質量、 ρ は水密度、 U は船速、 S_a は浸水面積、 C_f は摩擦抵抗、 V_a は排水容積、 C_{ra} は剰余抵抗計数、 $q_i (i=1,2), r_1$ は重みである。

スウェイ方向は、

$$\dot{X}(t) = \begin{pmatrix} \dot{y} \\ \dot{\dot{y}} \\ \hat{F}_Y \end{pmatrix} \quad (31)$$

$$Y(t) = (y) \quad (32)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{\frac{1}{2}\rho L d U Y'_v}{(M+m_y)} & \frac{1}{(M+m_y)} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (33)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{(M+m_y)} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (34)$$

$$C = (1 \ 0 \ 0) \quad (35)$$

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_3 & 0 \\ 0 & 0 & q_4 \end{pmatrix} \quad (36)$$

$$R = (r_2) \quad (37)$$

である。

ここで、 y, \dot{y} は位置および速度のスウェイ方向成分、 $\hat{y}, \hat{\dot{y}}$ はそれらの推定値、 m_y はスウェイ方向付加質量、 L は垂線間長、 d は喫水、 Y'_v は操縦微係数、 $q_i (i=3,4), r_2$ は重みである。

ヨー方向は、

$$\dot{X}(t) = \begin{pmatrix} \dot{\psi} \\ \dot{\dot{\psi}} \\ \hat{F}_r \end{pmatrix} \quad (38)$$

$$Y(t) = (\psi) \quad (39)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & \frac{\frac{1}{2}\rho L^2 d U N'_r}{(I_{zz}+J_{zz})} & \frac{1}{(I_{zz}+J_{zz})} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (40)$$

$$B = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{1}{(I_{zz}+J_{zz})} \\ 0 \end{pmatrix} \quad (41)$$

$$C = (1 \ 0 \ 0) \quad (42)$$

$$Q = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & q_5 & 0 \\ 0 & 0 & q_6 \end{pmatrix} \quad (43)$$

$$R = (r_3) \quad (44)$$

である。

ここで、 $\psi, \dot{\psi}$ は方位角および回頭角速度、 $\hat{\psi}, \hat{\dot{\psi}}$ はそれらの推定値、 J_{zz} は船体重心回りの付加慣性モーメント、 N'_r は操縦微係数、 $q_i (i=5,6), r_3$ は重みである。

本方法により、船体に及ぼす外乱力を推定でき、補償力を事前に推力配分部に取り組むことにより、船舶の運動性能を向上できる。また、外乱フィードフォワード補償信号を基本ループに割り込みの形で付加する形態なので、基本ループの演算時間を増大させない。

(2) 実機適用

今回開発した多機能制御系設計法を実際の操船制御装置設計に応用した⁷³⁾。ここでは、船舶の離着岸時に用いる新型ジョイスティック操船装置（以下、JCSと称する）への応用例について説明する。

実機の場合、基本的な制御系のほか、極低速時の船体運動特性、マンマシン系、フェイルセーフ系、電力系、手動系等の検討が必要となる。とくに、モード切り替え時の信号の連続性の確保や、一つのアクチュエータ故障時に残されたアクチュエータのみによるリカバリー運転等、実機ゆえに必要な機能がスムーズに遂行できることが要求される。JCSの制御系のブロック図をFig. 17に示す。

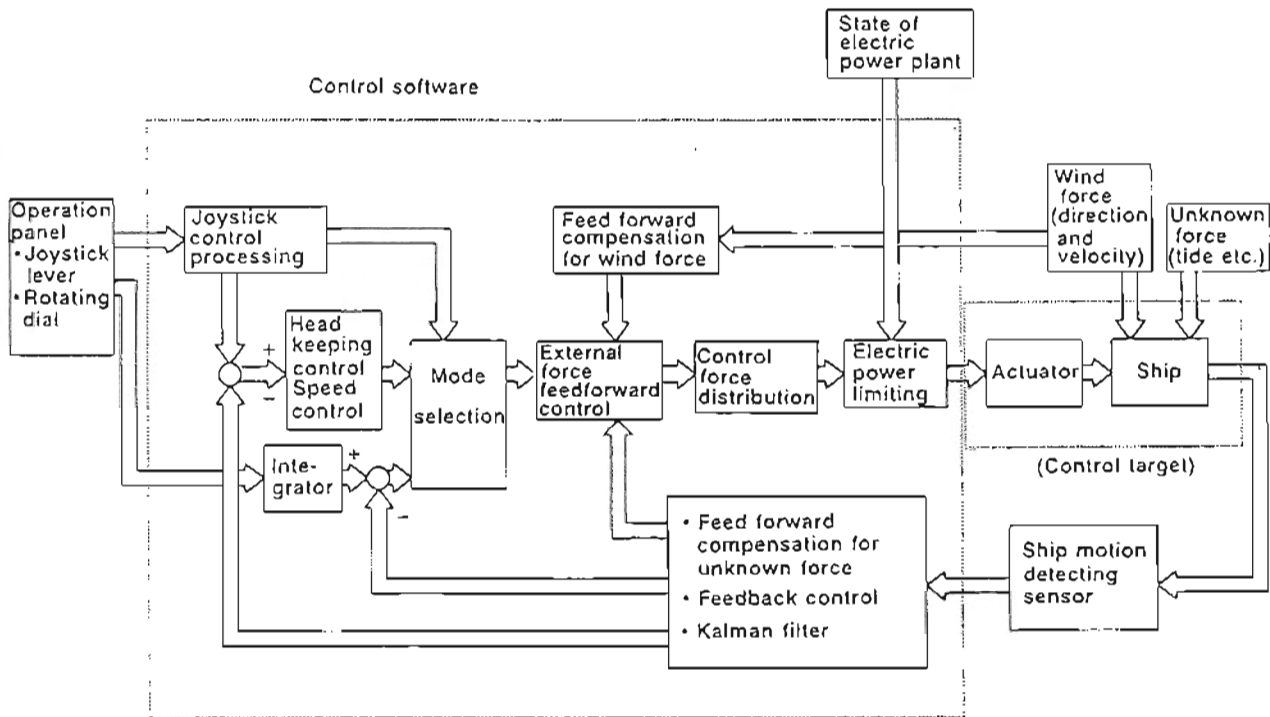


Fig.17 Block diagram of advanced joystick control system

本システムでは、最初にジョイスティック操作盤（オペレーションコントローラ）からの信号を基に、センサから得られた船体運動を考慮して、船体移動に必要な力およびモーメントを求める。

つぎに、風外乱が船体に及ぼす影響の推定演算を行い、風外乱を補償する力とモーメントをフィールドフォワード信号として加える。さらに、検出不能の潮流外乱に対しては、(1)で述べたように、船体運動を基にカルマンフィルタを用いて推定し、この外乱（未知外乱）を補償する力とモーメントをフィールドフォワード信号として加える。

このようにして得られた船体運動に必要な力とモーメントを発生させるために、各アクチュエータが分担する操作量を舵特性、プロペラ推進特性およびスラスト特性を基に、推力配分して求める。

このほか、ブラックアウト回避のための電力制限演算、方位制御、速度制御などの演算を行う。

制御装置の実機への装着に当たってはCPU演算能力を考慮して、入出力信号処理を行う汎用処理用CPUと、推力配分、外乱補償などの制御演算を行う高速演算処理用CPUの2CPU方式を採用した。このことにより推力配分制御演算などをオンラインで効果的に行うことができた。

離着棧時の極低速時の船体運動特性を支配する舵特性については、Fig. 18 に示すように水槽による実験値をベースに、その数学モデルを求めた。Fig. 19に本システムの水槽試験結果の一例を示す⁷¹⁾。

