



Title	最適制御理論による操船の最適化と自動化の研究
Author(s)	正司, 公一
Citation	大阪大学, 2023, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/91799
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

博士学位論文

最適制御理論による
操船の最適化と自動化の研究

正 司 公 一

2022年 11月

大阪大学大学院工学研究科

目次

第 1 章	序論	1
第 2 章	非線型最適制御理論による操船の最適化と自動化	4
2.1	緒言	4
2.2	線型最適解	5
2.3	非線型最適解	7
2.4	操縦運動モデル	9
2.5	変針問題における非線型最適解と線型解との比較	12
2.6	自動操船	15
2.7	結言	18
第 3 章	外乱下における操船の最適化と自動化	20
3.1	緒言	20
3.2	外乱の定式化	20
3.3	実船の制御	26
3.4	実船試験	30
3.5	結言	35
第 4 章	線型最適レギュレータを用いた多入力多出力制御	37
4.1	緒言	37
4.2	LQR の構築	38
4.3	OCS の構築	40
4.4	制御性能の比較	42
4.5	結言	47
第 5 章	疑似逆行列を用いた多入力多出力制御	48
5.1	緒言	48
5.2	推力配分の定式化	48
5.3	操縦運動計算例	51
5.4	結言	55

第 6 章 結論.....	56
謝辭.....	59
参考文献.....	60

第1章 序論

はじめに

18 世紀にイギリスで産業革命がおこり、いろいろな自動制御に関する発明がなされてきた。アクチュエータの制御に関しては、蒸気機関に対するガバナーの機械的な制御に始まり、いろいろな分野に適応されていった。船舶については、20 世紀の初頭にオートパイロットが機械・機構的なシステムとして発明された。当時の制御理論としては、現在の古典制御理論と変わらない完全なものが確立されていたが、船舶の針路保持に必要な、方位と角速度の制御を補償する比例微分制御(PD 制御)ですら、接点サーボによる比例制御と復元機構中のバックラッシュによる位相進みを組み合わせた近似的な PD 制御であった。

第二次世界大戦後になると、電子技術の発達と機械・機構的なシステムの改良が進み、方位と回頭角速度を用いた PD 制御が機械式でも可能となった。やがて電子技術の発達に伴いアクチュエータの制御方式は機械式から電気式、さらには演算器を用いた電子式へと進化していった。この段階で、保針のためのオートパイロットについては、数学モデルに従って数式を使って設計することが可能となり、外乱やシステム故障にも対応できる現在の形になった¹⁸⁾。

一方、1970 年代の電卓をはじめとして発生した小型の計算機は、1980 年代の後半には、個人で手軽に扱うことのできるパーソナルコンピュータへと進化した。これによって、1970 年代の後半から、アナログコンピューターや大型計算機を用いて大規模計算により行われてきたオートパイロットや様々な船舶の操縦運動の検討がパソコンによる数値シミュレーション計算で可能になった。時間とコストのかかる操縦運動シミュレーション計算が、パーソナルコンピューターを用いて短時間で手軽に行えるようになったのである。

このような背景のもとに、1983 年より、日本造船研究協会を中心に、船舶の高度自動運行システムの研究開発がプロジェクト化された²⁵⁾。このプロジェクトは、最適自動航行システム(衝突予防システム)と出入港自動化システム(自動離着岸システム)の2つのテーマで1988 年まで産官学共同で行われた。これらの研究については、現状の操船オペレーションをベースに、与えられたミッションやシナリオを適切にフィードバックすることで所与の運動を自動化するものであった。

一方、操船というものは、経験や訓練による操船の知識と体験を利用し、時々刻々のフィードバックはもとより運動を予測し、次の時点の運動状態がどうであるべきかを逐次予測しながら行うべきものである。これまで、これらは経験と訓練の積み重ねによる熟練の技とされてきた。著者は、熟練を有する経験者の経験や定例の作業手順を否定するものではないが、合理的かつ効率的な技術伝承を考える場合、あるいは技術革新により全く新しい船

種が登場した場合に、客観的に操船手順を創出し評価できる手法が必要であると考える。

本研究の目的と概要

以上の観点から操船問題を客観的にとらえ、数学的に何らかの操船手順が示されれば、熟練を要することなく現有船舶や技術革新により全く新しい船種が創出された場合にもそれらの操船方法を数値計算によって見だすことが可能となる。さらには、数学的に取り扱うことが可能になれば、何らかの最適化を考えることが可能である。本研究は、そのような視点に立ち、最適制御理論による操船の最適化と自動化を具現化することを目的とする。

そのため、本研究では、

1. 操船問題を操縦運動数学モデルの2点境界値問題の最適化の問題に置き換える。
2. 2点境界値問題として問題を解くことができる操縦運動数学モデルを導出する。
3. 数値シミュレーションによって幅寄せ操船と着桟操船について最短時間で行う操船方法を導出する。
4. 実船試験により、得られた操船方法を実現できることを実証する。
5. 制御の目標値としての最適制御解をフィードバックするために線型最適レギュレータと組み合わせることで制御精度を向上させる。
6. 線型最適レギュレータでは、取り扱いが困難な多変数の非線型多入力多出力系に対して疑似逆行列を用いることにより、系を1入力1出力系の集合に置き換え古典制御理論によって最適制御解をフィードバックする手法を導出する。

などの項目について検討した。

そこで、第2章では、数学的に操船手法を見いだすため、操船手順を操縦運動方程式の2点境界値問題に置き換え、時間を評価関数とする非線型最適制御問題として定式化し、数値解法を示した。そして、得られた非線型最適制御手法を使用して、幅寄せ操船と着桟操船について、最適解を用いた自動操船法を示した。

第3章では、より実用的な応用が可能であるように定常外乱に対する問題の定式化手法や実船へ適用するための問題点と対策を明らかにした。さらに、小型練習船による実海域における実験を実施し、非線型最適制御手法の実用性を示した。

第4章では、制御システムに対し最適な制御目標を与える方法(OCS)を示した。そして、定点保持と移動を繰り返す制御に適用し、従来行われてきたステップ関数による目標値の与え方と比較してその利点を明らかにした。

第5章では、疑似逆行列を使って多入力多出力系を1入力1出力系に置き換える手法を示した。本手法を用いることで、多入力多出力系に対しても従来型の古典制御によるフィー

ドバック制御により、操縦運動を制御できることを示した。また、最短時間操船問題を非線型計画法により解くことができることを示した。

第2章 非線型最適制御理論による操船の最適化と自動化^{9) 17)}

2.1 緒言

線型最適制御理論を船舶の操縦運動の制御に応用する研究は、早くから行われている¹⁾
²⁾、³⁾。特に線型最適レギュレータやカルマンフィルタなどは、美しく完備された理論体系で
 あり、解析的に最適解を得ることができる。さらに、これらの理論による制御則は、状態
 フィードバックと呼ばれる一種の比例制御の形で与えられるので、複雑なハードウェアを
 必要とすることなく、容易に最適制御系を実現できる。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次形式で与えられるシステムに限定される。工学的には、
 運動方程式が線型近似できる範囲での制御、すなわち定点保持や定針路保持などの平衡状
 態近傍における微小運動の定値制御⁴⁾や、オートパイロットによる自動変針などの追値制御
 に適用されている⁵⁾。

ところで近年、計算機の処理能力や記憶能力の飛躍的な進歩に伴い、従来の定値、追値制
 御に関する研究の他に、操船のプロセス全体を制御するための研究がなされるようになった⁶⁾。
 例えば、出入港、離着岸や避航などの操船についてのエキスパートシステム(AI)⁷⁾や
 ニューラルネットワーク(NN)⁸⁾を応用する研究等である。このような着岸問題など通常航行
 状態から回頭して停船するなど大きな操縦運動を伴う操船法を理論的に取り扱おうとす
 ると、操縦運動を平衡状態からの微小変動としてとらえ、線型最適制御理論を適用すること
 は困難である。一方、AIやNNでは、人間の経験やルールあるいは試行錯誤によって操船
 方法を決めるので、運動方程式の形式に制限は無く、幅広い操船問題に適用できる。ところ
 が、この方法では制御の最適性あるいは妥当性に対する評価が、人間の主観によるところが
 多く、定量的ではない。実際の操船においては、安全性や実用性の面で考えると必ずしも最
 適な操船である必要はないが、客観的に制御結果を評価し、制御性能の向上を図るためには、
 適切な評価基準のもとで、数学的な最適解が示されることは重要である。さらに、数学的な
 最適解を全く新しい操船方法のガイダンスとして利用したり、最適解が人間の経験から得
 られる最適操縦を越えることも期待できる。

本章では、大運動を想定した操船に対する非線型操縦運動モデルを仮定し、これに対する
 非線型最適制御問題を解き、ある操船のプロセス全体を最適化する手法について述べる。こ
 のうち次節以降では、操船に対する非線型最適制御問題の定式化および数値解法の概要に
 ついて示す。そしてCPP、バウ・スターンスラスト付き小型練習船を対象に、この船の変針
 操船法を例題として非線型解法と線型近似解法の差を示し、精密なモデルの重要性を示す。
 ここで得られた解法による幅寄せ操船と着岸操船の非線型最適解を基に、これらの操船を
 自動化する方法について、数値シミュレーションを用いて検討することを目的とする。

2.2 線型最適解

本節の最初の目的は、後半のより精密な非線型モデルから得られる非線型最適解を、従来行われてきた線型操縦運動モデルを用いた最適制御手法と比較することである。このためまず従来の線型理論による代表的な2つの考え方を変針操船を例に示す。

2.2.1 線型最短時間制御による変針

線型の操縦運動モデルとして野本のモデルとして知られている次式で示される1次系近似モデル²²⁾を用いる。

$$T\ddot{\psi} + \dot{\psi} = K\delta \quad (2-1)$$

ここで、 T 、 K は操縦性指数、 ψ は方位角、 δ は実舵角を示す。ただし、操舵機の応答遅れを考慮すると解析解を得ることが困難になるため、ここでは無視するものとする。評価関数としては次式を考える。

$$I = \int_0^t dt \quad (2-2)$$

この最適化問題は、線型最短時間問題と呼ばれる。

舵角の大きさには制限があるため、良く知られているように、最短時間での変針問題を考えると、舵角は常に制限値をとることになる。すなわち、途中で舵角を上限から下限、もしくは下限から上限に一度だけ切り換える制御方法が最短時間問題の解となる。このように、制御入力大きさに制限のある最短時間制御問題で入力を上限、下限に切り換えて制御する方法を一般に **Bang-Bang** 制御と呼ぶ。

さて、舵角の制限値を δ_0 とし、変針終了時刻を t_f 、その時の方位角および回頭角速度を零として、時刻 $t = t_f$ から $\delta = \delta_0$ を仮定して(2-1)式を逆時間で解くと次式を得る。

$$\ddot{\psi} = K\delta_0 \left(1 - e^{-\frac{t-t_f}{T}}\right) \quad (2-3)$$

$$\psi = K\delta_0 \left\{ (t - t_f) - T \left(1 - e^{-\frac{t-t_f}{T}}\right) \right\} \quad (2-4)$$

(2-3)式、(2-4)式から $t - t_f$ を消去すると次式を得る。

$$\psi = -K\delta_0 T \left\{ \log \left(1 - \frac{\dot{\psi}}{K\delta_0}\right) + \frac{\dot{\psi}}{K\delta_0} \right\} \quad (\dot{\psi} < 0) \quad (2-5)$$

同様に、 $\delta = -\delta_0$ を仮定して解くと次式を得る。

$$\psi = K\delta_0 T \left\{ \log \left(1 + \frac{\dot{\psi}}{K\delta_0}\right) - \frac{\dot{\psi}}{K\delta_0} \right\} \quad (\dot{\psi} > 0) \quad (2-6)$$

(2-5)式、(2-6)式は、最適解の最後の部分を与える。すなわち、最適解は両式によって示されるスイッチング曲線上で制御入力符号を切り換え、その後はスイッチング曲線上を通過して終端値に至る。Fig.2-1 に、後に述べる供試船「汐路丸」のパラメータ値を用いたときの本方法による最適解の描く軌跡を横軸に方位角、縦軸に回頭角速度を取る位相面上で示す。

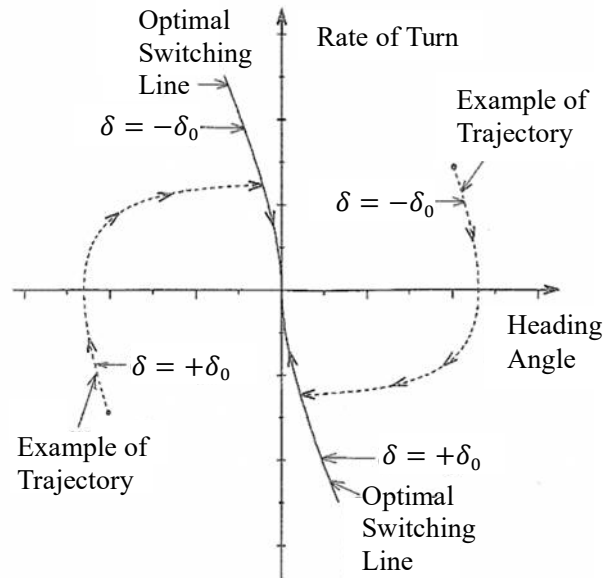


Fig.2-1 Trajectory of optimal solution by Bang-bang control in phase plane

2.2.2 線型最適レギュレータによる変針

前項と同様に、線型運動モデルとして1次系近似モデルを用い、操舵機特性を1次遅れで表すと、操縦運動のシステム方程式として次式を得る。

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}u \quad (2-7)$$

各状態ベクトルと係数マトリクスは、次のように与えられる。

$$\mathbf{X} = \begin{pmatrix} \psi \\ \dot{\psi} \\ \delta \end{pmatrix}, \quad \mathbf{A} = \begin{pmatrix} -\frac{1}{T} & 0 & \frac{K}{T} \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -\frac{1}{T_E} \end{pmatrix}, \quad \mathbf{B}u = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_E} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \delta^* \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{\delta^*}{T_E} \end{pmatrix}$$