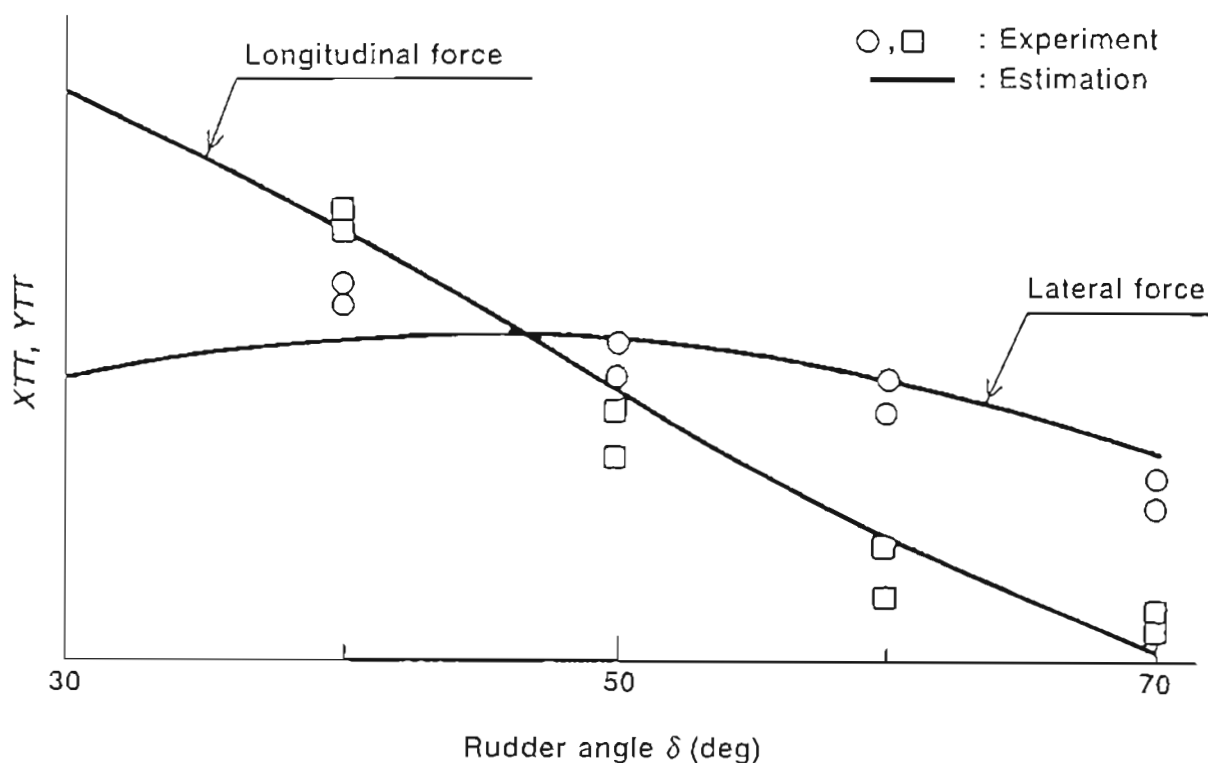


Fig.18 Manoeuvring forces by rudder and propeller

風外乱や潮流外乱の中での迅速かつ安全な離着棧作業は、従来操船者の大きな負担となっていたが、本システムでは、ジョイスティックレバーを倒した方向と量に応じて船体を移動させる機能を持っているため、比較的経験の少ない操船者でも容易に操船できる。

8.3.2 2点境界値問題の港内自動操船への応用

(1) 非線型最適制御問題の定式化

線型最適制御理論を船舶の操縦運動制御に応用する研究は、早くから行われてきた。しかし、線型最適制御理論の適用は、運動方程式が線型で評価関数が2次型式で与えられるシステムに限定される。したがって、操船のプロセス全体を最適化しようとする場合、全プロセスを細かいフェイズに分け、部分的な最適化を繰り返し、組み合わせる必要がある。操船のプロセスとは、現在の状態から目標となる他の状態へ、ある目的を持ってアクチュエータを操作する一連の制御動作であると考えられる。そして、制御の目的を定量化したものが評価関数である。すなわち、操船プロセス全体を最適化する問題は、初期値と終端値が与えられ、ある評価関数の値が最小または最大となる制御入力を求める問題に帰着する。制御入力の上限は限られているので、この問題は、不等式拘束条件を有する非線型の2点境界値問題としてとらえることができる。2点境界値問題の解は、一般に無数に存在するが、解のうち評価関数の値を最小または最大とするものを最適解とし、この時の制

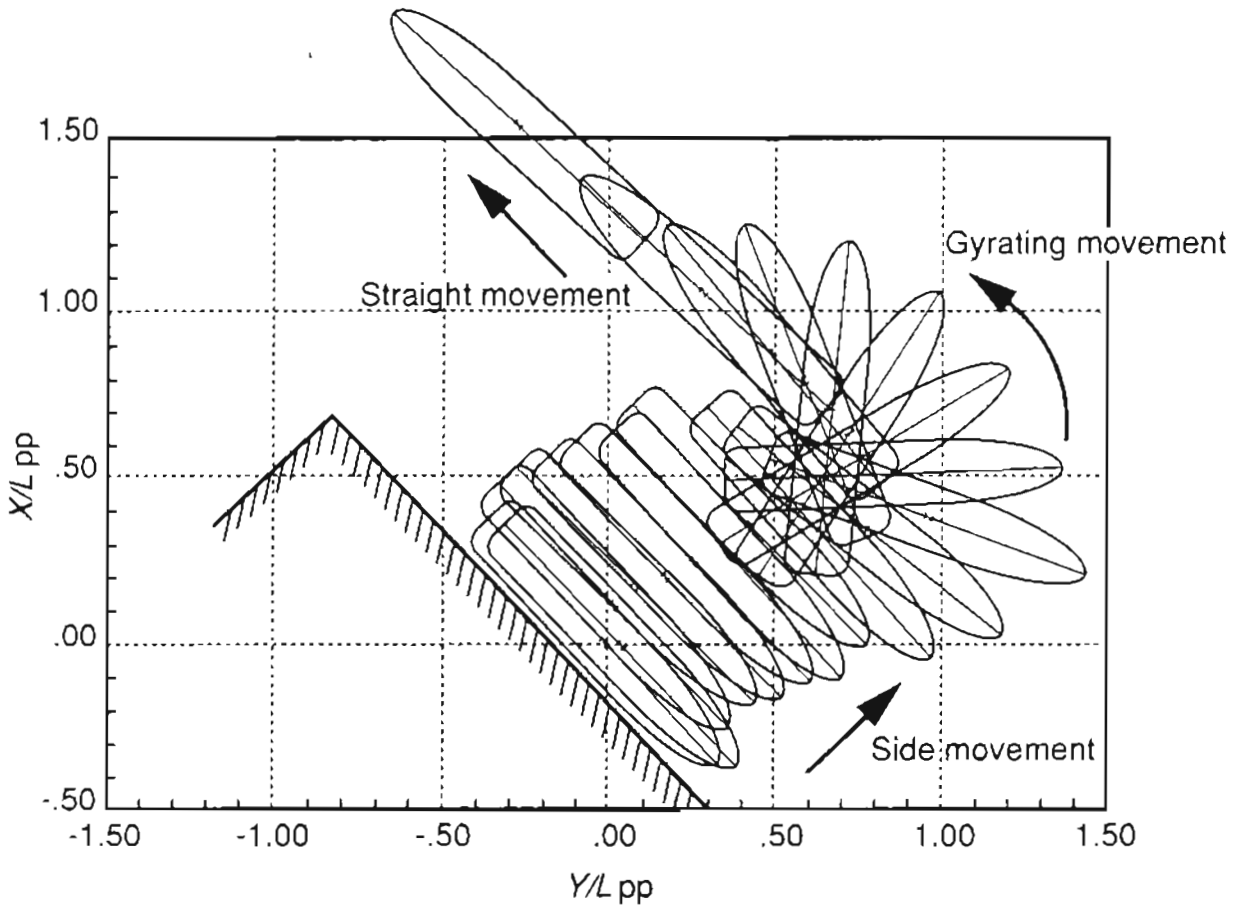


Fig.19 A tank test result of manoeuvring control in Nagasaki experimental tank

御入力を最適制御入力とする。この問題の定式化については、Shoujiら⁷⁴⁾に示されているが、以下に定式化の要約について示す。

まず、定式化にあたり次のような条件を課す。

- 1) 初期条件はすべて与えられている。
- 2) 状態量には拘束条件を課さないが、制御入力には等式拘束条件を課す。制御入力に対する制約条件は、通常不等式拘束条件で与えられるが、ダミー入力と正弦関数を使用して等式拘束条件に変換する。すなわち、入力の最大値を u_{max} 、実入力を u_a 、ダミー入力を u_d とすると $u_a = u_{max} \sin(u_d)$ とする。
- 3) 終端時間自由の問題とする。ただし、終端時間で正規化した時間軸を用い、見掛け上は、終端時間固定問題として定式化する。終端時間は、未知パラメータとして最適化問題と連立させて解く。
- 4) 1つ以上の状態量について終端値が指定されている。

また、基本となる変数を次のように定義する。

$x(t)$: 状態量 (n次元列ベクトル)
 $u(t)$: 制御入力 (m次元列ベクトル)
 τ : 終端時間
 t : 正規化された時刻 ($0 \leq t \leq 1$)、実時刻 = τt
 λ, ρ, μ : ラグランジュの未定乗数

この時、非線型最適制御問題の数学的定式化は、次のようになる。

運動方程式

$$\dot{x} - \phi(x, u, \tau, t) = 0 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (45)$$

で与えられる系の次に示す条件を満たす解のうち、

$$\text{入力の拘束条件} \quad S(u, \tau, t) = 0 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (46)$$

$$\text{初期条件} \quad x(0) = \text{Specified Values} \quad (47)$$

$$\text{終端条件} \quad [\psi(x, \tau)]_1 = [[x_i(1)]_\tau - (x_i)_f]_{i=1 \dots q} = 0 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (48)$$

(ここで、 $(x_i)_f$ は、i番目の状態変数に指定されている終端値を示す。)

評価関数

$$I = \int_0^1 f(x, u, \tau, t) dt \quad (49)$$

を最小にする解を見出す。このような2点境界値問題の解は、

$$\text{制御入力の最適条件} \quad f_u - \phi_u^T + S_u^T \rho = 0 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (50)$$

$$\text{未定乗数の微分方程式} \quad \dot{\lambda} - f_x^T + \phi_x^T \lambda = 0 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (51)$$

$$\text{終端時間の最適条件} \quad \int_0^1 (f_\tau^T - \phi_\tau^T \lambda) dt + (\psi_\tau^T \mu)_1 = 0 \quad (52)$$