ここで、 T_E は操舵機の時定数、 δ^* は時々刻々の操舵指令舵角を表す。ある方位角から、方位角零度に変針することを考え、このとき(2-7)式に対して次式に示す評価関数を与える。

$$I = \int_0^{\infty} (\mathbf{X}^T \mathbf{R}_1 \mathbf{X} + u^T \mathbf{R}_2 u) dt \quad (2-8)$$

ここで、 T は転置行列を示す。 $\mathbf{R}_1, \mathbf{R}_2$ は正定値対称行列であり、各々制御偏差と入力大きさに対する重みを表す。 I を最小にする最適入力 $\mathbf{u}_0$ は、(2-9)式で与えられる Riccati 方程式の解 $\mathbf{P}$ を使って(2-10)式に示す状態フィードバックの形で与えられる⁴⁾。

$$\mathbf{P}\mathbf{A} + \mathbf{A}^T \mathbf{P} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{R}_1 = 0 \quad (2-9)$$

$$\mathbf{u}_0 = -\mathbf{R}_2^{-1} \mathbf{B} \mathbf{P} \mathbf{X} \quad (2-10)$$

ここで、

最適レギュレータでは $\mathbf{R}_1$ と $\mathbf{R}_2$ が設計パラメータとなっている。すなわち、 $\mathbf{R}_1$ を $\mathbf{R}_2$ に比べて大きくすれば、応答は早くなるが大きな入力が必要とする。このとき $\mathbf{R}_1$ における、 δ に対応する対角項の重みは零としている。この方法によって意味のある最適解を得るには、舵角に制限があるので、制限値を越えないよう $\mathbf{R}_1$ と $\mathbf{R}_2$ の大きさを決めなければならない。

2.3 非線型最適解

本節では、本章の主題である大運動を含む非線型操縦運動モデルを用いた最適制御問題を定式化し、その数値解法について述べる。

2.3.1 非線型最適制御問題

操船プロセスとは、現在の状態から目標となる他の状態へ、ある目的をも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。ここで、制御の目的を定量化したものを評価関数と呼ぶ。したがって、操船プロセス全体を制御する問題は、初期値と終端値が与えられ、ある評価関数が最小または最大となる制御入力を求める問題に帰着される。制御入力には大きさの制約があるので、この問題は、数学的に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定式化される。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、この時の制御入力を最適制御入力と呼ぶ。この最適制御入力を求める問題の定式化について、以下にその要約を示す。

まず、定式化の条件として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。
- 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、見かけ上は、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。

- $\mathbf{x}(t)$: 状態量(n次元列ベクトル)
 $\mathbf{u}(t)$: 制御入力(n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 $=\tau t$
 λ, ρ, μ : ラグランジュの未定乗数

この時、非線型最適化問題の数学的定式化を以下に示す。

運動方程式(2-11)式で与えられる系に対して、(2-12)式から(2-14)式に示す条件を満たす解のうち、(2-15)式に示す評価関数の値を最小にする解を見出す。

運動方程式

$$\dot{\mathbf{x}} - \boldsymbol{\phi}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, \tau, t) = 0 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (2-11)$$

入力の拘束条件

$$\mathbf{S}(\mathbf{u}, \tau, t) = 0 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (2-12)$$

初期条件

$$\mathbf{x}(0) = \text{Specified} \quad (2-13)$$

終端条件

$$[\boldsymbol{\psi}(\mathbf{x}, \tau)]_1 = [[x_i(1)]_\tau - (x_i)_f]_{i=1 \dots q} = 0 \quad (1 \leq q \leq n) \quad (2-14)$$

(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

$$I = \int_0^1 \mathbf{f}(\mathbf{x}, \mathbf{u}, t) dt \quad (2-15)$$

このような2点境界値問題の解は、(2-16)式から(2-18)式に示す方程式を解くことによって与えられることが、参考文献¹⁰⁾によって示されている。

制御入力の最適条件

$$\mathbf{f}_u^T - \boldsymbol{\phi}_u^T \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{S}_u^T \boldsymbol{\rho} = 0 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (2-16)$$

未定乗数の微分方程式

$$\dot{\boldsymbol{\lambda}} - \mathbf{f}_x^T + \boldsymbol{\phi}_x^T \boldsymbol{\lambda} = 0 \quad (0 \leq t \leq 1) \quad (2-17)$$

終端時間の最適条件

$$\int_0^1 (\mathbf{f}_\tau^T - \boldsymbol{\phi}_\tau^T \boldsymbol{\lambda}) dt + (\boldsymbol{\phi}_\tau^T \boldsymbol{\mu})_1 = 0 \quad (2-18)$$

2.3.2 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 Algorithm¹¹⁾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。

$$P = \int_0^1 N(\dot{\mathbf{x}} - \boldsymbol{\phi}) dt + \int_0^1 N(\mathbf{S}) dt + N(\boldsymbol{\psi})_1 \quad (2-19)$$

$$Q = \int_0^1 N(\dot{\boldsymbol{\lambda}} - \mathbf{f}_x^T + \boldsymbol{\phi}_x^T \boldsymbol{\lambda}) dt + \int_0^1 N(\mathbf{f}_u^T - \boldsymbol{\phi}_u^T \boldsymbol{\lambda} + \mathbf{S}_u^T \boldsymbol{\rho}) dt \\ + N \left[\int_0^1 (\mathbf{f}_\tau^T - \boldsymbol{\phi}_\tau^T \boldsymbol{\lambda}) dt + (\boldsymbol{\phi}_\tau^T \boldsymbol{\mu})_1 \right] + N(\boldsymbol{\lambda} + \boldsymbol{\psi}_x^T \boldsymbol{\mu})_1 \quad (2-20)$$

ここで、関数 $N(\mathbf{x})$ は、ベクトル $\mathbf{x}$ のノルム、 $\mathbf{x}^T \mathbf{x}$ を表す。そして、 P および Q が零になった時点で、(2-11)式、(2-12)式、(2-14)式と(2-16)式から(2-18)式の条件が満たされ、最適解が得られる。Wu らの方法は、計算の手順を2のステップに分け、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 の値を計算し、 P が誤差範囲を越えている場合はもう1度 P を零にする計算を開始する。この手順を繰り返し、 P および Q が共に誤差範囲以下であれば計算を終了する。非線型2点境界値問題の数値解法には、Particular Solution 法¹²⁾を用いた。

2.4 操縦運動モデル

数値解を求めるうえで、操縦運動モデルが必要になる。ここでは、一般に用いられている MMG モデルをベースとする操縦運動モデルを数値解法に適するように連続で簡易化したモデルを用いた。以下にそのモデルについて述べる。

2.4.1 非線型簡易操縦運動モデル

次に本節では、2.3 節において示された定式化における運動方程式 $\boldsymbol{\phi}$ として、どのようなものを考えるかを示す。ただし、本モデルは2.1 節で述べた CPP、バウ・スターンスラスタ付き小型練習船を対象としている。

さて、筆者らは、これまで MMG モデルをベースとする操縦運動モデルを示してきた¹³⁾、¹⁴⁾、¹⁵⁾。以後このモデルを詳細運動モデルと呼ぶ。前述した最適制御問題の定式化からわかるように、定式化の段階で運動方程式の偏微分操作が必要になる。偏微分操作をすべて数値的に行なうことは、計算量および精度の面で実用的ではない。また、詳細運動モデルでは運動の局面に応じて運動モデルの切り換えを行っているが、このことは切り換え点での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、最適制御問題の定式化で用いる操

縦運動モデルとして前進運動に限定することで運動モデルの切り換えを無くし、数式表現を簡略化することで解析的に偏微分可能とした操縦運動モデル⁹⁾を用いる。以後このモデルを簡易運動モデルと呼ぶ。以下に簡易運動モデルを示す。

まず、運動方程式を

$$(m + m_x)\dot{u} - mvr = X_H + X_R + X_P \quad (2-21)$$

$$(m + m_y)\dot{v} + mur = Y_H + Y_R + Y_T \quad (2-22)$$

$$(I_{ZZ} + J_{ZZ})\dot{r} = N_H + N_R + N_T \quad (2-23)$$

とするとき船体流体力は、

$$X_H = -C_t u|u| + X_v Vv + X_{vr} vr + X_r Vr + X_{vv} v^2 + X_{rr} r^2 \quad (2-24)$$

$$Y_H = Y_v Vv + Y_{vv} v|v| + Y_r Vr + Y_{rr} r|r| + Y_{vr} v|r| \quad (2-25)$$

$$N_H = N_v Vv + N_{vv} v|v| + N_r Vr + N_{rr} r|r| + N_{vr} v|r| \quad (2-26)$$

であり、プロペラ推力(CPP)および

$$X_P = (1-t)\rho n^2 D_P^4 \{C_0 + C_1 \theta_P + C_2 J_P + C_3 \theta_P J_P + C_4 \theta_P^2 + C_5 J_P^2 + C_6 \theta_P^2 J_P + C_7 \theta_P J_P^2 + C_8 \theta_P^3 + C_9 J_P^3\} \quad (2-27)$$

$$J_P = \frac{(1-w_P)u}{nD_P} \quad (2-28)$$

プロペラ推力(FPP)は、

$$X_P = \frac{1}{8}(1-t)\rho \pi D_P^2 \{(1-w_P)^2 u^2 + (0.7\pi n D_P)^2\} \sum_{k=0}^{20} \{A(k) \cos(k\alpha) + B(k) \sin(k\alpha)\} \quad (2-29)$$

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{(1-w_P)u}{0.7\pi n D_P} \quad (2-30)$$

と書かれる。

舵力は、

$$X_R = -(1-t_R)F_N \sin \delta \quad (2-31)$$

$$Y_R = -(1+a_H)F_N \cos \delta \quad (2-32)$$

$$N_R = -(x_R + a_H x_H)F_N \cos \delta \quad (2-33)$$

舵直圧力

$$F_N = \frac{1}{2}\rho A_R f_\alpha (U_R^2 \sin \delta + \gamma_R (v + l_R r) U_R \cos \delta) \quad (2-34)$$

舵有効流入速度(CPP)

$$U_R = (\varepsilon - k_x)(1-w_P)u + k_x(0.7\pi n D_P) \tan \theta_P \quad (2-35)$$

舵有効流入速度(FPP)

$$U_R = (\varepsilon - k_x)(1-w_P)u + k_x n P \quad (2-36)$$

プロペラ増速率

$$k_x = k_{x0} \left(\frac{1}{1 + e^{-w\theta_p}} \right) \quad (2-37)$$

ここで、

- m, m_x, m_y : 質量、付加質量
 I_{zz}, J_{zz} : 慣性モーメント、付加慣性モーメント
 V, u, v, r : 船速とその前後、左右成分、回頭角速度
 Y_T, N_T : サイドスラストによる横力、回頭モーメント
 X_v , など : 操縦流体力微係数
 t, w_p : スラスト減少率、有効伴流率
 n, D_p, P : プロペラ回転数、直径、ピッチ
 ρ : 流体の密度
 θ_p : CPP 翼角
 $A(k), B(k)$: 実験係数
 $C_1 \sim C_9$: 実験係数
 A_R, f_α : 舵投影面積、直圧力係数
 t_R, a_H, x_H : 船体と舵の干渉係数
 δ, x_R : 舵角、舵位置の x 座標
 γ_R, l_R : 整流係数、実験係数
 w : 重み係数

である。なお、(2-37)式の右辺は、シグモイド関数と呼ばれ、ニューラルネットワークなどで利用されている重み関数である。この関数は、重み係数 w を十分大きくとることで、入力の正負に対応して、ほぼ1か零の値をとる。このことを利用して、CPP 翼角 θ_p が正の時にほぼ $k_x = k_{x0}$, θ_p が負の時にほぼ $k_x = 0$ としている。したがって、プロペラ逆転時にはプロペラ後流が舵に届かず、舵効きが悪くなることを表現できる。

2.4.2 簡易運動モデルの精度検証

Table 2-1 Principal particulars of SHIOJI MARU

Dimensions		Propulsion	
Length p.p.	46.0 m	Shaft Rev.	300.0 rpm
Breadth mld.	10.0 m	Engine MCR	1,400 ps
Depth mld.	3.8 m	Propeller	CPP
Draft mld	3.0 m	Thruster	
Gross Tonnage	425 ton	Bow	150kw(2.4ton)
Displacement	661 ton	Stern	210kw(1.8ton)

非線型最適制御問題の定式化で示した簡易運動モデルについて、操縦運動模擬精度の検証を行った。供試船は、東京商船大学練習船「汐路丸」である。同船の主要目を Table2-1 に示す。

Fig.2- 2 に船速 12 kt、舵角 20 度の旋回について、詳細と簡易の両運動モデルによるシミュレーション計算結果の比較を示す。図の横軸は、旋回開始からの経過時間を示し、縦軸は、旋回開始からの回頭角、回頭角速度、および前進速度を示す。実線が詳細運動モデルによる計算結果であり、点線が簡易運動モデルによる計算結果である。両モデルの計算結果は良く一致しており、簡易運動モデルを用いた定式化が十分な精度を有することを確認できる。

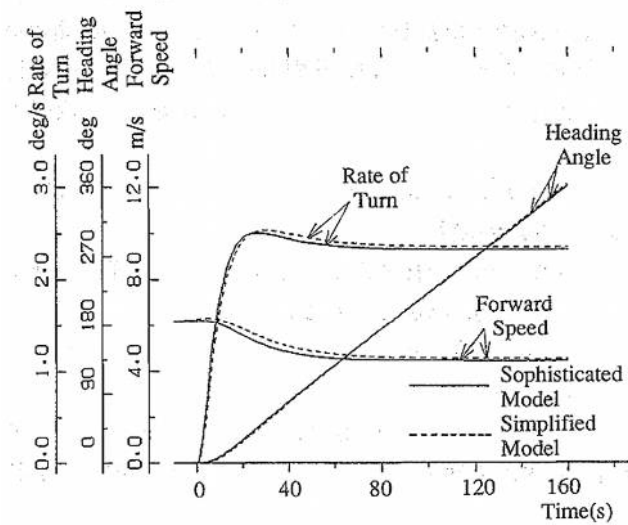


Fig.2-2 Comparison of simulated motions between sophisticated and simplified mathematical model

2.4.3 1次系近似モデル

2.2 節で述べたように、非線型の簡易運動モデルによる最適解と比較するための線型モデルとしては、野本の 1 次系近似モデル(2-1)式を用いている。そのため、簡易運動モデルの船速 12 kt、舵角 20 度における旋回運動のシミュレーション結果を元データとして、1 次系近似モデルの諸係数を同定した。その結果を以下に示す。

$$K = 0.126(1/s), \quad T = 5.95(s), \quad T_E = 3.28(s)$$

2.5 変針問題における非線型最適解と線型解との比較

ここでは、変針操船について 2.2 節に示した線型最短時間問題および線型最適レギュレータ解と 2.3 節の方法によって得られた非線型最適制御問題の解を比較する。計算条件は、方位角 ψ_0 の定常直進状態から変針し、終端条件として方位角、回頭角速度および実舵角を零

とする。他の状態量については終端量自由とし、使用する舵角の最大値は 20 度とする。

まず、最短時間問題について、非線型最適制御と線型最適制御の評価関数を次式で示す。

$$I = \int_0^1 \tau dt \quad (2-38)$$

次に線型最適レギュレータ問題として変針操船における評価関数(2-8)式の重み R_1 と R_2 は、応答が最も早くなるように、各々の変針角において舵角の最大値が 20 度になるよう設定した。

ψ_0 を -10 度から -90 度まで 10 度刻みで変えて位相面上での運動軌跡の比較を Fig.2-3 に示す。横軸を方位角、縦軸を回頭角速度とした。実線が非線型最短時間問題の解、点線が線型最短時間制御および 1 点鎖線が線型最適レギュレータの解を各々表す。

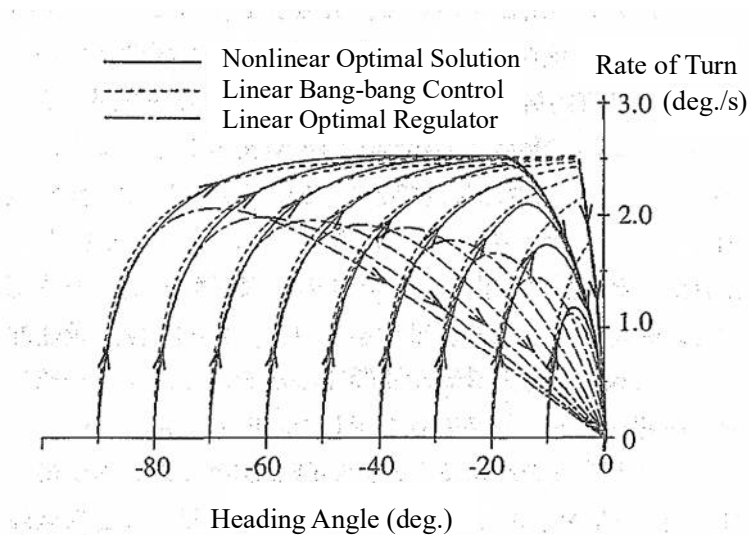


Fig.2-3 Comparison of course changing maneuver between linear and nonlinear solutions

2.5.1 線型最短時間制御と非線型最短時間制御の比較

線型最短時間制御と非線型解を比べると、運動の立ち上がり付近での挙動はよく一致しているが、最適切り換え線付近での挙動が両者で大きく異なる。特に変針角の小さな所での差異が大きい。これは、操縦運動モデルの差の他に線型最短時間制御では操舵機の動特性を考慮していないためでもある。運動の初期とは異なり、回頭運動が発達している転舵時には、操舵時期が少しずれることによって後の運動に大きな影響を与える。そして、その影響は、変針角が小さいほど大きい。したがって、運動が小さいほど操舵機の動特性を考慮したモデル化が必要であることがわかる。Fig.2-4 に 10 度と 90 度変針時の舵角の挙動を変針開始からの時系列で示した。Fig.2-4 の上側が非線型最短時間問題の解、下側が線型最短時間問題

の解を示す。非線型最短時間問題の解には指令舵角を点線、実舵角を実線で示した。非線型最短時間問題の解では、実舵角の応答遅れを見込んで指令舵角を求めているので、指令舵角の値が2回切り換わっている。また、10度の変針時には、実舵角が制限値に達していない。このような解を解析的に求めることは困難であり、変針操船のような単純な問題であっても線型解から得られない非線型解法の重用性が認められる。

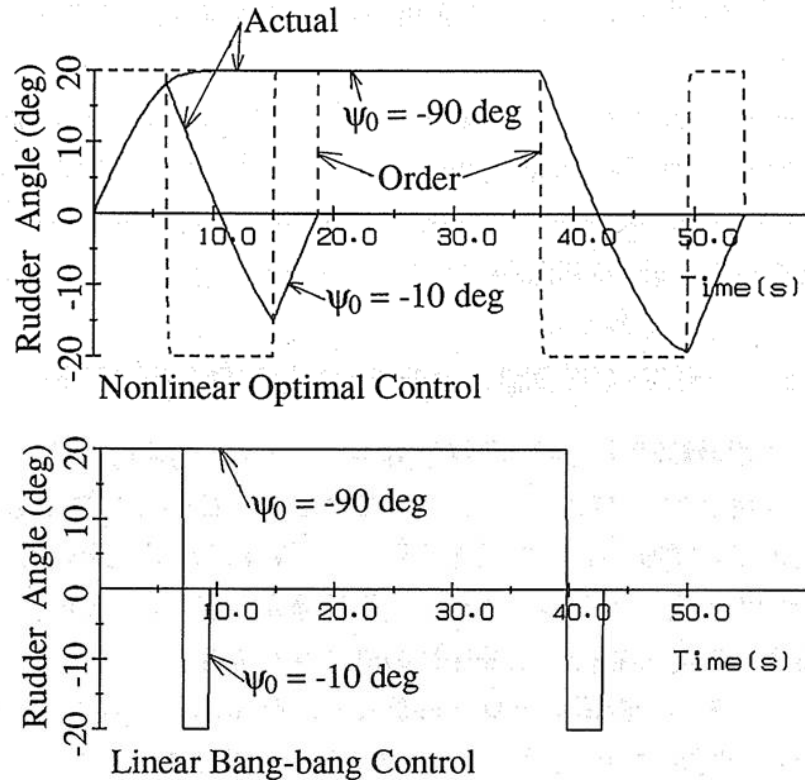


Fig.2-4 Comparison of rudder action between linear and nonlinear solutions

2.5.2 線型最適レギュレータと非線型最適制御の比較

ここでは線型最適レギュレータ問題の解と非線型解法による最短時間問題および最適レギュレータ問題の解を比較する。線型最適レギュレータと非線型最短時間制御の比較について考える。Fig.2-3 から、線型最適レギュレータの解は、終端値へ収束する段階で、他の最短時間問題の解と比較して位相面での運動軌跡の傾斜が緩やかであることがわかる。これは線型最適レギュレータの解の速応性が低いことを示している。線型最適レギュレータの解は、(2-10)式で示される状態フィードバックで与えられフィードバックゲインが大きいほど速応性は高い。しかし、ゲインを大きくすることは、大きな偏差に対し過大な制御入力が必要とすることになる。線型最適レギュレータでは、制御入力の大きさに拘束条件を課すこ

とができないので、意味のある最適解を得るためには、制御入力が増限値を越えないようゲインを調整しなければならない。Fig. 2-3 に示すように、変針角が小さい領域では、ゲインを比較的大きくできるので、応答を速くすることが可能であり解は非線型最短時間問題の解に近づく。しかし、変針角が大きくなるに従ってゲインを小さくしなければならず、応答が遅くなる。すなわち、線型最適レギュレータで偏差が大きいシステムの制御をする場合には、速応性を期待できないことがわかる。

次に、非線型解法において、評価関数を最短時間ではなく(2-8)式で与えられる線型最適レギュレータのものとした場合について考える。非線型解法では、入力に拘束条件を課することができるので制御入力が増限値を越えることはなく、 R_1 , R_2 の大きさを自由に設定できる。Fig. 2-5 に、90 度の変針運動について、評価関数として最適レギュレータの式を用い、 R_1/R_2 の値を種々変化させたときの非線型解の変化を位相面上の軌跡として示す。横軸を方位角、縦軸を回頭角速度とし、破線で非線型最短時間問題の解を示し、1 点鎖線で線型最適レギュレータの解を示した。Fig. 2-5 から、 R_1 を大きくして速応性を高めると、最短時間制御に近い解が得られ、逆に R_1 を小さくして制御入力を低く抑えようと線型最適レギュレータに近い解が得られることがわかる。

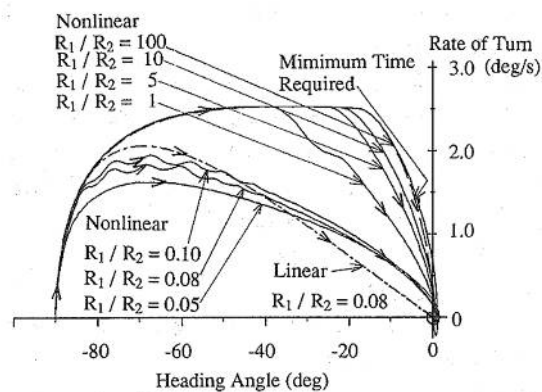


Fig.2-5 Course changing maneuver by nonlinear optimal regulator

2.6 自動操船

前節までに示した非線型最適制御問題の解法の最大の特徴は、初期値と終端値を与え評価関数を指定すると、評価関数の値を最小にする制御入力が見られる点にある。ここでは、最適解に沿って操船を自動的に行なう方法について示す。このような問題へのアプローチとしては、モデル規範型適応制御理論等¹⁶⁾の応用が考えられるが、ここでは次のような標準的な制御方法を採用した。なお、非線型最適制御問題は、非線型な簡易運動モデルを用いて解くが、制御を適用する場合には詳細運動モデルを用いた。このとき、詳細運動モデルは、

十分な精度で実船の操縦運動を模擬できることが確認されている¹³⁾。

2.6.1 制御則

制御方法として、最適制御入力をフィードフォワード情報とし、現在の状態量と最適解の状態量の差を制御入力にフィードバックすることを考える。最適制御入力ベクトルを $\mathbf{u}_0$ 、最適解の状態量ベクトルを $\mathbf{X}_0$ とし t を制御開始からの経過時間とする。現在の状態量を $\mathbf{X}$ とし、 $\mathbf{K}_p$ を m 行 n 列の比例ゲインマトリクスとすると、制御入力は次式で与えられる。

$$\mathbf{u}(t) = \mathbf{u}_0(t) + \mathbf{K}_p(\mathbf{X}_0(t) - \mathbf{X}(t)) \quad (2-39)$$

2.6.2 幅寄せ操船

最短時間の幅寄せ操船について考える。終端条件を次式で与え、その他の状態量の終端値は自由とする。

$$\psi(t_f) = \dot{\psi}(t_f) = \delta(t_f) = 0 \quad (2-40)$$

$$Y(t_f) = Y_0 \quad (2-41)$$

ここで、 Y_0 は、横への移動距離である。制御則として、方位角と回頭角速度をフィードバックすると、舵角指令 δ^* は、次式で与えられる。

$$\delta^*(t) = \delta_0(t) + K_1(\psi_0(t) - \psi(t)) + K_2(\dot{\psi}_0(t) - \dot{\psi}(t)) \quad (2-42)$$

ここで、添え字 o は、最適解を示す。1例として、船速12ktで200m横へ移動する幅寄せ操船に対する制御結果をFig. 2-6に示す。

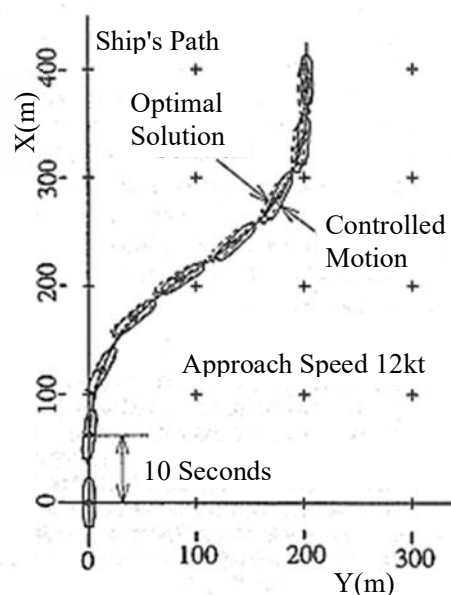


Fig.2-6 Results of optimal automatic deviation maneuver

供試船は「汐路丸」とする。最適解を点線で示し、詳細モデルによるシミュレーション結果を実線で示した。Fig.2-6 から、横方向の移動距離をフィードバックすることなくほぼ目標とする 200 m 横へ船を移動させることができていことがわかる。これは、前進運動に対する簡易運動モデルの精度が高く、最適制御入力を精度良く求めることができたためである。すなわち、簡易運動モデルを精度良く求めることができれば、簡易運動モデルがオペレーターの役目を果たすので、制御に必要なフィードバック情報を少なくすることができる。