を解くことによって与えられることが、文献⁷⁵⁾によって示されている。

非線型2点境界値問題に帰着させた非線型最適制御問題の解法を用い、種々の操船方法について数学的に最適な操船方法を求める試みがなされている。操船は、極めて経験主義的要素が強く、操船者が長年の経験を積み重ね独特の操船法を確立している。このとき、操船者は明確な尺度を意識しないものの、安全性、作業能率などに常に配慮しつつ操船を行っている。操船は、このように極めて総合的な判断を要する作業ではあるが、いま安全性を全く考慮しないで、単にある状態からある状態まで本船を最短時間で移行させる操船法とは、数学的に見てどのような操船法であるかを知ること、結果的に見て安全性を担保できているかもしれないという極めて逆説的な意味で重要であろうという観点から、最適性の定義として、最短時間操船方法を考えた研究が種々なされている。この時、評価関数は以下のように与えられる。最短時間操船法に限定した定式化については、文献⁷⁶⁾に示されている。

$$I = \int_0^1 \tau dt = \tau \quad (53)$$

(2) 操縦運動モデル

最適制御問題で最も重要なポイントは、制御対象の運動をいかに数学的に正確に表すか、すなわち操縦運動モデルをいかに正確に記述するかという点にある。本非線型最適制御手法を用いれば、原理的には複雑な非線型操縦運動モデルについても適用可能であるが、前述した定式化の過程からわかるように、運動方程式の1階の偏微分が必要である。偏微分操作を全て数値的に行うことは、計算量および精度の面で実用的ではない。また、運動の局面に応じて運動モデルを切り換えるような操作は、その点において偏微分値を不連続にし、解の収束性を悪くする。したがって、ここで用いる運動モデルとしては、非線型ではあるが可能な限り解析的に偏微分が可能な、前進運動に限定した簡易数学モデルを用いるものとする。DPS(Dynamic Positioning System)等への応用については、考えている運動の範囲で、モデルを簡略化することにより対応できる。簡易操縦運動モデルの詳細については、文献⁷⁷⁾に示されている。

(3) 数値解法

この問題の数値解法として、Wuらが示したSequential Conjugate Gradient-Restoration Algorithm⁷⁸⁾を用いる。この方法では、方程式誤差Pと最適性の誤差Qを次のように定義する。

$$P = \int_0^1 N(\dot{\mathbf{x}} - \phi) dt + \int_0^1 N(S) dt + N(\phi)_1 \quad (54)$$

$$Q = \int_0^1 N(\dot{\lambda} - f_{\dot{\lambda}}^T + \phi_{\dot{\lambda}}^T \lambda) dt + \int_0^1 N(f_u^T - \phi_u^T \lambda + S_u^T \rho) dt \\ + N \left[\int_0^1 (f_r^T - \phi_r^T \lambda) dt + (\psi_r^T \mu)_1 \right] + N(\lambda + \psi_x^T \mu)_1 \quad (55)$$

ここで、関数 $N(x)$ は、ベクトル x のノルム $x^T x$ を表す。そして、PおよびQが零になった時点で、(45)式から(52)式の条件が満たされ、最適解が得られる。Wuらの方法ではまず、Pの値を零に近づけ、次にQの値を零に近づける。Qについての計算が終了した時点で、Pの値を再度計算し、Pの値が許容範囲以上である場合は、もう一度Pの値を零に近づける計算を開始する。この手順を繰り返し、PおよびQの値が共に許容範囲以下になれば、計算を終了する。非線型の2点境界値問題の数値解法には、Particular Solution法⁷⁹⁾を用いた。

(4) 実制御問題への応用例

実制御問題への応用として、最初に検討されたのは、得られた最適解を用いていかに実際の船を自動的に制御するかである^{76),80)}。このような問題へのアプローチ方法としては、モデル規範型適応制御理論等⁸¹⁾の応用が考えられるが、第一近似的な制御則として実際の運動を最適解に近づける試みがなされた。これは、船の運動能力やアクチュエータを含む操船制御システム全体が実現しうる操船パターンに比べて余裕を持たせた最適解を求め、実際の船の動きを最適解に合わせるといふ発想に基づくものである。解としての最適性は低下するが、外乱や運動モデルの誤差等を吸収できるので実用的な方法といえる。具体的には、アクチュエータの最大能力の半分程度の値を入力拘束条件として与え最適解を求め、その最適解に沿って船が運動するよう以下に示すフィードバック補償を行う。

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_0(t) + \mathbf{K}_P(\mathbf{x}_0(t) - \mathbf{x}(t)) \quad (56)$$

ここで、 \mathbf{u} は実制御指令ベクトル、 \mathbf{u}_0 、 \mathbf{x}_0 は最適制御入力と最適解の状態量、 \mathbf{x} は現在の状態量ベクトル、 \mathbf{K}_P はゲインマトリクスを示し、 t は、制御開始からの経過時刻を示す。この方法を用い、実海域でFig. 20に示す東京商船大学の練習船「汐路丸」を使って実船試験が行われた。Fig. 21に、一定

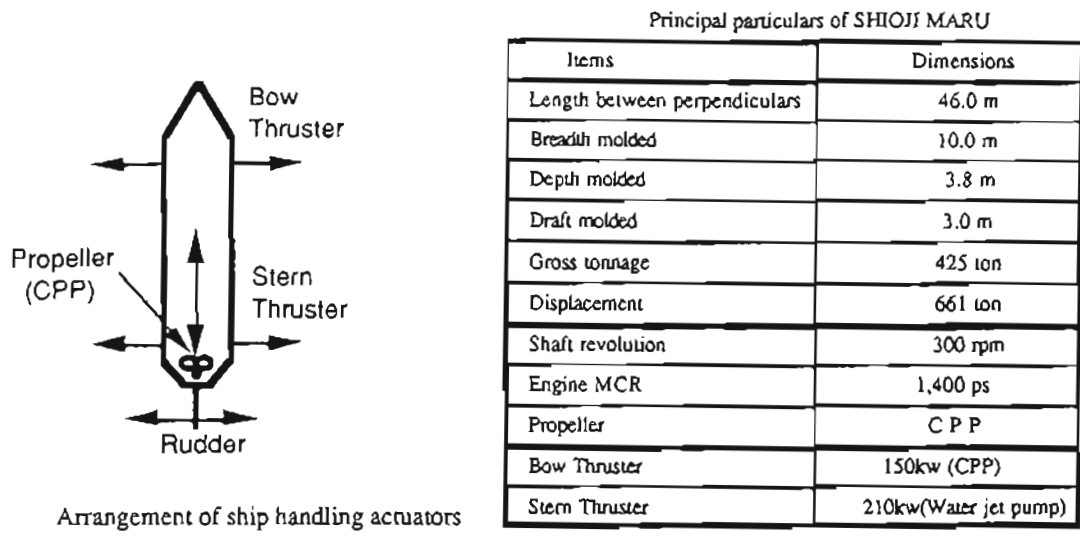


Fig.20 Actuators and principal particulars of Shioji Maru⁷⁶⁾

の距離横へ平行移動する幅寄せ操船⁷⁹⁾と反転して停止する着桟操船⁸²⁾についての試験結果を示す。幅寄せ操船では、位置情報を直接フィードバックすることなく横方向への移動量が精度良く制御さ

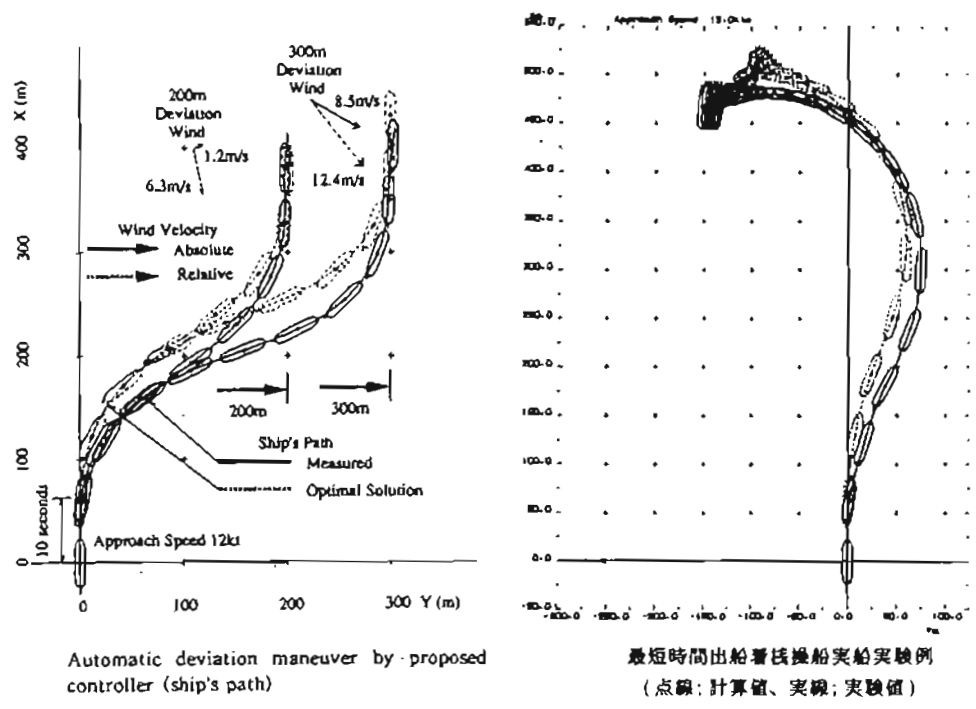


Fig.21 Examples of automatic controlled motion^{80),82)}

れていることがわかる。これは、非線型最適制御問題の定式化で用いた非線型操縦運動モデルの運動模擬精度が高いためであり、本手法により必要なフィードバック情報を少なくできることを示す。ただし、着桟操船の結果からわかるように停船直前の低速航行時など運動推定誤差が大きく、外乱の影響を強く受ける場合には誤差が大きく、何らかの補償手段が必要である。