2.6.3 着桟操船

主機を含めた操船を自動化する問題の 1 例として、船をある定点で停船させる問題を考える。この問題では、全ての終端条件が与えられている。状態量の終端値を次式に示す。

$$\dot{\psi}(t_f) = u(t_f) = v(t_f) = \delta(t_f) = \theta_p(t_f) = 0 \quad (2-43)$$

$$X(t_f) = X_0, Y(t_f) = Y_0, \psi(t_f) = \psi_0 \quad (2-44)$$

ここで X_0 , Y_0 は、前方および横への移動距離、 ψ_0 は、方位角の終端値である。また、供試船を「汐路丸」とするので、主機の制御は CPP の翼角制御とする。制御則として、方位角と回頭角速度および前進速度成分をフィードバックすると、舵角指令 δ^* は、(2-42) 式で与えられ、CPP の翼角指令 θ_p^* は、次式で与えられる。

$$\theta_p^*(t) = \theta_{p0}(t) + K_3(u_0(t) - u(t)) \quad (2-45)$$

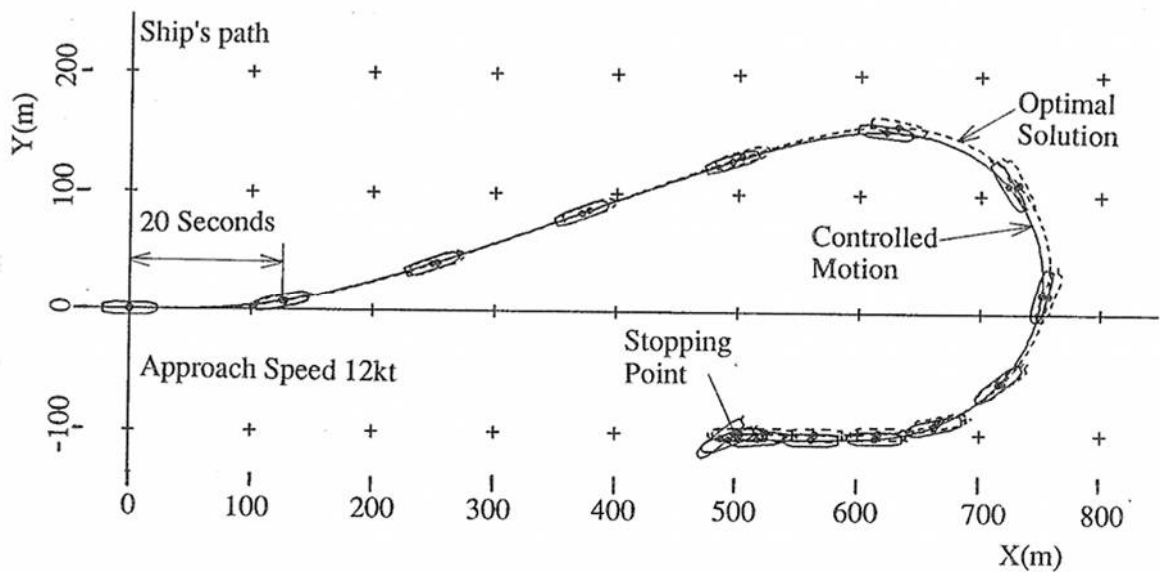


Fig.2-7 Results of optimal automatic berthing maneuver

ここで、添え字 o は、最適解を示す。1 例として 12 kt で直進中の船を 500 m 前方で 100 m コースから右側の地点に 180 度方位角を反転させて最短時間で停船させる問題を考える。ただし、船首および船尾のスラストは使用しないものとする。最適解と制御結果を Fig. 2-7 に示す。簡易運動モデルが前進運動をベースに調整されているため、および低速で舵が効かないため、停船直前では制御精度が低下している。しかし、ほぼ目標とする地点で船を反転させて止めることができている。この場合も、位置に対する、フィードバック情報を使用しておらず、簡易運動モデルがオブザーバーの役目を果たしていることがわかる。

本制御方法において外乱がある場合には、簡易モデルのオブザーバーとしての効果を期待できない。したがって、何等かの方法で位置等をフィードバックする必要がある。この点については、第 3 章で詳述する。

2.7 結言

本章では、数学的に最適な操船方法を見いだすため、操船に対する非線型最適制御問題を定式化し、数値解法の概要を示した。そして、得られた非線型最適制御手法を使用して、非線型解法の利点を明確にするため、変針操船法を例題として非線型解法と線型近似解法の差を示した。さらに、ここで示した非線型最適制御手法を実用化するための予備検討として、幅寄せ操船と着桟操船について、最適解を用いた自動操船法を示した。本章で得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) 1 次系近似操縦運動モデルを用いれば、線型最短時間制御の解析解が得られるが、操舵機の応答を考慮できないため、転舵時期が遅れる。転舵時期の遅れの影響は、変針角が小さいほど大きい。
- (2) 非線型最適解によると、操舵機の特性を考慮にいれた最短時間変針操船は、指令値の符号を 2 回切り換える Bang-Bang 制御となる。
- (3) 線型最適レギュレータの解である状態フィードバック制御を使って、大きな変針を行う場合、舵角の制限を越えないようフィードバックゲインを低くしなければならず、速応性が著しく低下する。
- (4) 非線型最適制御手法の評価関数に時間ではなく、線型最適レギュレータの評価関数を用いれば、重み係数の選び方によって、最短時間制御あるいは線型最適レギュレータに近い制御のどちらの制御方法も実現できる。
- (5) 幅寄せ操船や着桟操船など予め操船方法がわかりにくい操船について、非線型最適制御手法を用いれば、数学的に最適な操船方法を得ることができる。ここで最適とは、評価関数の値を最小にすることを意味する。

- (6) 最適解をフィードフォワード情報とし、状態量をフィードバックする制御方法では、最適解を求めるために用いた数学モデルが、オブザーバーの役目を果たすので、フィードバックする状態変数の数を減らすことができる。

第3章 外乱下における操船の最適化と自動化¹⁹⁾

3.1 緒言

第2章では、著者らが示した非線型な操縦運動方程式に対する最適制御入力を求める数値解法⁹⁾を用いて、大運動を想定した操船に対する非線型最適制御問題の定式化と数値解法を示した。この数値解法を用いて、操船プロセスの最適化問題を操縦運動に対する微分方程式の2点境界値問題としてとらえ、非線型解法を適用することにより、ある評価関数の値を最小もしくは最大にするという意味での最適な操船方法を数値的に求めた。また、従来の線型最適制御問題の解と非線型最適制御問題の解を比較しながら、非線型解法の特徴を明らかにした。さらに、得られた非線型最適制御問題の解をフィードフォワード情報として用い、現在の状態量と最適解との差をフィードバックすることにより、ある操船のプロセス全体を自動化する制御方法を提案した。数値シミュレーション計算による幅寄せ操船と着桟操船についての適用例によると、非線型解法では操縦運動モデルが高い運動模擬精度を有しているので、少ないフィードバック情報で十分に精度の高い制御が可能であることがわかった。本章では、第2章の方法の理論的拡張として、さらに定常風や潮流などの定常外乱下における問題の定式化を示し、外乱下での操船方法について最適解の計算例を示す。次に、以上の方法を実船の操縦運動制御に応用するための問題点とその対策について述べる。そして、小型練習船を使って実海域での自動操船実験を実施し、本手法による操船の自動化について実用上の問題点などの考察を行う。

3.2 外乱の定式化

本章では、第2章の理論的拡張として、外乱下における最適操船方法について数値シミュレーションにより検討する。一般に操船に影響を与える外乱としては、風、波浪あるいは潮流等の自然現象によるものとセンサーやアクチュエータの電氣的、機械的誤差および雑音等の原因によるものが考えられる。後者については、予測や数式化が困難であり、また通常十分に整備されていると考えられるのでここでは無視する。前者については、ある海域における平均的な大きさの外乱に、不規則変動成分としてランダムな位相差を持つ正弦波を重ね合わせる数式表現が一般的に用いられている。操船シミュレータ等においては、訓練の臨場感を高めるため、このような数式表現によって、不規則変動外乱をかなり正確に模擬している。非線型最適制御理論を適用するためには、対象となるシステムの微分方程式が連続であり、かつ状態量による偏微分が可能であれば良く、正弦波の重畳表現であればこの条件を満足するので、理論的には問題はない。しかし、

1)ここで得られる最適解は、制御の目標値あるいは操船のための参考資料として用いられる

ことを想定している。したがって、最適解を制御目標としてアクチュエータを操作するとき、アクチュエータの操作に対する運動応答がモデル化誤差によって異なる場合でも、フィードバック制御あるいは人の判断によりアクチュエータの操作量を補正することで運動応答を最適解に近づけることができるので、厳密なモデル化は必要ではない。

2)重畳する正弦波の数が多いと膨大な演算時間を要する。

などの数値計算上の問題を有する。

以上のような理由から本章では、外乱の定常成分のみについての定式化を考え、変動分については制御で補償することを考える。そして、一定の速度ベクトルを有する風と潮流を定常外乱として定式化し、両者が操船に与える影響について調べる。

3.2.1 定常風の影響

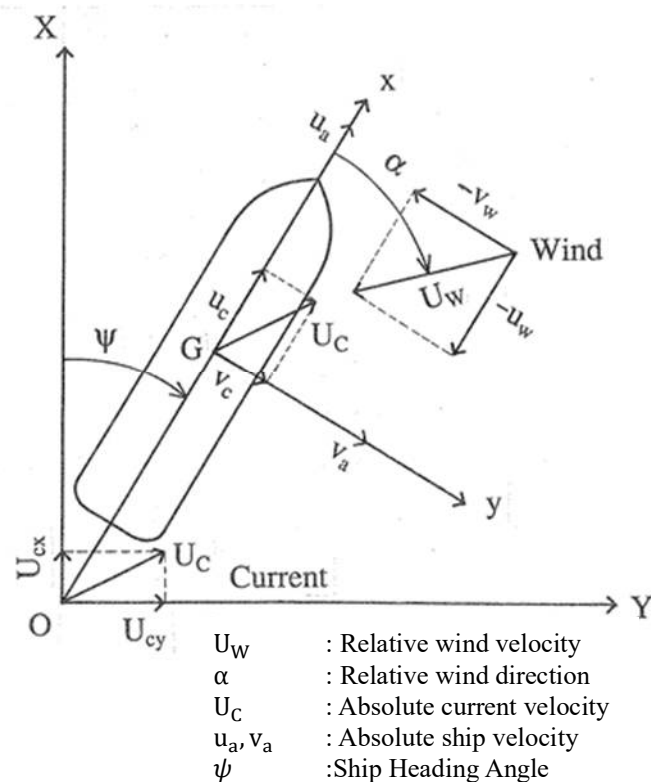


Fig.3-1 Co-ordinate systems

Fig.3-1 に、ここで用いる座標系と記号を示す。風圧力係数は、相対風向の関数であり、360度を基本周期とする周期関数である。このような関数は、一般にフーリエ級数展開によって関数近似される。このとき、高周波成分を多くとることによって風圧力係数の近似精度を高めることができるが、前述の理由から必ずしも高精度で風圧力係数を近似する必要はなく、ここでは基本周期成分だけで近似する。風圧力係数を C_x, C_Y, C_N とし、Fig.3-1の記号

を使って風圧力を表すと次式となる。

$$X_W = \frac{1}{2} \rho_a A_{of} U_W^2 C_X \cos \alpha \quad (3-1)$$

$$Y_W = \frac{1}{2} \rho_a A_{os} U_W^2 C_Y \sin \alpha \quad (3-2)$$

$$N_W = \frac{1}{2} \rho_a A_{os} L_{PP} U_W^2 C_N \sin \alpha \quad (3-3)$$

ここで、 ρ_a は空気の密度、 A_{of}, A_{os} は各々正面および側面風圧投影面積を表す。

また U_W は空間固定座標における相対風速、 α は相対風向を表す。これの船体固定座標系で測った相対風速と相対風向との関係は、次式で与えられる。

$$u_W = -U_W \cos \alpha \quad (3-4)$$

$$v_W = -U_W \sin \alpha \quad (3-5)$$

(3-4) 式と(3-5) 式を(3-1) 式から(3-3) 式に代入して、船体に働く風圧力は、相対風速の関数として次式で与えられる。

$$X_W = -\frac{1}{2} \rho_a A_{of} C_X U_W u_W \quad (3-6)$$

$$Y_W = -\frac{1}{2} \rho_a A_{os} C_Y U_W v_W \quad (3-7)$$

$$N_W = -\frac{1}{2} \rho_a A_{os} L_{PP} C_N U_W v_W \quad (3-8)$$

これらから、風圧力を考慮した操縦運動方程式として、次式を得る。

$$(m + m_x) \dot{u}_a - m v_a r = X_H + X_R + X_P + X_W \quad (3-9)$$

$$(m + m_y) \dot{v}_a + m u_a r = Y_H + Y_R + Y_T + Y_W \quad (3-10)$$

$$(I_{ZZ} + J_{ZZ}) \dot{r} = N_H + N_R + N_T + N_W \quad (3-11)$$

ここで、

m, m_x, m_y	:質量、付加質量
I_{ZZ}, J_{ZZ}	:慣性モーメント、付加慣性モーメント
u_a, v_a, r	:対地船速の船体前後、左右方向成分、回頭角速度
X_H, Y_H, N_H	:主船体に働く流体力
X_P	:プロペラ推力
X_R, Y_R, N_R	:舵に働く流体力
Y_T, N_T	:サイドスラストの横力、回頭モーメント