次に、自動操船を実現する別のアプローチとして、最適制御入力ではなく最適制御目標を使うことが提案された⁸³⁾。前述のように最適制御問題の解として制御入力の時系列変化が得られれば、操作が複雑で熟練を要する多入力多出カシステムにおいても、いつの時点でどの装置をいかに操作す

れば良いかを知ることができる。しかし、実際の制御に適用することを考えるとすべてのアクチュエータを個別に制御できるシステムが必要であり、一般には新たな制御装置を付加しなければならない。一方、海洋調査船や最近の高速艇などは、高度な自動制御システムを有している。また、一般商船でもIBS(Integrated Bridge System)等を採用する船が増えている。そこで、それらの制御装置への制御目標を最適化して与えることで、従来の単純な形で制御目標を与えるだけでは不可能であった最適な操船を実現しようという発想である。このシステムは、既存の制御システムを利用して最適制御を実現しているのでOCS(Override Control System)と名付けられている。

1例として線型最適レギュレータ(LQR: Linear Quadratic Regulator)によって定点保持するシステムを考え、定点保持をしている状態から他の場所へ移動し、再び定点保持をする制御問題について比較する。Fig. 22にLQR単体とOCRを組んだLQRのブロック線図の比較を示す。

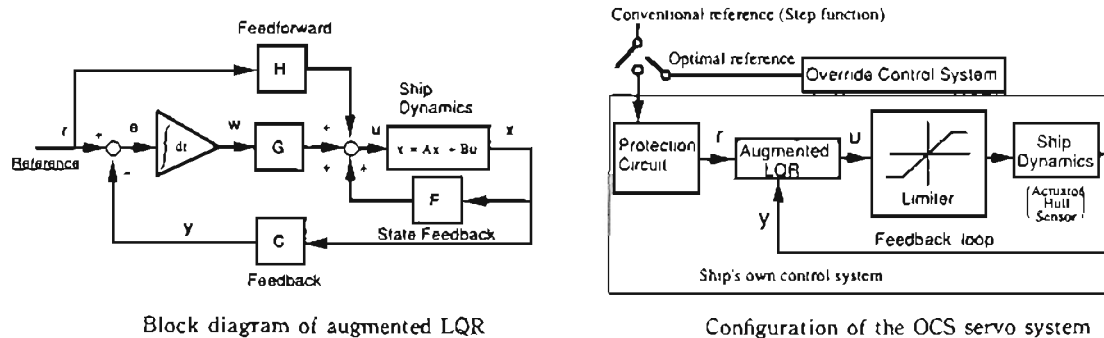


Fig.22 Comparison of block diagram between LQR and OCS⁸³⁾

最適制御入力に代えて最適制御目標を求めるための手順は、以下のようになる。

- 1) 制御目標に追従して動くフィードバックシステム全体を制御対象と考える。すなわち、制御入力として制御目標を与え、各アクチュエータに対する実制御入力は状態量として扱う。
- 2) 状態量の終端条件として最終の制御目標値を与える。
- 3) 制御入力の拘束条件の代わりに制御目標の最大値を与える。制御目標を必要以上に大きく設定することは、システムのゲインを高くすると同様の効果があり、即応性は高まるが制御系の安定性が悪くなる。したがって、制御目標に制限値を設け、一定以上の目標値を既存の制御システムに与えないようにする。

前述の「汐路丸」を用いて数値シミュレーションでLQR単体とLQRにOCSを組んだ場合の制御結果の比較を23に示す。シミュレーションの詳細については、文献⁸³⁾に示されている。目標値を単純にステップ状に変化させた場合のLQRでは、目標値の変化が大きいと不安定になるがOCSを組んで目標値の変化を最適化することにより滑らかな動きになることがわかる。このように制御入力に代えて種々の条件を設定することにより、多方面への応用が期待できる。

(5) 操船法の検証への応用例

大津らは、数学的に最適な操船法が実際に存在することを実験によって証明し、一般的な入港操船のための種々の最短時間操船法を計算し、人間が操船する場合の操船に資する知見について論じている^{82),84)}。

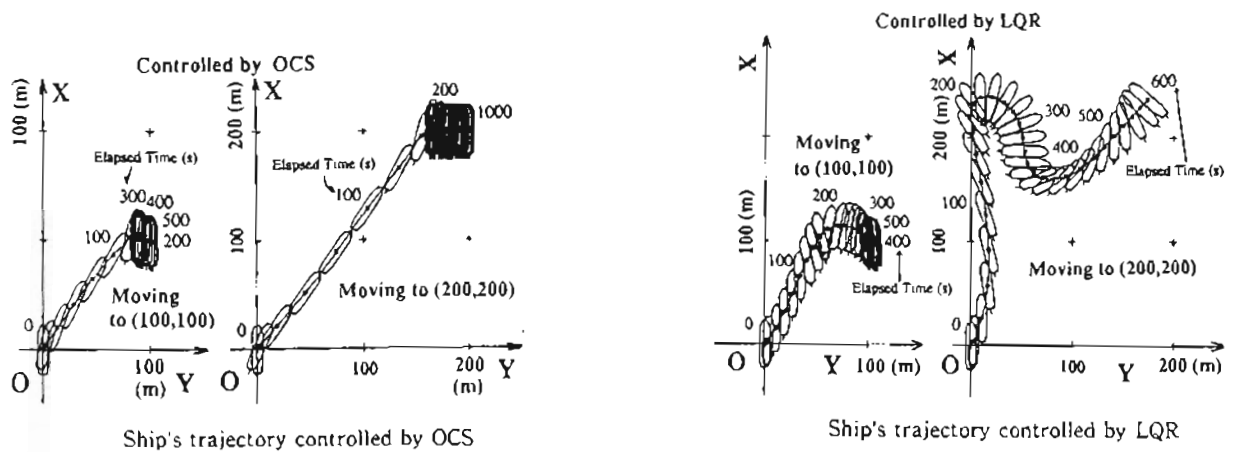
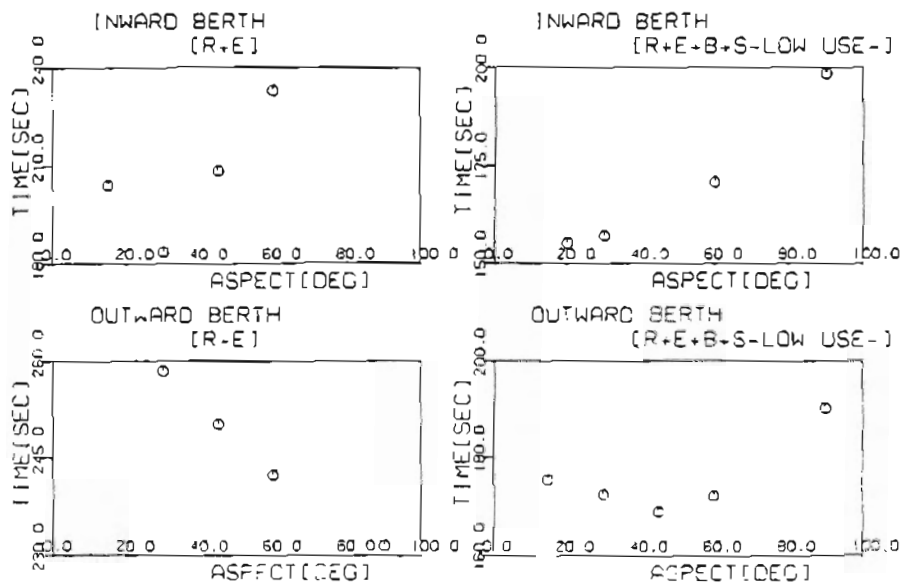


Fig.23 Comparison of controlled motions between LQR and OCS⁸³⁾

最終着岸点を前方の船の長さの12倍の地点、角度を所定の角に望む地点に、岸壁と平行に進入してきた「汐路丸」を最終着岸点、舵とCPPのみを利用して最短時間で入船および出船状態で停船させる方法ならびに舵とCPPの他にバウ、スターンスラスタを併用して停船させる方法を、初期点での最終着岸点を望む角度を種々変化させて計算した。Fig. 24に最終着岸点を望む角度に対する最短操船時間の変化を示す。



最短操船時間(左上:舵とCPPによる入船着岸、左下:同出船着岸、
右上:舵、CPP、バウ、スターンスラスタによる入船操船、右下:出船操船)

Fig.24 Operating time of berthing maneuver with minimum time required⁸²⁾

その結果、次のような知見を得ている。

- 1) 操船時間で比較すると、舵とCPPに加えてバウ、スターンスラスタを併用した入船着岸、出船着岸、舵、CPPのみを使用する入船着岸、出船着岸の順に操船時間が長くなる。その中で最も着岸時間が短いのは、舵とCPPにバウ、スターンスラスタを併用する入船操船のうち初期

点から着積点を20度ないし30度に望む場合である。

- 2) 舵とCPPで入船着積する場合およびそれらにスラスタを併用する出船着積において、初期点で最終着積点をほぼ30度に望む地点からの操船が最短で、それより小さな角度でも大きな角度でも操船時間は長くなる。
- 3) 舵とCPPで出船着積する場合、およびそれらにスラスタを併用して入船着積する場合、前者は初期点で最終着積点を深く望む程、操船時間が短い。

そして、個々の操船パターンの比較検討結果から、最短時間操船がその船舶の持つ操縦性能と流体力学的性質をフルに生かした無駄のない操船となっていると結論づけている⁸²⁾。さらに大津らは、外乱として定常風の影響をモデル化して取り入れ、次のような知見を得ている⁸⁴⁾。Fig. 25に着積操船に対する定常風の影響を示す。

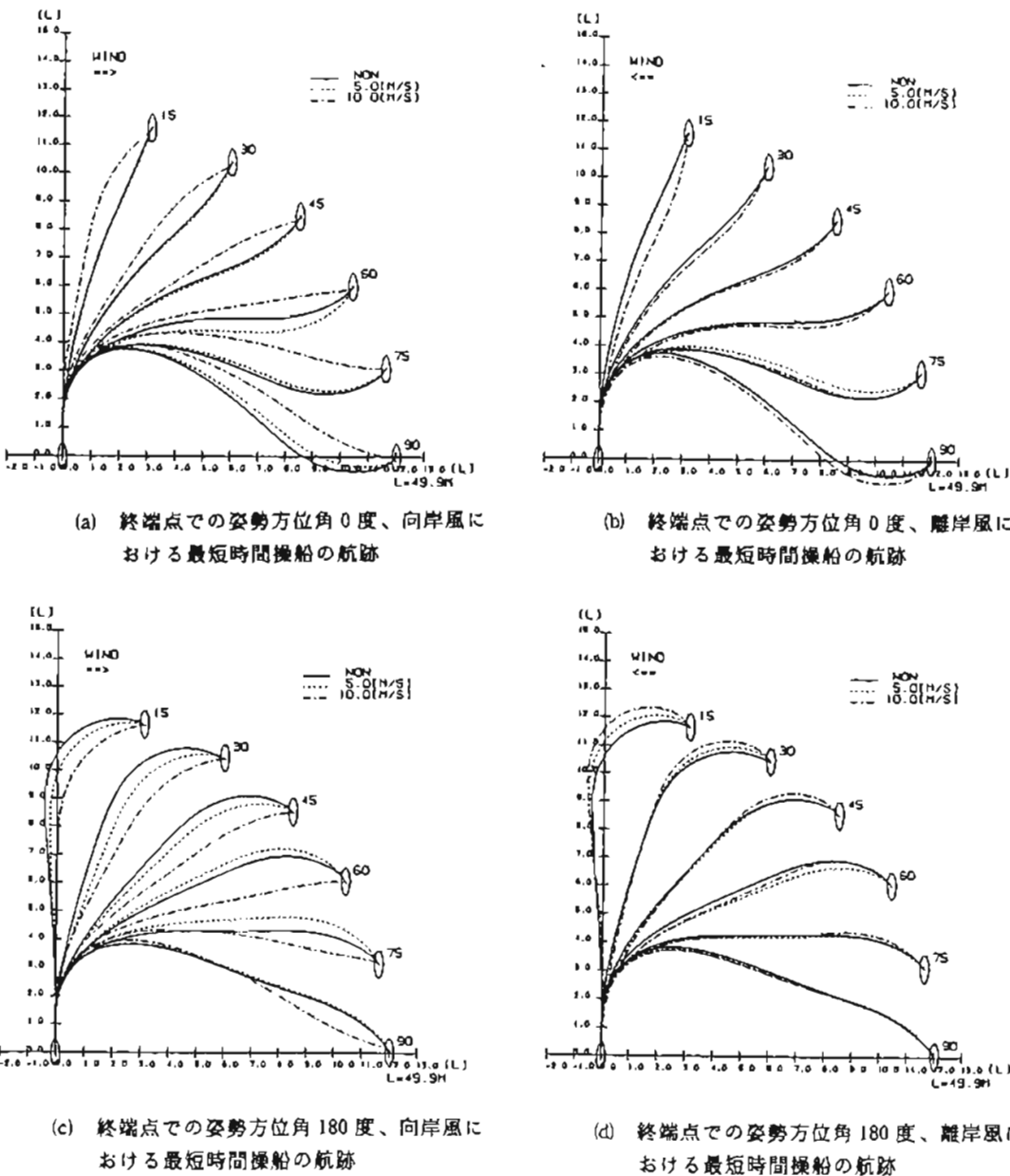


Fig.25 Ship's trajectories of berthing maneuver with minimum time required under steady wind⁸⁴⁾

- 1) 終端での姿勢方位角を0度とする入船停船の時、初期進入角度が浅いほど、操船所用時間は短くなる。しかし、向岸風が強い場合、その操船は風による切り上がりを十分利用した操船を行うものの、所用時間は長くなる。
- 2) 終端時の姿勢方位角が180度の出船停船の場合、向岸風の時、操船所用時間が最短となるのは、初期進入角が30度の場合である。離岸風の時、最短となるのは外乱のない場合と同様に初期進入角が45度の場合である。また、適度な離岸風の場合、最終段階で風による回頭が利用できるため、その操船所用時間は外乱のない場合より短くなる。

このように、外乱下での最適操船例では、外乱をうまく利用する結果が得られており、外乱として種々の外力を考慮することで多岐にわたる操船方法を検討することができる。

この他に岡崎ら⁸⁵⁾は、最短時間停止操船法をより系統的、幾何学的に調査し、その操船法の合理性を明らかにすることによって、船長、パイロットの操船計画に資するとともに、自動着岸操船法の資料として活用することを計画し、小型練習船だけではなく大型コンテナ船をタグボートで操船して着岸させる問題も解いている。固定ピッチプロペラを装備した一般商船の場合、プロペラ逆転時に大きな回頭モーメントが生じることが知られているが、これを芳村ら⁸⁶⁾の実験結果をもとにプロペラ前進率の関数として取り扱っている。また、固定ピッチプロペラの推力特性をWageningen B-Screwシリーズの試験結果⁸⁶⁾を用いることで偏微分可能な操縦運動モデルとしている。停船点を望む角度と停船点までの距離をパラメータとして、Dead Slow Aheadまで減速された状態からの最短時間停止操船を求めた結果、タグボートの使い方をFig. 26に示す4パターンに分類している。プロペラ逆転時の船体運動の非対称性が、操船法の相違となって現れている。パイロット等は、これを考慮しながら操船するが、数値解によってもプロペラ逆転時の回頭モーメントをうまく利用した操船が行われている。

(6) 今後の課題

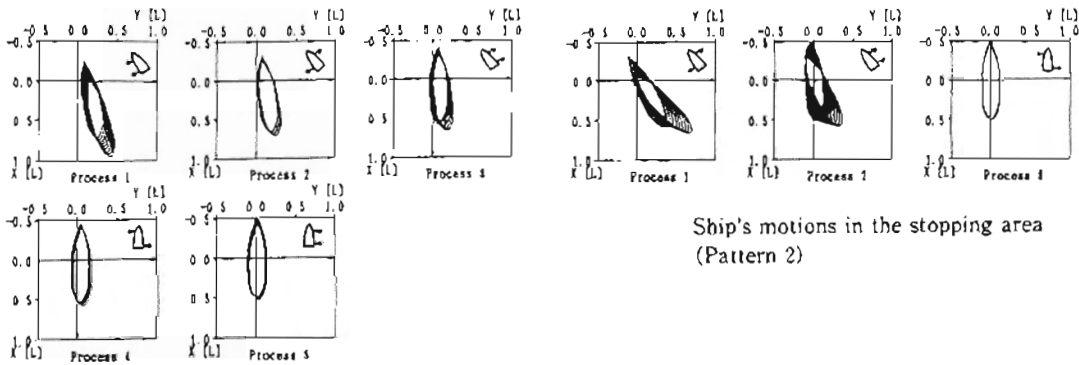
ここまで述べてきた最短時間停止操船法では、終端点付近での回頭時に終端点のわきに岸壁があったとすれば、船首もしくは船尾を岸壁にぶつける可能性がある。小瀬ら³¹⁾や小山ら³²⁾のように仮定の着岸点を実際の着岸点の手前に設定することが考えられるが、最短時間操船の意義からは遠ざかることになる。そこで、今後は、岸壁を考慮し幾何学的に禁則領域を設定した、状態変数に不等式拘束条件を付加した2点境界値問題を解く必要がある。