とした。なお、右辺流体力の詳細については第2章で詳述しているので、ここでは割愛する。

強風下の最適制御問題の解の1例として、第2章で用いた東京商船大学の小型練習船「汐路丸」を用いて、以下に示す最適制御問題の解が風によってどのような影響を受けるのか調べた結果を Fig.3-2 と Fig.3-3 に示す。Fig.3-2 には航跡の比較を示し、Fig.3-3 には舵角と方

位角の時系列の比較を示す。Fig.3-2、Fig.3-3 とも無風状態（絶対風速が零）の最適解を実線で示した。この計算における種々の条件を以下にまとめる。

外乱条件

相対風速：20m/s,30m/s

相対風向： $\pm 45^\circ$ （向風）、 $\pm 135^\circ$ （追風）

初期条件

オートパイロットにより 12kt で定針定速航行

終端条件

位置：500m 右方へ幅寄せ

舵角：操舵開始時の当て舵値

速度：幅寄せ終了後の対地の横方向速度が零

方位：回頭角速度は零、方位角は自由

評価関数は、所要時間最小（最短時間問題）とした。

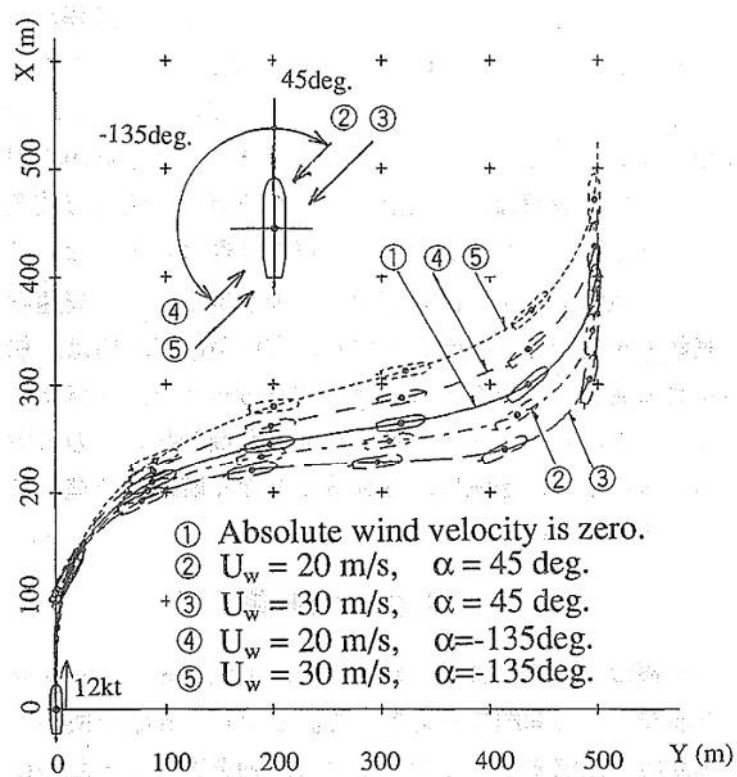


Fig.3-2 Examples of optimal solution for deviation maneuver under wind disturbance (ship's path)

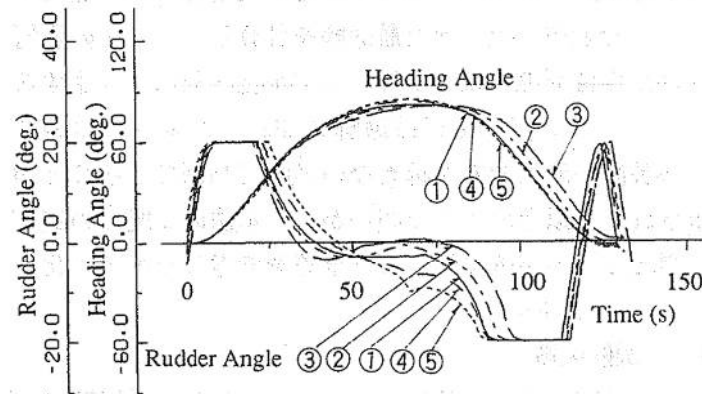


Fig.3-3 Examples of optimal solution for deviation maneuver under wind disturbance (heading and rudder angle)

これらの図を見ると、風速および風向による最適解の変化は、横へ移動中の舵角のとりかたに大きく現れている。しかし、方位角の時系列や所要時間については、向かい風の場合に若干変化があるがあまり顕著な変化は現れていない。逆に考えると方位角を無風状態の最適解に近くなるよう制御すれば、強風下でもほぼ精度良く幅寄せ操船が行えるものと考えられる。ただし、途中の航跡および操船終了時の原針路方向の移動距離は、風向風速によってかなり変化するので、狭い場所では注意が必要である。このように、本手法を用いれば外乱下における最適な操船方法についての重要な情報を得ることができ、操船訓練や航路計画等に利用できるものとする。

3.2.2 潮流の影響

風の場合とは異なり、潮流の影響は付加的な外力ではなく、対水速度の変化に伴う流体力の変化として現れる。Fig.3-1 に示すように、船体固定座標系で測った潮流の流速を u_c, v_c とすると、船体固定座標系で測った対水速度 (u, v) は次式となる。

$$u = u_a - u_c = u_a - U_{cx} \cos \psi - U_{cy} \sin \psi \quad (3-12)$$

$$v = v_a - v_c = v_a + U_{cx} \sin \psi - U_{cy} \cos \psi \quad (3-13)$$

潮流の影響を考慮するため左辺に慣性力、右辺に流体力他を移項して(3-9) 式から(3-11)式を書き直すと次式を得る。

$$m\ddot{u}_a - m\dot{v}_a r = -m_x \dot{u} + X_H(u, v, r) + X_P(u) + X_R(u, v, r) + X_W(u_a, v_a) \quad (3-14)$$

$$m\dot{v}_a + m\dot{u}_a r = -m_y \dot{v} + Y_H(u, v, r) + Y_T + Y_R(u, v, r) + Y_W(u_a, v_a) \quad (3-15)$$

$$(I_{zz} + J_{zz})\dot{r} = N_H(u, v, r) + N_T + N_R(u, v, r) + N_W(u_a, v_a) \quad (3-16)$$

ここで、例えば $X_H(u, v, r)$ とあるのは、船体に働く流体力が対水速度の関数であることを示す。対水速度の時間微分は次式で表される。

$$\dot{u} = \dot{u}_a + r(U_{cx} \sin \psi - U_{cy} \cos \psi) = \dot{u}_a - rv_c \quad (3-17)$$

$$\dot{v} = \dot{v}_a + r(U_{cx} \cos \psi + U_{cy} \sin \psi) = \dot{v}_a + ru_c \quad (3-18)$$

(3-17)式と(3-18)式を(3-14)式から(3-16)式に代入して整理すると、次式に示す潮流の影響を考慮に入れた操縦運動方程式が得られる。

$$(m + m_x)\dot{u}_a = (mv_a + m_x u_c)r + X_H(u, v, r) + X_P(u) + X_R(u, v, r) + X_W(u_a, v_a) \quad (3-19)$$

$$(m + m_y)\dot{v}_a = -(mu_a + m_y u_c)r + Y_H(u, v, r) + Y_T + Y_R(u, v, r) + Y_W(u_a, v_a) \quad (3-20)$$

$$(I_{zz} + J_{zz})\dot{r} = N_H(u, v, r) + N_T + N_R(u, v, r) + N_W(u_a, v_a) \quad (3-21)$$

風の場合と同様に、「汐路丸」を供試船とする以下に示す最適制御問題の解を Fig.3-4 と Fig.3-5 に示す。Fig.3-4 には航跡の比較を示し、Fig.3-5 には舵角と方位角の時系列の比較を示す。

ただし、この時の種々の条件は以下のようなものである。

潮流条件

流速：2, 4, 6kt

流向：進行方向と直角に左舷方向から右舷方向へ

初期条件

潮流に流されながらオートパイロットにより 12kt で定針定速航行

終端条件

位置：操舵開始時の原針路の航路上

舵角：舵中央

速度：航路上へ復帰時の航路に垂直な方向の対地速度が零

方位：回頭角速度は零、方位角は自由

評価関数は、所要時間最小（最短時間問題）とした。

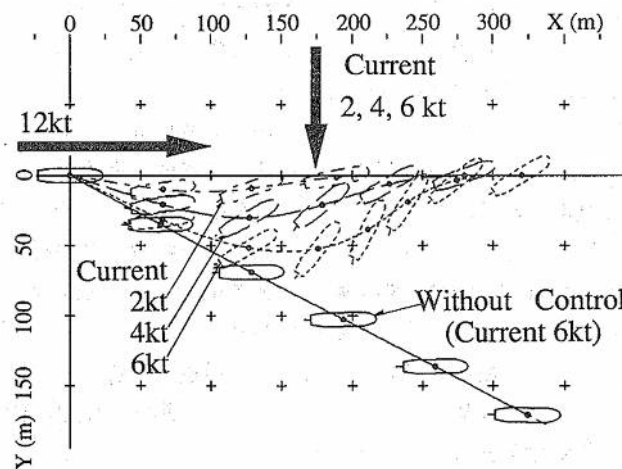


Fig.3-4 Examples of optimal solution for the operations crossing tidal current (ship's path)

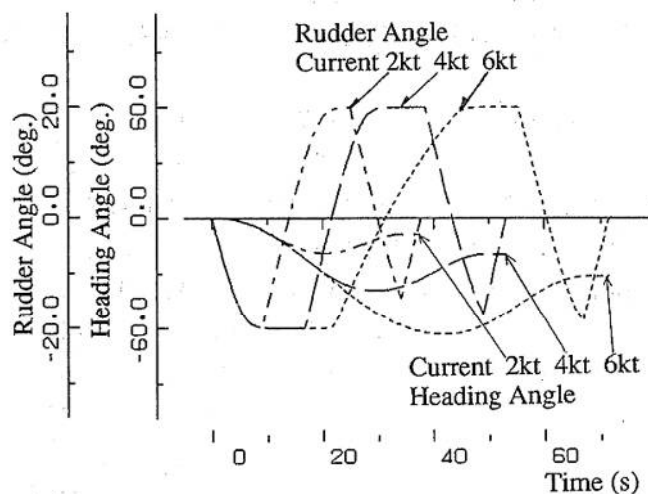


Fig.3-5 Examples of optimal solution for the operations crossing tidal current (heading and rudder angle)

Fig.3-4 に潮速が 6kt の時に流されながら航行する場合の航跡を示す。Fig.3-5 にその時の舵角と方位の時系列を示す。ここで示した計算例は、潮流に流されながら航行中に原針路方向の航路上を流されないように航行するためには、どのように操船すれば良いかを求めたもので、最適解が示す操舵方法を見ると潮流の流速が前進速度の $1/2$ の大きさに変わっても操舵パターン自体には大きな変化はなく、無理なく操船できていることがわかる。また、最適解から得られる重要な情報は、航路上に戻った時点での船の方位角が得られることである。方位角の終端条件は自由となっているが、航路上に戻った時点での対地座標上での合成速度は航路上を進む方向を向いており、方位角の終端値は、船が潮流に流されないために船首を向けるべき方向を与える。すなわち、オートパイロットの目標針路をその方向に向けることで、潮流に流されることなく航路上を進むことができるようになる。

3.3 実船の制御

第2章および前節までにおいては、数値シミュレーションを前提として問題を考えてきた。しかし、実船を使って制御機器を損傷することなく安全に制御を実行するためには、主機や操舵装置の能力およびセンサーノイズなどの影響を十分に考慮する必要がある。したがって、実船への適用においては、制御が実現可能な範囲での最適解を求める必要がある。すなわち、各々の装置の実用上の最大能力に対して十分余裕を持たせた最適解を計算し、ノイズの影響を受けた場合や第2章で示したモデル化誤差により生ずるフィードバック指令値が最適解に加わった場合においても、各装置の最大能力を越えない範囲で制御できるこ

とが要求される。以上のような観点から、実船への適用を前提とした各装置に対する対策を以下に述べる。

3.3.1 操舵装置

まず、応答特性のモデル化について考える。操舵装置は、一般に油圧駆動であり機械的ループによって一次遅れの応答をする。油圧ポンプの最大流量値に対応する以上の操舵速度は得られないので、転舵中の操舵速度はほぼ一定となる。したがって、操舵装置の応答特性を表す数学モデルとして、応答速度が最大値以下の場合是一次遅れとし、最大値を越える場合は操舵速度を一定とするモデルがよく用いられる³⁾。非線型最適制御理論を適用するためには、連続で状態量による偏微分が可能な数式化が必要であり、途中でモデルを切り換える方法は好ましくない。しかし、一次遅れのみによる近似では、目標値と現在値の差によって応答速度が変わるため、最適解を計算する場合に、全局面において平均的な操舵速度を近似し得る時定数を選択することが困難である。また、最大の偏差に対し最大操舵速度を超えないよう時定数を定めると小さい偏差に対する応答速度が著しく遅くなり、最短時間制御問題の場合には解の最適性が低下する。そこで本章では、次式に示すような関数近似によって操舵装置の応答特性を模擬し最適解を求める。

$$(|\delta^* - \delta|T_E + a)\dot{\delta} + \delta = \delta^* \quad (3-22)$$

ここで、 δ, δ^* は各々実舵角および指令舵角、 T_E は最大操舵速度を表す時定数、 a は数値積分時に零による除算を防ぐための正の定数で積分時間刻み程度の大きさの値である。

(3-22)式から、操舵速度は次式となる。

$$\dot{\delta} = \begin{cases} \frac{1}{T_E + \frac{a}{\delta^* - \delta}} & (\delta^* > \delta) \\ 0 & (\delta^* = \delta) \\ \frac{1}{-T_E + \frac{a}{\delta^* - \delta}} & (\delta^* < \delta) \end{cases} \quad (3-23)$$