8.4 将来展開

前節ではまったく違った角度から港内操船の自動化をとらえ、その方法と適用例を解説した。

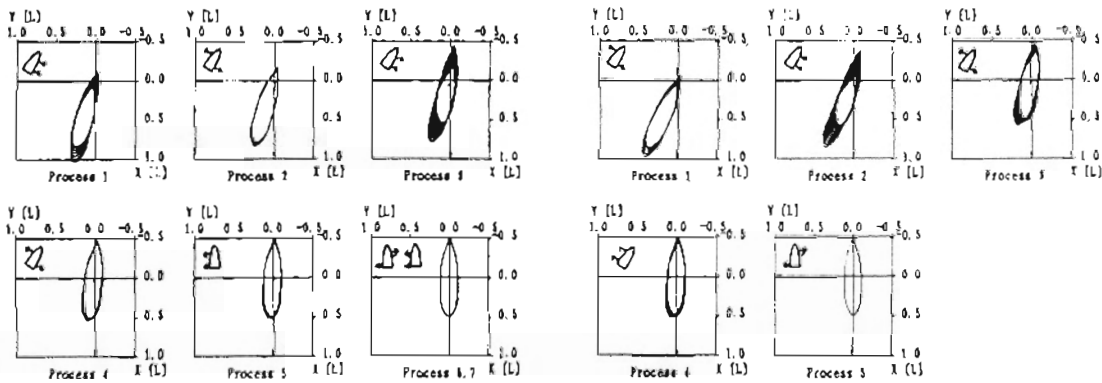
ひとつは現実的な方法である。あらかじめ、港内での経路、速力が決まっていれば、現実にはそのつどその外乱条件で（必要なら推定して）、それを実現するための必要な所要推力を求め、それを与えられたアクチュエータに配分し、その配分された推力と目標に達するような制御を与える手法を求めればよい。では、何の問題もないのか。

一方、もうひとつは全く対照的で、数学的である。港内操船を始端と終端条件が決まった2点境界値問題としてとらえ、ある評価条件（ここでは2点間の最短時間移動）のもと最適解を求める方法である。結果を見るとなるほど合理的で、人間が自然に習得している方法に近いようにも思うし、ある局面では人間ならぜったいにしないであろうようなパターンも見られる。それは、人間の場合、



Ship's motions in the stopping area (Pattern 1)

Ship's motions in the stopping area (Pattern 2)



Ship's motions in the stopping area (Pattern 3)

Ship's motions in the stopping area (Pattern 4)

Fig.26 Operating patterns of tugboats for stopping container ship⁸⁵⁾

計算機のように正確無比でないせいもあるが、最短時間だけが評価基準でないからでもある。したがって、最後にも指摘したように、現実に適用するにはまだ解決しなければならない問題もある。

では、今後はどういう展開があるのか。我々はどういう研究開発をすればよいか。ここでは、次の3点に絞って、私見を述べる。

8.4.1 システム統合化

当然、近い将来、統合化ブリッジ(IBS)を始め、安全性と信頼性向上をめざし、省人化、省エネルギー化の観点からシステムの統合化が重要となってくるであろう。技術的には船内LANを用いて、航海、荷役、機関の各装置の通信を行い、ひとつの操船盤上で、最適航路計画、荒天時操船支援、衝突予防操船、航海データサービスなどの操船支援機能や荷役状況や機関室状況の監視・保守機能が実現できるようになる。また、人工衛星との通信を介して陸上管理システムや気象データシステムとの結合を行い、業務の分散化やよりきめの細かい船舶管理が可能となるであろう。

8.2.1でも述べたように、港内操船の自動化に必要な要素技術はほとんどそろっている。問題は、システム統合化技術である。MITSやISITといった船舶情報システムの標準化が急速に進みつつありこの動向には特に注意したい。

8.4.2 陸上設備とのインターフェース

今回のシンガジウムでは港湾に接岸するまで、あるいは、離岸してからのみを取りあげたが、港湾自動荷役設備とのリンクもまた重要である。

一例としてコンテナ船とAGV (Automatically Guided Vehicle、無人搬送車) 間のインターフェースシステムを紹介する。陸上側のAGVがコンテナヤード内の海上側との接点であるカーゴヤードに荷物を運び降ろし、船舶がカーゴヤードに接岸し、荷物をピックアップして積み込み、海上輸送を行う。円滑な作業遂行のためには、荷物置場に対し同時に作業をしない安全設計と積み込み積みおろしのタイミング条件を考慮した安全設計が課題となる。山本ら⁸⁸⁾はこの問題への対処のためにペトリネットを用いた設計を行った。AGV、カーゴヤード、船舶の作業シーケンスをペトリネットでモデル化し、可達木解析によるデッドロックの洗い出しを行う。デッドロックが生じればインターロックやロッキングブレースによる安全設計を実施し、再度、可達木による安全性の検証を行い、デッドロックの無いシステムの構築を行う。これによりインターフェース部の円滑な作業遂行が可能となった。

今後は、この例のように物流全体に関する最適化、省人・省エネルギー化も求められるようになるであろう。

8.4.3 近未来船の運航形態

インターネットが出始めたころ、ただ世界中の計算機をネットワークでつないで何になるの？電子メールだけ？ファイル転送って言っても何をそんなに世界中に転送する必要があるの？、といった冷やかな見方が多かった。しかし、ここ1~2年の動きを見ると、こんな使い方があったのか、こういうサービスが商売になるのか、と驚きの連続である。インターネットそのものがそうしたのではなく、そうしたインフラの上にさらに新しいインフラが整備され、システムが構築されていく。いま思うとアメリカの国防省が最初の通信プロトコルを決めたわけだが、今日、万とある通信形態すべてを予想していたとしたらすばらしいし、恐ろしい。それだけ、最初のプロトコルを決定するのは重大である。

船舶の場合も同じであろう。キーとなるのは情報通信ではなかろうか。すでに、船舶と陸上の通信を用いた船舶管理サービスが始まっているが、今後、船員の減、質の低下などからますます需要は増えるであろう。また、運航そのものへの応用に関してもすでに、Shore-based Pilotage⁸⁹⁾、VTMIS(Vessel Traffic Management and Information Service)⁹⁰⁾などが紹介されているし⁹¹⁾、第10章でも紹介されている自動船舶識別システムなどがある。この辺までは、まだわれわれの想像範囲だが、Radar-less VTS⁹²⁾やVoice-less VTS⁹³⁾、さらに、Virtual VTS⁹⁴⁾まで登場してきた。今後、誰がどんなアイデアを出すかが楽しみだ。

現在、造船学会将来技術検討委員会では近未来の船について、議論を重ねている。その中でキーワードとなっているのがCISS (Computer Integrated Shipping and Shipbuilding)と先進安全船である。コンピュータや情報ネットワークの活用は当然である。船の建造から運航、転売、そしてスクラップに至るまでの船の一生に製造者としての責任がかかる時代がまもなく来るであろう。また、製品情報のライフサイクルメンテナンス、最適物流を地球規模で考えた船舶の設計・運航など、われわれの挑戦はまだ続く。

8.5 結

本章では、港内操船に関連する要素技術に関する研究の紹介をするとともに主に実船に適用した離着棧問題に絞ってふたつの理論の概説と適用例を示した。いままで、とても自動化は無理と思われてきた分野である。これから解決しなければいけない問題はいくつもあるが、現状の技術レベルで港内操船の自動化がもはや挑戦でないことがわかっていただけたことと思う。また、大胆にも将来展開と題して、狭水路および港湾域での船舶の運航の自動化の近未来を予測してみた。その結果、改めて思うことがある。

計算機の性能は指数的に向上し、また、人工衛星による測距・通信、船内LANによる情報の一元化など港内操船を自動化するために必要な道具はそろってきた。問題はむしろ、制度上や慣習上の障壁ではなかるうか。船舶は常に国際化の最前線に立たされてきた。世界はすでに新しい船舶管理・運航の時代にはいつている。そういった制度や慣習という数学的に扱いにくい問題に四苦八苦しているうちに、物流ごと他のアジアの国にシフトしてしまい、あとには高価な操船システムの船や荷役設備の整ったコンテナヤードに閑古鳥が鳴く羽目にはなりはしまいか。

日本は、高度自動運航システムの時に世界のトップに立っていたが、今はどうだろう。高度なシステムを扱うには高度な管理技術がいる。しかし、信頼性の悪いスイッチを並列につなぐことによって信頼性が自乗で改善されるように、個々にはレベルの低いものをシステム統合化によって信頼性の高いかつ、複雑なものもできることを忘れないで欲しい。

最後に、第一著者の私事ながら、一言、触れたいことがある。今回の原稿を書くにあたって、参考文献にはあげていないが改めて読んだものがある。日本造船学会により、1970年に行われた第2回操縦性シンポジウムの第6章、自動操縦について—海上交通の制御—(小山健夫、野本謙著作)である。27年の歳月を経て、さすがに、制御理論の進展を感じる。しかし、その中で未来予測に近いことが語られている。そのひとつが衝突の回避(見張りの自動化)であり、もうひとつは(港内操船における)Manual操船の援助法である。第一著者がこの道に進んだのはそれを自分の手でやってみたい、と思ったことに起因するし、その一番目の夢は両先生の予測どおり、かなりのレベルまで可能となった。奇しくも、二番目の夢を引き継いだ。両先生のように20年、30年後を見越した夢となったかどうかは怪しいが、ここで次の夢として次世代の研究者たちに与えることができたら望外の喜びである。

参考文献

- 1) 松本公道: 明日の船舶技術開発の動向、船誌、第641号、pp. 2-5 (1982).
- 2) (社)日本造船研究協会: 高度自動運航システムの研究開発総合報告書 (1989).
- 3) 大島 寛外著者多数: 高信頼度知能化船(高度自動運航システム)、(その1)～(その13)、船誌、第721号、第722号、第723号、第725号、第726号、第727号、第728号、第729号 (1989-1990).
- 4) 小山健夫: 船舶運航管理の新時代—ISMコードへの対応—、造船研究、第28巻、第1号、pp. 1-8 (1996).
- 5) 葛西宏直: 狭水域航行の自動化、第8回運動性能研究委員会シンポジウム船の運航自動化技術、pp. 59-87 (1991).
- 6) 高井忠夫、大和裕幸: 離着棧操船の自動化、同上、pp. 89-111 (1991).
- 7) U.S. global positioning system policy, US Government Press Release, 下記サイトにて入手可
URL <http://www.usis-israel.org.il/public/press/trade/archive/april/et3.4-2.htm> (1997).
- 8) 織田博行、五十嵐和之、関 信次、石井 真: GPSを用いた運動測定システム、航海誌、第126号、pp. 29-34 (1995).

- 9) 高橋宏直、萩原秀樹、井潤健二、木阪恒彦: RTK/OTF GPSによるTSL着棧システムに関する研究、航論、第95号、pp. 79-85 (1996).
- 10) 高島正純、橋本紳一: 船舶入出渠誘導システム、船誌、第812号、pp. 63-65 (1997).
- 11) 日本航海学会: GPS/DGPS利用技術の展望、同学会シンポジウム (1996).
- 12) 福戸淳司、今津隼馬: オブジェクト指向ツールによる船舶航行シミュレーションシステムの構築、航論、第93号、pp. 233-239 (1995).
- 13) K. Hasegawa, T. Takimoto and I. Hayakawa: Reconfiguration of ship auto-navigation fuzzy expert system (SAFES), 関船誌、第228号 (予定) または長谷川和彦、滝本忠教、早川 勇: 船舶自動航行ファジィエキスパートシステム(SAFES)の再構築、関西造船協会講演論文集、第8号、pp.191-196 (1997).
- 14) T. Koyama and Y. Kimura: An application of Kalman filter to the discrete time route tracking of ships, Proc. 4th Ship Control Systems Symposium (SCSS), The Hague, Vol. 1, pp. 170-184 (1975).
- 15) J. K. Zuidweg: Optimal and suboptimal feedforward in automatic track-keeping system, Proc. 6th SCSS, Ottawa, Vol. 2, pp. (G1 1.)1-18 (1981).
- 16) C. H. Cuong and M. G. Parsons: Surface ship path control using multivariable integral control, Proc. 6th SCSS, Ottawa, Vol. 2, pp. (G1 2.)1-30 (1981).
- 17) C. G. Källström: Identification and adaptive control applied to ship steering, Ph. D. Thesis, Lund Inst. of Technology (1982).
- 18) X. R. Lu, J. H. Jiang and Y. X. Huang: Design of a self-tuning adaptive track-keeping control system for ships, Proc. International Conf. Manoeuvring and Control of Marine Craft (MCMC'92), pp. 178-192 (1990).
- 19) A. Rios-Neto and J. D. D. Cruz: A stochastic rudder control law for ship path-following autopilots, Automatica, Vol. 21, No. 4, pp. 371-384 (1985).
- 20) T. Holzhüter: A high precision track controller for ships, Proc. 11th IFAC Triennial World Congress, Tallinn, USSR, pp. 425-430 (1990).
- 21) R. S. Burns: Application of the Riccati equation in the control and guidance of marine vehicles, Proc. of Workshop on the Riccati Equation in Control, Systems and Signals, IFAC, Como, Italy (1989).
- 22) A. C. Messer and M. J. Grimble: Introduction to robust ship track-keeping control design, Trans. of the Inst. of Measurement and Control, Vol. 15, No. 3, pp. 104-110 (1993).
- 23) 小川原陽一、吉永浩志、種子島謙一、新宅英司: 学習型フィードフォワードコントロールによる船舶の操縦運動制御システムの研究、西船報、第83号、pp. 151-159 (1992).
- 24) 小川原陽一、岩本才次、山本善弘: 船舶操縦運動の学習型フィードフォワード制御方式の実用化に関する研究(I) —複数外乱下における多変数制御システムの構築—、船論、第180号、pp. 705-712 (1996).
- 25) 長谷川和彦、上月明彦: Fuzzy制御により自動避航システムに関する研究、関船誌、第205号、pp. 1-10 (1987).
- 26) Y. Zhang, G. E. Hearn and P. Sen: Neural network approaches to a class of ship control problems (Part I: Theoretical design), Proc. 11th SCSS, Southampton, UK, Vol. 1, pp. 115-133 (1997).
- 27) Y. Zhang, G. E. Hearn and P. Sen: Neural network approaches to a class of ship control problems (Part II: Simulation studies), *ibid.*, Vol. 1, pp. 135-150 (1997).
- 28) 小瀬邦治、寺本定美、畝 正二、日富博喜、吉川賢治、中川有紀: 大型船の離着棧操船におけるパイロット支援システムに関する人間工学的研究、船論、第164号、pp. 231-239 (1988).
- 29) 山田 一、大西 廣: 主機、CPP、舵、スラスタの総括制御、マリンエンジニアリング (日本船舶機関学会誌、以後、舶機誌と略す)、Vol. 29, No. 9, pp. 662-668 (1994).
- 30) 小嶋洋幸、下野雅生: 着離棧および係船システム、船誌、第799号、pp. 26-33 (1996).
- 31) 小瀬邦治、福戸淳司、菅野賢治、赤木 茂、原田美秀子: 船の自動離着棧システムに関する研究、船論、第160号、pp. 103-110 (1986).
- 32) 小山健夫、金 雁、金 奎煥: 船の自動離着棧のシステムの考察 (第1報)、船論、第162号、pp. 201-210 (1987).