(3-23)式において、目標値と現在値が離れている場合には、分母の第2項が第1項に比べて十分小さくなるので、操舵速度はほぼ $1/T_E$ となる。一方目標値に現在値が近づくと分母の第2項が大きくなり、操舵速度は零に漸近する。Fig.3-6に(3-22)式と一時遅れ近似のステップ応答について、目標値を種々変化させて比較した結果を示す。

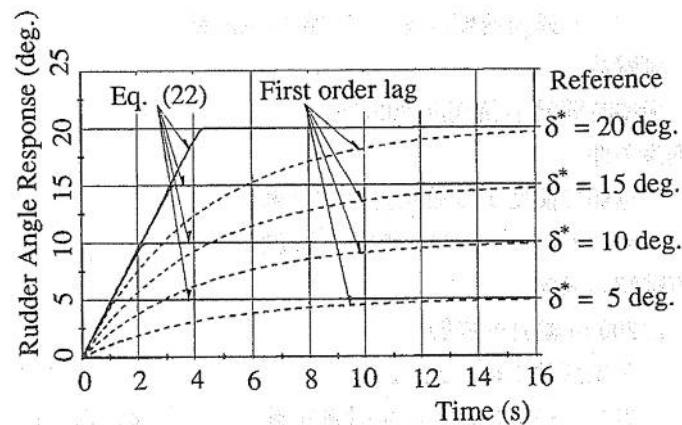


Fig.3-6 Comparison of step response between eq.(3-22) and first order lag

ただし、縦軸に舵角を示し、各々の目標舵角に対し、実線で(3-22)式による応答の時系列、点線で一次遅れ近似による応答の時系列、横軸は目標舵角を指令してからの経過時間を示す。ここで、(3-22)式の T_E は、最大操舵速度を与える値とし、一次遅れ近似の時定数は、目標値によらず一定で、目標舵角との偏差が20度の場合における操舵速度が最大操舵速度を超えないように設定した。ここでいう最大操舵速度とは、操舵装置の能力の上限ではなく、操舵指令の変化に対して操舵機が遅れることなく追従し得る操舵速度のことである。Fig.3-6から(3-22)式を使うことで目標値が変化しても操舵速度をほぼ最大操舵速度に保持できること、あるいは一次遅れ近似の場合には、偏差が小さくなると応答速度が著しく低下すること等がわかる。

次に、実船では安全や機器の保護のため、船速や主機の負荷によってとり得る実用上の最大舵角を制限している。この点については、前章で示した非線型最適制御問題の解法を用いれば、制御入力 of 最大値に対して不等式拘束条件を設定することができるので、最適解を計算する場合に最大舵角を想定される制限値より小さくすることが可能である。また、操舵装置は、船に装備されているオートパイロット等で使用されることを考慮されており、装置側に過負荷保護対策など十分な安全対策が講じられていると考えられるので、ソフトウェア側としては、操舵指令信号について特に配慮する必要はないものと考えられる。

3.3.2 CPP 駆動装置

供試実船として前述の東京商船大学の小型練習船「汐路丸」を想定しているので、主機の制御はCPPの翼角制御となる。まず、CPPの翼角変節速度の制限について考える。翼角の制御は、変節速度一定で行われているので、翼角変節の応答特性については(3-22)式同様のモデル化が可能であり、次式で与えられる。

$$(|\theta_p^* - \theta_p|T_\theta + a)\dot{\theta}_p + \theta_p = \theta_p^* \quad (3-24)$$

ここで、 θ_p^*, θ_p は各々指令翼角と実翼角を示し、 T_θ は翼角の応答速度を表す時定数である。次に、翼角の最大値について考える。通常 CPP の翼角の前進側の最大値と後進側の最大値は異なっている。そこで、仮の指令値を導入し真の指令値と仮の指令値の間にオフセットを持たせることで、零点に対して非対称な不等式拘束条件を等式拘束条件に置き換える。次式に、翼角制御入力に対する拘束条件を示す。

$$\theta_{pd} = \frac{1}{2}(\theta_{pu} - \theta_{pl}) \sin u_d \quad (3-25)$$

$$\theta_p^* = \theta_{pd} + \frac{1}{2}(\theta_{pu} + \theta_{pl}) \quad (3-26)$$

ここで、 θ_{pu}, θ_{pl} は各々翼角の上限値と下限値を表し、 u_d はダミー入力、 θ_{pd} が仮の翼角指令値、 θ_p^* が真の翼角指令値を示す。すなわち、(3-25)式が最適制御入力を求めるための等式拘束条件であり、(3-26)式によって(3-24)式の目標値として用いる翼角が与えられる。

最後に、指令信号に対するハード的な制限について考える。先に述べたように、操舵装置とは異なり、翼角の変節装置は通常オートパイロットの指令等によって駆動されることを考慮して設計されてはいない。したがって、急激な指令信号の変化を与えることのないようソフトウェア側で信号処理について配慮する必要がある。前進速度に対する最適解と実状態量との差をフィードバックしない場合には、翼角は(3-24)式の解として与えられる実翼角に追従して動く。このため、(3-24)式の変節速度を機械的限界に対し十分余裕のある値とすることにより、装置に過負荷をかけることはない。しかし、フィードバックを考える場合、前進速度信号のノイズ等によってフィードバック信号成分が激しく変動する可能性があり、変節装置を損傷する恐れがある。そこで、このフィードバック信号成分も含めて翼角の指令信号を低域濾波して用いる。しかし、実制御においてのみ低域濾波処理をすると最適解との差が大きくなり、よりフィードバック量を増大させる可能性がある。したがって、最適解の計算段階から低域濾波処理を考慮し、次式で示される低域濾波の処理を操縦運動方程式に付加し最適解を求める。

$$\frac{\dot{\theta}_{pa}}{2\pi f_c} + \theta_{pa} = \theta_p \quad (3-27)$$

ここで、 f_c はカットオフ周波数、 θ_{pa} が操縦運動モデルのプロペラ推力を求めるために使用する実翼角である。実船の制御に用いる最適制御入力としては、 θ_p を用いる。

3.3.3 スラスト装置

前進船速が大きい状態で船首および船尾スラストを使用することは、装置に負担をかけるので、ある船速以上のスラスト使用を制限する方法について考える。最も単純な方法は、

船速に応じてモデルを切り換える方法である。しかし、前述したように運動モデルを切り換える方法は、非線型最適制御理論を適用する上で不都合である。ここでは、シグモイド関数¹⁷⁾を使った次式に示す評価関数を用いることにより、ある船速以上におけるスラストの使用を制限する。

$$I = \int_0^1 \tau \{1 + R_1 \operatorname{sigm}(w(u - u_0))(T_b^2 + T_s^2)\} dt \quad (3-28)$$

$$\operatorname{sigm}(w(u - u_0)) = \frac{1}{1 + e^{-w(u - u_0)}} \quad (\text{シグモイド関数})$$

ここで、 τ は終端時刻を表し、 T_s, T_b は各々船首と船尾スラストの推力を表す。被積分項は、第1項が最短時間問題としての評価関数を表し、第2項がスラスト使用によるペナルティを表す。また、 R_1 は正の実定数であり、第1項と第2項の寄与度を定めるパラメータである。 w はシグモイド関数のy切片の傾きを調整する重みを示し、入力 $u - u_0$ は、 u が前進船速、 u_0 がスラストの使用を許可する上限の船速を示す。シグモイド関数の性質から w を十分大きくとれば、 u が u_0 より小さい場合には、被積分関数の第2項はほとんど零になり、 u が u_0 より大きい範囲では、ほぼ前後のスラスト推力の2乗の和の R_1 倍がペナルティとして評価関数の値に加わる。これによって、船速が u_0 より高い範囲でスラストを使用すると評価関数の値が急増し、評価関数の値を最小にする最適解においては、該当領域におけるスラスト使用を制限することができる。計算例については、実船試験において示す。

3.4 実船試験

Table 3-1 Measurement items and instruments

Items	Instruments
Heading Angle	Gyro compass
Rate of turn	Rate gyro
Forward speed	Doppler log
Lateral speed	Doppler log
Ship position	Integration of forward and lateral speed
Rudder angle	Shiojimaruru's data acquisition system
CPP blade angle	Do
Wind direction	Do
Wind speed	Do

前節で述べた各装置に対する実船実験への対応処置を講じ、「汐路丸」を使った実船実験を行った。なお、現在まだ最適解を計算するためには、高性能 Engineering Work Station が必要であり、「汐路丸」船上では最適解の計算を実行できない。したがって、実海象に合った風等の外乱に対応する最適解をリアルタイムに計算することができず、実験に用いた最適解は全て外乱の影響を考慮していない。なお、Table 3-1 に計測項目と計測方法を示す。

3.4.1 制御則

制御則は、第2章で示した方法を用いる。ただし、第2章では幅寄せ操船について、前進速度のフィードバックを行っていなかったが、実海域では外乱等によってモデル誤差が大きくなると予想されるので、幅寄せ操船時にも前進船速のフィードバックを行った。したがって、全ての操船モードにおいて以下に示す制御則で制御を行った。

$$\delta^* = \delta_0 + K_1(\psi_0 - \psi) + K_2(r_0 - r) \quad (3-29)$$

$$\theta_p^* = \theta_{p0} + K_3(u_0 - u) \quad (3-30)$$

ここで、 K_1, K_2, K_3 は比例ゲイン、添え字 0 は最適解を示す。また、船速低下による舵利き不足を補償するため船速がある値以下になった場合、(3-29)式によるフィードバック制御に加え、方位角と回頭角速度のフィードバック制御を次式に示すようにスラストを使っても行う。

$$T_b^* = T_{b0} + K_b\{K_1(\psi_0 - \psi) + K_2(r_0 - r)\} \quad (3-31)$$

$$T_s^* = T_{s0} - K_s\{K_1(\psi_0 - \psi) + K_2(r_0 - r)\} \quad (3-32)$$

ここで、 K_b, K_s は比例ゲインを示す。

3.4.2 幅寄せ操船

以下に示す条件で、自動幅寄せ操船を実施した結果を Fig.3-7 と Fig.3-8 に示す。

初期条件

オートパイロットにより 12kt で定針定速航行

終端条件

位置：200m, 300m 右方へ幅寄せ

舵角：舵中央

速度：船体固定座標系での横方向速度が零、前進速度は自由

方位：回頭角速度は零、方位角は原針路

拘束条件

最適解で使用する最大舵角：20 度

フィードバックの最大舵角：25 度

評価関数は、所要時間最小（最短時間問題）とした。

実験時の天候

a) 200m 幅寄せ操船

気象海象 : 晴、calm

アプローチにおける相対風向風速：-10 度、6.3m/s

b) 300m 幅寄せ操船

気象海象

: 晴、calm

アプローチにおける相対風向風速: -37 度、12.4m/s

Fig.3-7 には 200m と 300m の幅寄せ操船の航跡を示し、Fig.3-8 には 200m の幅寄せ操船の状態量と制御入力の時系列を示す。各々実線で計測結果を示し、点線で最適解を示した。Fig.3-7 から実船試験においても直接位置をフィードバックすること無く精度良く幅寄せ操船ができ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、外乱が大きい場合には、モデル誤差が増大するのでフィードバックしなければならない状態量は増加するものと考えられる。必要なフィードバック情報の選択と制御システムの検討が今後の課題である。

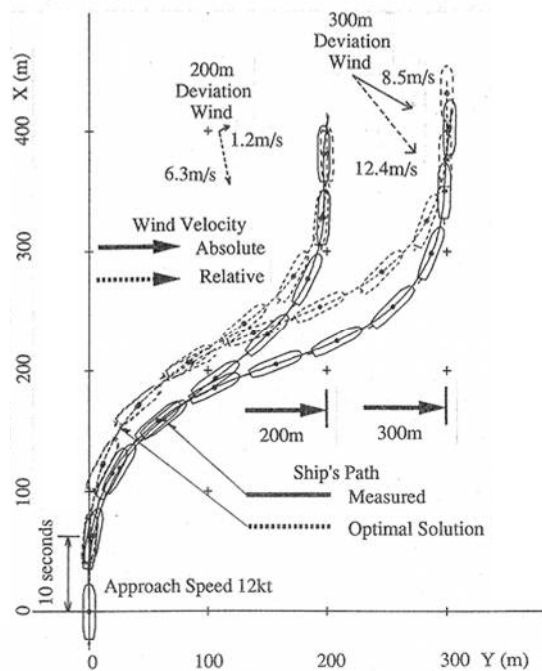


Fig.3-7 Automatic deviation maneuver by proposed controller (ship's path)

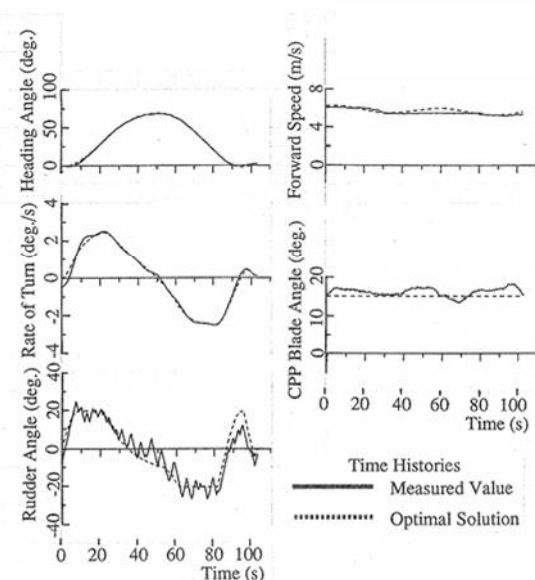


Fig.3-8 Automatic deviation maneuver by proposed controller (status vectors and control)