- 33) T. Takai, H. Yoshihisa: Automatic berthing by the neural controller, Proc. 8thSCSS, The Hague, Vol. 2, pp.209-227 (1987).
- 34) H. Yamato, H. Uetsuki and T. Koyama: Automatic berthing by the neural controller, Proc. 10th SCSS, Bethesda, USA, Vol. 3, pp. 183-201 (1990).
- 35) 長谷川和彦、木寺啓治:ニューラルネットワークと知識ベースを使用した自動着棧システム、関船誌、第220号、pp. 135-143 (1993).
- 36) 大和裕幸、小山健夫、中川武彦:エキスパートシステムによる自動着棧制御、船論、第174号、pp.327-337 (1993)
- 37) K. Hasegawa and T. Fukutomi: On harbour manoeuvring and neural control system for berthing with tug operation, Proc. MCMC'94, Southampton, UK, pp. 197-210 (1994).
- 38) 「高度自動運航システム」総合シミュレーションの公開について、造船研究、Vol. 20、No. 4 (1989)
- 39) 高井忠夫、大津皓平:汐路丸による自動着棧実験について、航論、第83号、pp. 267-276 (1990).
- 40) 運動性能研究委員会第12回シンポジウム操縦性研究の設計への応用、日本造船学会 (1995).
- 41) M. Hirano, J. Takashina, S. Moriya and M. Fukushima: Open water performance of semi-balanced rudder, 西船報、第64号、pp. 93-101 (1982).
- 42) 小田耕吉、山下周一、一瀬哲也、中武一明:マリナー舵模型に働く直圧力と抗力について、西船報、第91号、pp. 15-23 (1996).
- 43) 藤井 斉:自航模型による舵特性の研究(2)、船論、第110号、pp. 31-41 (1961).
- 44) 小瀬邦治、平尾三郎、吉川賢治、中川有紀:港内曳船の性能に関する研究、船論、第162号、pp. 133-138 (1987).
- 45) 高品純志:タグによる操縦運動とその計算法について、船論、第160号、pp. 93-102 (1986).
- 46) J. Takashina and M. Hirano: Ship maneuvering motion by tugs in deep and shallow water, Proc. MARSIM & ICSM 90, Tokyo, pp. 379-385 (1990).
- 47) 小林弘明、石橋 篤、阪口泰弘:曳船による操縦運動に関する研究、航論、第88号、pp. 49-57 (1993).
- 48) 小林弘明、阪口泰弘:港内操船における曳船の支援効果について—I、航論、第88号、pp. 59-66 (1993).
- 49) 小林弘明、阪口泰弘:港内操船における曳船の支援効果について—II、航論、第90号、pp. 289-295 (1994).
- 50) 小林弘明、阪口泰弘:港内操船における曳船の支援効果について—III、航論、第92号、pp. 91-99 (1995).
- 51) 岡本 洋、玉井浩正:サイド・スラストに関する模型実験、関船誌、第134号、pp. 42-53 (1969).
- 52) 貴島勝郎、井上正祐:サイドスラスト装備船の操縦性に及ぼす前進速度影響、西船報、第51号、pp. 81-87 (1976).
- 53) 貴島勝郎、松本憲洋、二村 正、田中 進:バウスラスター性能に及ぼす浅水影響、西船報、第73号、pp. 54-65 (1987).
- 54) 貴島勝郎、古川芳孝:船舶に装備したスラストの性能の推定に関する研究、西船報、第87号、pp. 145-153 (1994).
- 55) E. Kobayashi and S. Asai: A simulation study on ship manoeuvrability at low speeds, Proc. International Conf. on Ship Manoeuvrability - Prediction and Achievement (ICSM), RINA, London, Vol. 1, Paper No. 10, (pp. 1-11) (1987).
- 56) E. Kobayashi: Manoeuvring simulation at low speed for a ship with twin screw, rudder and thrusters, Proc. MARSIM & ICSM 90, Tokyo, pp.447-455 (1990)
- 57) 小瀬邦治、細川護久、山田秀光、秋藤研二:特殊舵の性能推定に関する研究、西船報、第84号、pp. 49-57 (1992).
- 58) 向原誠也:ベクツインラダーシステムについて、舶機誌、Vol. 29、No. 9、pp. 669-675 (1991).
- 59) 芳村康男、佐々木紀幸、竹川正夫:フラップ舵を装備する船舶の操縦性能とその推定、船論、第181号(予定) (1997).

- 60) 遠藤 真、小林弘明: ジョイスティックコントローラ装備船の離着岸操船能力— I — ジョイスティックコントローラの構成—、航論、第89号、pp. 71-79 (1993).
- 61) 遠藤 真、小林弘明: ジョイスティックコントローラ装備船の離着岸操船能力— II — シミュレータ実験による評価—、航論、第90号、pp. 281-288 (1994).
- 62) O. Khattab: Ship handling in harbours using real time simulation, Proc. ICSM, RINA, London, Vol. 1, Paper No. 11, (pp. 1-12) (1987).
- 63) T. P. Mackey, V. P. Bingham and H. O. G. Hoelstrom: Application experiences with high maneuverability rudders, Proc. 9th SCSS, Bethesda, USA, Vol. 1, pp. 132-168 (1990).
- 64) M. Hamamoto and T. Enomoto: Maneuvering performance of a ship with VecTwin Rudder System, 船論、第181号 (予定) (1997).
- 65) 鍋島健治郎、表 正和、上野博敬、森本 孝、多田納久義: 新しい舵「ベクトイン」とこれを装備した船の操船実績について、関船誌、第228号 (予定) または関西造船協会講演論文集、第8号、pp. 191-196 (1997).
- 66) M. Insel and I. H. Helvacioğlu: Manoeuvrability analysis of double ended ferries in preliminary design, Proc. 11th SCSS, Southampton, UK, Vol. 2, pp. 127-141 (1997).
- 67) Ø. J. Rødseth, J. O. Hallset and P. Haave: A standard for integrated ship control, Proc. 10th SCSS, Vol. 3, pp. 299-313, Ottawa, Canada (1993), または下記サイトに情報有り
URL <http://www.rtk.ntnu.no:80/SINTEF/MITS/>
- 68) E. D. Story: Integrated Shipboard Information Technology (ISIT) Platform Project, ARPA/Maritech/PPIT, Marine Management Systems (MMS) Inc., USA, または下記サイトに情報有り
URL <http://www.mmsintl.com/isit/>
- 69) その一部が
T. N. Hansen and M. Granum-Jensen: Analysis of basic transmission network for integrated ship control systems, Proc. 10th SCSS, Vol. 3, pp. 157-175, Ottawa, Canada (1993), などに公表されている以外は、未公開、ただし、下記サイトに情報有り
URL <http://www.deslab.naval.ntua.gr/~mtrans/>
- 70) I. Yamamoto and Y. Terada : Theoretical research on the modelling of a low-speed cruising vehicle for control law design, JSME International Journal, Vol. 37, No. 3, pp. 521-527 (1994).
- 71) 寺田郁二、山本郁夫: 船舶操船制御系設計に関する研究、船論、第178号、pp. 313-319 (1996).
- 72) I. Yamamoto, Y. Terada, E. Kobayashi and T. Togita : Research in a dynamic positioning control system for a ship, Proc. Tenth Ship Control Systems, Vol. 3, pp. 67-77 (1993).
- 73) 大仲茂樹、寺田郁二、山本郁夫、和田洋二郎、古賀 昇、朝倉義博: 架橋工用自航船の定点保制御装置の開発、三菱重工技報、Vol. 33, No. 6, pp. 408-411 (1996).
- 74) K. Shouji, K. Ohtsu and S. Mizoguchi: An automatic berthing study by optimal control techniques. Proc. of 2nd Control Application in Marine Systems (CAMS'92), Genova, Italy, pp. 185-194 (1992)
- 75) 加藤寛一郎: 工学的最適制御、初版、東京大学出版会 (1988).
- 76) 正司公一、大津皓平: 最短時間操船法について、第10回誘導制御シンポジウム、pp. 9-16 (1993).
- 77) 正司公一、大津皓平: 最適制御理論による操船の最適化と自動化について (第一報)、船論、第172号、pp. 365-373 (1992).
- 78) A. K. Wu and A. Miele: Sequential conjugate gradient-restoration algorithm for optimal control problems with non-differential constraints and general boundary conditions, Part 1. Optimal Control Applications and Methods, Vol. 1, pp. 69-88 (1980).
- 79) A. Miele and R. R. Iyer: General technique for solving nonlinear two-point boundary-value problem via the method of particular solutions, Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 5, No. 5, p. 382-399 (1970).
- 80) 正司公一、大津皓平、堀田敏行: 最適制御理論による操船の最適化と自動化について (第二報)、船論、第173号、pp. 365-37 (1993).
- 81) I. D. Landau: System Identification and Control Design, Prentice Hall (1990)

- 82) 大津皓平、正司公一：最短時間操船に関する研究－I、－外乱のない場合の岸棧操船－、航海論、第90号、pp. 261-271 (1994).
- 83) 正司公一、大津皓平：最適制御理論による操船の最適化と自動化について（第三報）、船論、第174号、pp. 365-373 (1993).
- 84) 大津皓平、正司公一、岡崎忠胤：最短時間操船に関する研究－II、－外乱のある場合の定点停止法－、航海論、第91号、pp. 21-29 (1994).
- 85) 岡崎忠胤、大津皓平、正司公一、水野直樹：最短時間停止操船に関する一考察、船論、第180号、pp. 223-234 (1996).
- 86) 芳村康男、野本謙作：増減速を伴う操縦運動の取り扱いについて、船論、第144号、pp. 57-69 (1978).
- 87) W. P. A. van Lammeren *et al.*: The Wageningen B-Screw Series, Trans. SNAME, pp. 269-317 (1969).
- 88) 山本都夫、藤本英司：AGV制御へのペトリネット適用研究、第34回SICE学術講演予稿集、計測自動制御学会 (1995).
- 89) W. F. M. van der Heijden: Ship Requirements for shore-based pilotage, Proc. 10th SCSS, Vol. 4, pp. 281-288, Ottawa, Canada (1993).
- 90) J. Prunieras: Recent thoughts on the VTMS concept, Proc. 8th International Symposium on Vessel Traffic Services, Rotterdam (1996).
- 91) W. F. M. van der Heijden: 'BRIDGE 2000', the real integrated bridge, Proc. 11th SCSS, Vol. 1, pp. 330-337, Southampton, UK (1997).
- 92) W. R. Cairns: Design and implementation of a radar-less VTS in a riverine application, Proc. International Maritime Conference "The Impact of New Technology on the Marine Industries", Vol. 1. Paper: 12, pp. 1-15, Southampton, UK, (1993).
- 93) P. F. Brok: Transponder system feasibility tested in the Scheldt VTMS in Antwerp, *ibid.*, Vol. 1, Paper: 13, pp. 1-12, Southampton, UK (1993).
- 94) K. Hasegawa: A proposal of global ship information system and its application to automatic ship collision avoidance system, Proc. 11th SCSS, Vol. 2, pp. 1-10, Southampton, UK (1997).