3.4.3 着岸操船

以下に示す条件で、自動着岸操船を実施した結果を Fig.3-9 と Fig.3-10 に示す。

初期条件

オートパイロットにより 12kt で定針定速航行

終端条件

位置: 現在地点から現航路上 500m 前方で 200m 右方に停船

舵角：舵中央

速度：停止

方位：回頭角速度は零、方位角は原針路から右反転

評価関数は、(3-28)式を用いた。(最短時間問題＋スラスト使用制限)

$$I = \int_0^1 \tau \{1 + R_1 \sin(w(u - u_0))(T_b^2 + T_s^2)\} dt \quad (3-28)$$

拘束条件

a) 最適解計算時

最大舵角 : 15 度
 船首スラスト CPP 翼角 : 15 度
 船尾スラスト回転数 : 800rpm
 スラスト使用船速 : 4m/s 以下

b) フィードバック時

最大舵角 : 20 度
 船首スラスト CPP 翼角 : 20 度
 船尾スラスト回転数 : 1000rpm
 スラスト使用船速 : 2m/s 以下

実験時の天候

a) 200m 幅寄せ操船

気象海象 : 晴、moderate

アプローチにおける相対風向風速 : -47 度、7.8m/s

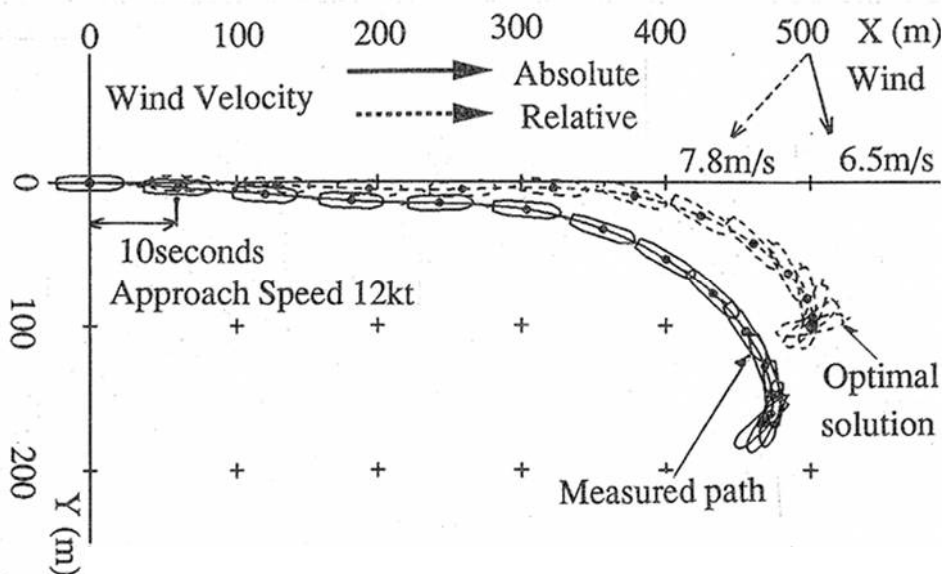


Fig.3-9 Automatic berthing maneuver by proposed controller (ship's path)

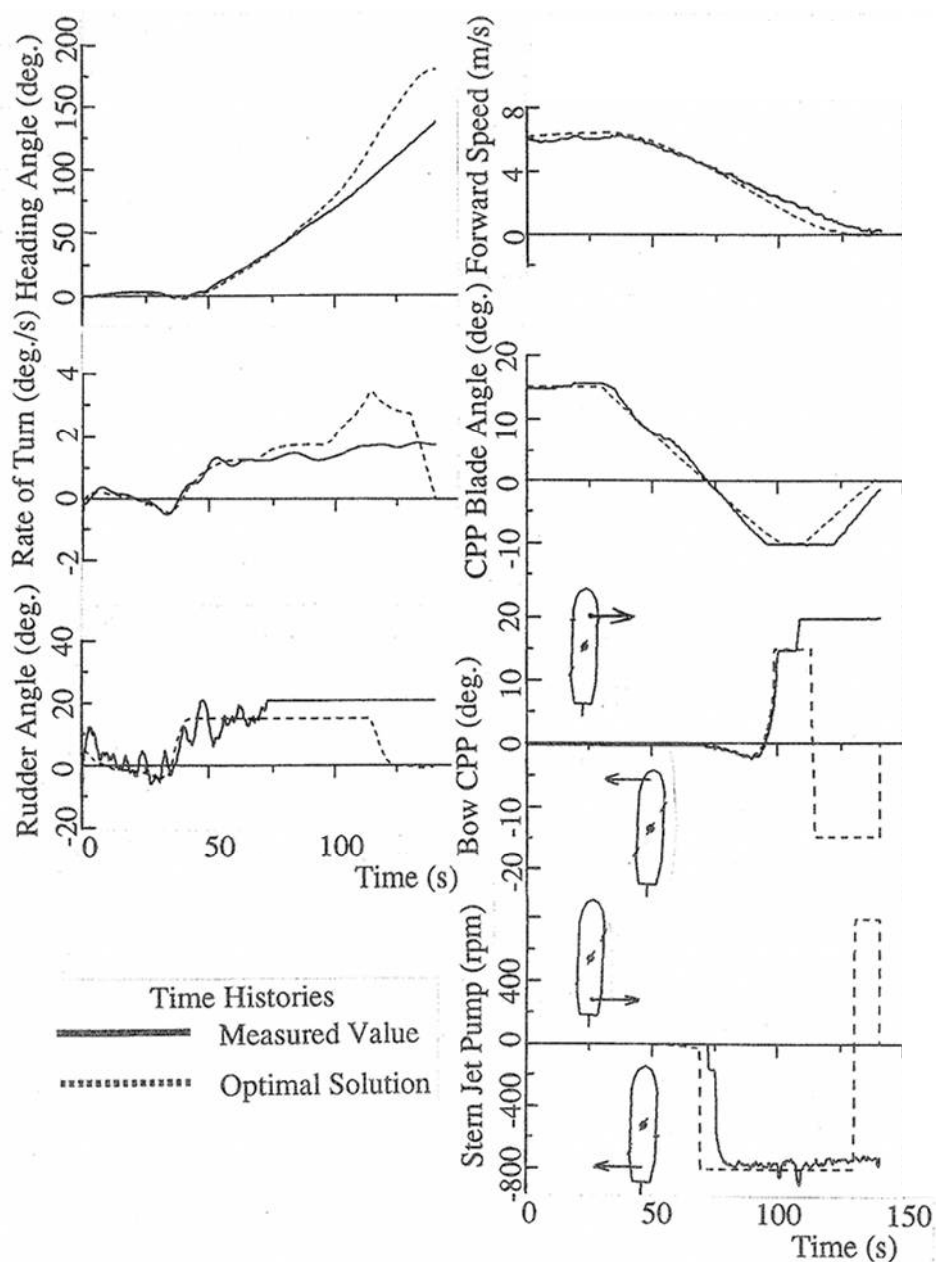


Fig.3-10 Automatic berthing maneuver by proposed controller (status vector and control inputs)

Fig.3-9 には航跡を示し、Fig.3-10 には状態量と制御入力の時系列を示す。各々実線で計測結果を示し、点線で最適解を示した。まず、Fig.3-10 の最適解の船首・船尾スラストの使用状況を見ると、制御開始後約 70 秒間は全くスラストを使用していないことがわかる。スラスト使用開始時刻における最適解の前進船速は、約 4m/s となっており、(3-28) 式の評価関数によりスラストの使用範囲制限をほぼ完全に満足する最適解が得られることがわかった。このように、評価関数に状態量や制御入力に対する制限条件違反をペナルティとして加えることで、種々の制約条件のある問題についても最適解が得られることがわかった。

次に実船の制御精度について考える。Fig.3-10 からわかるように、各状態量については最

適解と実測値は停船点付近を除き良く一致している。Fig.3-9 に示した航跡も停船点付近を除き概略一致しているが、停船点が前後左右とも約 50m ずれている。この原因としては、停船直前の低速航行時の運動推定誤差が大きいこと、低速時には相対的に外乱の影響を強く受けること、スラストによるフィードバックが弱く偏差を補償できなかったこと等が考えられる。本船のように小型で船首・船尾にスラストを有する船舶でも、停船点付近の低速航行状態では姿勢や位置の制御が困難であることがわかった。したがって、一般商船への適用を考えるためには、低速時の操縦運動モデルの精度向上や曳船の補助等の数式化を図る必要があると考える。

3.5 結言

第2章では、非線型最適制御問題の解法を利用して数学的に最適な操船方法を見いだす手法を示した。第3章ではそれらの結果をもとに、より実用的な応用が可能であるように定常外乱に対する問題の定式化手法や実船へ適用するための問題点と対策を明らかにした。さらに、小型練習船による実海域における実験を実施し、非線型最適制御手法の実用性を示すとともに今後の課題と問題点を明らかにした。ここで得られた結論をまとめると以下のようになる。

- (1) 定常風や潮流等の外乱がある場合の最適制御問題について、外乱の定式化を示した。そして、例題を解くことにより外乱下における操船法の検討についても本手法が利用できることを示した。
- (2) 実船に適用するにあたり、操舵装置、CPP 駆動装置、スラスト装置等を使用するために考えられる制限事項を各々明らかにし、それらに対応するための応答モデルや信号処理モデルを示した。これらの議論のなかで、従来の一時遅れ近似では表現することが困難であった一定速度の応答を近似する非線型な応答モデルを提案した。
- (3) 小型練習船による実海域実験を実施し、実船においても第2章で示したように、位置を直接フィードバックすること無く精度良い自動幅寄せ操船が実現できることを示した。しかし、着岸操船ではスラスト推力推定モデルや低速時のモデルの精度が低く、しかも低速で外乱の影響を受け易いため、良好な結果は得られなかった。モデルの精度向上と共に外乱下におけるフィードバックの手法について今後検討する必要がある。
- (4) 本章では、操縦運動モデルに外乱の影響を考慮したり、非線型性の高い評価関数を導入するなどの理論的拡張を行ったところ、第2章で示した非線型最適制御問題の解法はこれらの拡張に柔軟に対応できることがわかった。今後は、本手法をタンカー船型やコンテナ船型等、より非線型性の高い操縦運動モデルで表現される一般船型に適用すること

を課題とする。

- (5) 評価関数に状態量や制御入力に対する制限条件違反をペナルティとして加えることで、種々の制約条件のある問題についても最適解が得られることがわかった。特に、シグモイド関数を利用することにより、オンオフに近い制約条件であっても評価関数に付加できることがわかった。
- (6) 定常外乱の他、変動外乱、浅水影響や岸壁影響についても多項式近似等の数式近似を行えば、本手法の適用が可能である。また、曳船の曳航力等についても付加的な制御入力として捉えれば、本手法による取り扱いが可能である。

第4章 線型最適レギュレータを用いた多入力多出力制御²⁰⁾

4.1 緒言

第2章、第3章では、大運動を想定した非線型の操縦運動モデルを用い、操船に対する非線型最適制御問題の定式化、および最適制御入力を求めるための数値解法を示した。例題として幅寄せ操船と着岸操船を考え、これらを最短時間制御問題として最適化し、舵、可変ピッチプロペラ（CPP）、船首尾スラストの操作方法を求めた。さらに、定常外乱下における操縦運動問題に適用できるよう問題の定式化を拡張し、定常風や潮流下での最適操船問題を取り扱えるようにした。一方、提案した制御方法を実船の制御に適用するために考慮すべき種々の問題点とそれらに対する対策を示し、実海域実験によって本制御手法による操船の自動化について有効性を確認した。

ここまで示した手法を用いることにより、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る。すなわち、操作が複雑で困難である多入力多出力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最適な操作方法となるかを知ることができる。したがって、過去に経験の無い操船方法やより効率の良い操船方法について種々の検討を行うためのツールとして有効な方法である。しかし、実際の制御に適用することを考えると、第3章に示したように最適解に従って舵や CPP などのアクチュエータを制御する必要があり、実船実験に用いた「汐路丸」と同様にアクチュエータを自由に制御することが可能な場合を除き、一般には新しい付加的な制御装置を必要とする。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、一般商船でもオートパイロット程度の自動装置は装備されている。本章では、これらの自動制御システムを利用することを考える。すなわち、従来ステップ関数やランプ関数などの単純な形で与えていた制御目標を、前報までに示した最適制御問題の解法を応用することで最適化し、最適な制御目標を与えることで最適操船を実現する方法を示す。いわば既存の制御システムを利用して最適制御を実現するシステムであり、ここではこれを OCS(Override Control System) と呼ぶことにする。OCS は、制御系を含むシステム全体を制御対象と考え、制御目標の与え方を制御入力と考えることで、前章までに示した問題に帰着される。OCS の考え方は、種々の制御システムに対して適用されるが、本章では、1 例として線型最適レギュレータ（LQR : Linear Quadratic Regulator）によって定点保持をするシステムを考え、定点を保持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、従来の制御方法と OCS を数値シミュレーション計算によって比較し、考察した結果について述べる。

4.2 LQR の構築

OCS の適用は、既存の制御システムの存在が前提となる。したがって、「汐路丸」を制御対象として、同船の CPP と船首尾スラストを用いて定点保持をさせる制御システムを LQR によって構築し、これを既存の制御システムとする。本節では、LQR システムについての議論が目的ではなく、OCS が駆動する制御システムの 1 例として LQR システムを考えるので、ここでは、レギュレータの最適性に関する詳しい議論は避け、簡単に LQR の構築について述べる。

4.2.1 線型状態方程式

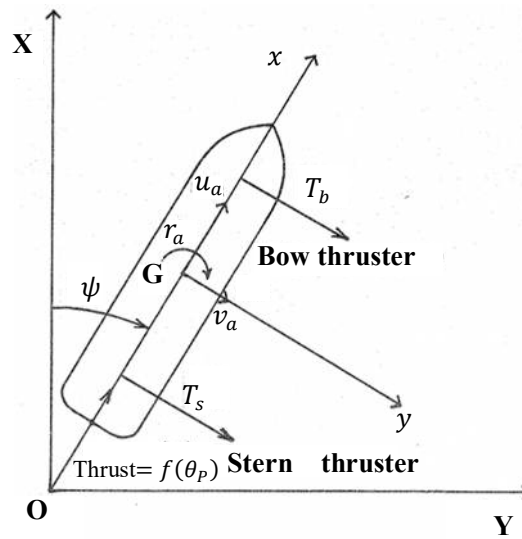


Fig.4-1 Co-ordinate systems

LQR 理論を適用するため、Fig.4-1 に示す座標系を用いて、操縦運動方程式を船速零近傍で線型化し状態空間表現する。このとき線型化の基準となる状態量を次式のように定義する。

$$u_a = v_a = r_a = 0 \quad (4-1)$$

$$X = Y = \psi = 0 \quad (4-2)$$

ここで、 u_a, v_a, r_a は、各々船体前後、左右方向の船速および回頭角速度、 X, Y, ψ は、重心の (X, Y) 座標および船首方位角を表す。制御入力としては、低速であるため舵の効果は期待できないので、CPP の翼角 θ_p と船首尾スラスト T_b, T_s を考える。以上の条件の下に線型操縦運動方程式の状態空間表現として次式を得る。($()^T$ は転置行列を示す。)

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} \quad (4-3)$$

$$\mathbf{x} = (u_a, v_a, r_a, X, Y, \psi)^T \quad (4-4)$$

$$\mathbf{u} = (\theta_p, T_b, T_s) \quad (4-5)$$

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{22} & a_{23} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & a_{32} & a_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4-6)$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} b_{11} & 0 & 0 \\ 0 & b_{22} & b_{23} \\ 0 & b_{32} & b_{33} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (4-7)$$

ここで、 a_{11} , b_{11} などは零ではない要素を示す。

定点保持のため、方位角 ψ と (X, Y) 座標をフィードバックするので、観測方程式は次式で与えられる。

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} \quad (4-8)$$

$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4-9)$$

4.2.2 積分型最適サーボ系

良く知られているように、制御対象のモデル化誤差や定常外乱に対処するためには、積分補償が必要である。本論文では、対象システムに積分補償を加えた拡大系と呼ばれる最適レギュレータシステム²¹⁾を考える。制御目標を $\mathbf{r}$ とし、制御誤差の積分値を $\mathbf{w}$ とすると両者は次の関係を持つ。

$$\dot{\mathbf{w}} = (\mathbf{r} - \mathbf{y}) \quad (4-10)$$

状態量と入力の定常値を $\mathbf{x}_\infty, \mathbf{u}_\infty$ とおくと、(4-3) 式、(4-8) 式と(4-10) 式からなる拡大系は、偏差 $\mathbf{x}_e = \mathbf{x} - \mathbf{x}_\infty, \mathbf{u}_e = \mathbf{u} - \mathbf{u}_\infty$ についての状態空間表現として、次式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} \dot{\mathbf{x}}_e \\ \dot{\mathbf{w}}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{A} & \mathbf{0} \\ -\mathbf{C} & \mathbf{0} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{x}_e \\ \mathbf{w}_e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \mathbf{B} \\ \mathbf{0} \end{pmatrix} \mathbf{u}_e \quad (4-11)$$

$$\mathbf{e} = \mathbf{r} - \mathbf{y} = (-\mathbf{C} \quad \mathbf{0}) \begin{pmatrix} \mathbf{x}_e \\ \mathbf{w}_e \end{pmatrix} \quad (4-12)$$

$$\mathbf{w}_e = \mathbf{w} - \mathbf{w}_\infty \quad (4-13)$$

この拡大系に対する最適サーボ系は、 $\mathbf{Q}_1$ を半正定、 $\mathbf{Q}_2$ と $\mathbf{R}$ を正定な重み行列とする評価関数

$$J = \int_0^\infty (\mathbf{x}_e^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{x}_e + \mathbf{w}_e^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{w}_e + \mathbf{u}_e^T \mathbf{Q}_1 \mathbf{u}_e) dt \quad (4-14)$$

を最小化することにより得られ、次式によって与えられる。

$$\mathbf{u}_e = \mathbf{F}\mathbf{x}_e + \mathbf{G}\mathbf{w}_e \quad (4-15)$$

ここで、 $\mathbf{F}$ と $\mathbf{G}$ は、Riccati の方程式の解から得られるフィードバックゲインである。 $\mathbf{w}_e$ とし

て(4-14)式を最小にする値を用い、 $\mathbf{x}, \mathbf{w}$ の初期値を零とする。また、定常外乱の無いシステムでは、 $\mathbf{u}_\infty = \mathbf{0}, \mathbf{x}_\infty = (\mathbf{0}, \mathbf{r})$ となることを考慮すると(4-15)式は、次式で与えられる²¹⁾。

$$\mathbf{u} = \mathbf{F}\mathbf{x} + \mathbf{G}\mathbf{w} + \mathbf{H}\mathbf{r} \quad (4-16)$$

ここで、 $\mathbf{H}$ は Riccati の方程式の解から得られる参照入力からのフィードフォワードゲインである。(4-16)式はベクトル表示になっているが、 $\mathbf{F}, \mathbf{G}, \mathbf{H}$ の零ではない要素を使って、CPPの翼角指令 θ_p^* 、船首尾スラストに対する推力指令 T_b^*, T_s^* の形に書き改めると以下の式を得る。

$$\theta_p^* = f_{11}u_a + f_{14}X + g_{11}w_1 + h_{11}X_r \quad (4-17)$$

$$T_b^* = f_{22}v_a + f_{23}r_a + f_{25}Y + f_{26}\psi + g_{22}w_2 + g_{23}w_3 + h_{22}Y_r + h_{23}\psi_r \quad (4-18)$$

$$T_s^* = f_{32}v_a + f_{33}r_a + f_{35}Y + f_{36}\psi + g_{32}w_2 + g_{33}w_3 + h_{32}Y_r + h_{33}\psi_r \quad (4-19)$$

ここで、例えば f_{11} 等は、各マトリクス要素を示す。また、 X_r, Y_r および ψ_r は、それぞれX座標、Y座標および方位角の目標値を表す。(4-17)式から(4-18)式の制御則で示される制御系を Fig.4-2 のブロック線図に示す。

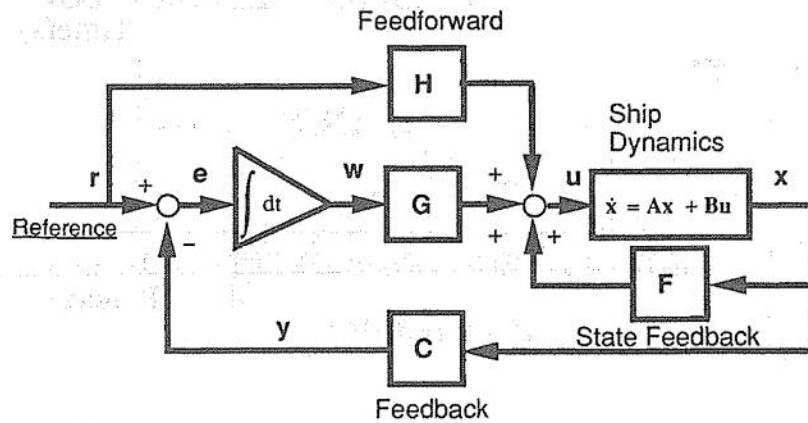


Fig.4-2 Block diagram of augmented LQR

4.2.3 LQR のゲイン

LQR のゲインは、一意的なものではなく、評価関数の重み $\mathbf{Q}_1, \mathbf{Q}_2, \mathbf{R}$ を設計パラメータとして最適なものを選ぶ必要がある。近年最適な設計手法として、ILQ 制御理論⁵⁾などの方法が示されている。しかし、ここでは OCS の有無による性能変化を確認することが目的なので、ゲインについての最適性を深く追求することは避け、線型化されたシステムにおいて、X座標、Y座標各々単独に 100m の変位を与えたときに、アクチュエータに要求される能力が最大値を超えないよう評価関数の重みのバランスを調整し、ゲインを決定した。

4.3 OCS

OCS は、前節で設定した LQR の上位に位置し、制御目標 $\mathbf{r}$ を与える演算部である。本節

では、第2章で示した最適制御入力を求める手法を用いて、最適制御目標を求める方法について述べる。

4.3.1 OCS 構成

Fig.4-3 に OCS と既存の制御装置の関係を示す。

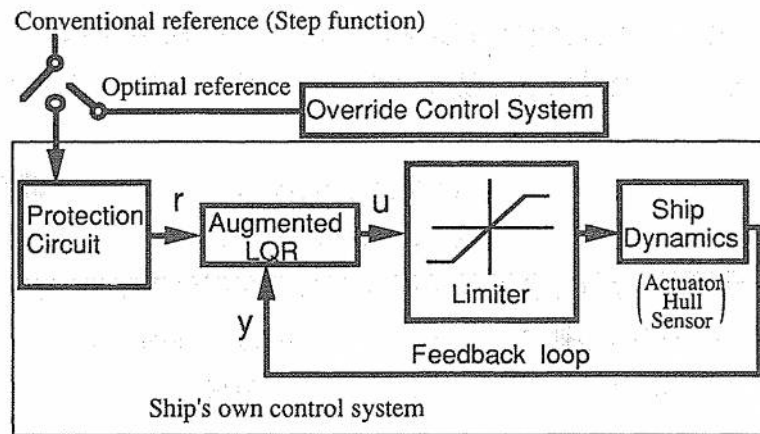


Fig.4-3 Configuration of the OCS servo system

Fig.4-3 に示した保護回路は、CPP の翼角指令信号についてのみ考慮するものとし、CPP 翼角の駆動系に入る信号の変化率が、最大の翼角変節速度を越えないようにする。このために、第3章で提案した応答関数を用い、次式で与えられる入出力関係を保護回路として用いる。保護回路は既存の制御システムの一部とみなす。

$$(|\theta_{pr} - \theta_p^*|T_\theta + a)\dot{\theta}_p^* + \theta_p^* = \theta_{pr} \quad (4-20)$$

ここで、 a は制御周期程度の小さな正の定数、 θ_{pr} 、 θ_p^* は、各々制御目標および翼角駆動装置への指令信号を表す。また、最大翼角変節速度は、 $1/T_\theta$ で与えられる。

さて、Fig.4-3 に示した下位のフィードバックシステムは、制御目標 r の変化に追従して動作する。すなわち、フィードバックシステム全体を制御対象として考えると、制御目標を入力とするダイナミクスが形成される。このダイナミクスに対し、第2章で示した非線型最適制御手法を応用することにより、最適制御入力として最適制御目標が得られる。OCS は、この最適制御目標を求める部分である。OCS は、制御目標を与え間接的にアクチュエータを駆動する。したがって、アクチュエータの操作方法は、既存の制御システムに依存する。前章まででは、直接アクチュエータを動かす方法を求めており、この点が大きく異なっている。

4.3.2 最適制御目標の計算

想定する制御問題は、原点で定点保持している状態から他の場所へ移動し、新しい定点を保持する一連の動作とする。本節では、これを最短時間で実行するための最適な制御目標を求める。第2章の手法を適用するための手順を要約して以下に示す。

- 1) フィードバックシステム全体を制御対象と考えるので、CPP 翼角および船首尾スラストの推力を状態量として扱う。
- 2) Fig.4-3 に示すように、CPP 翼角および船首尾スラストの推力の最大値を使用可能性以下に制限するため飽和要素を用いる。
- 3) CPP と船首尾スラストによる定点保持制御を考える。したがって、舵角は常に零とする。操縦運動に起因して舵への流入角が変化することで発生する舵力については考慮する。
- 4) 状態量の終端条件は、最終の制御目標値とし、速度および角速度の終端値は零とする。
- 5) 制御入力を、目標方位角 ψ_r 、目標X座標 X_r および目標Y座標 Y_r の3入力とする。
- 6) 制御入力の拘束条件として、制御目標の拘束条件（最大値）を設定する。これは、制御目標を必要以上に大きく設定すると、システムのゲインを高くすると同様の効果があり、速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。この場合、不等式拘束条件となるが、第2章で示したように、ダミー入力を用いることにより、次式に示す等式拘束条件に置き換える。

$$X_r = X_{max} \sin u_1 \quad (4-21)$$

$$Y_r = Y_{max} \sin u_2 \quad (4-22)$$

$$\psi_r = \psi_{max} \sin u_3 \quad (4-23)$$

ここで、 $X_{max}, Y_{max}, \psi_{max}$ は、制御目標の最大値を示し、 u_1, u_2, u_3 は、ダミー入力である。

- 7) 最短時間問題とし、所要時間を評価関数とする。

4.4 制御性能の比較

本節では、LQR システムと OCS+LQR システムについて性能比較を行う。両者の比較は、第2章で用いた詳細操縦運動モデル¹³⁾を用い、数値シミュレーションによって行う。供試船は東京商船大学練習船「汐路丸」である。LQR、OCS およびシミュレーションで使用する操縦運動数学モデルが異なるので、混乱を避けるため、ここでまとめておく。

LQR : 線型状態空間表現、(4-3) 式+制御則(4-16)式

OCS : 簡易運動モデル²⁾+制御則(4-17)、(4-18)、(4-19)式

シミュレーション : 詳細運動モデル^{5),6)}+制御則(4-17)、(4-18)、(4-19)式

性能比較は、定点保持状態から正横へ移動するケースと斜め前方に移動するケースの2種類について行った。以下にその結果を示す。

4.4.1 正横への移動

横への移動例として、100m 右正横へ移動する場合の制御則を考える。まず、LQR と OCS の制御目標について比較する。LQR では、ステップ関数で一定値の制御目標を与える。他方 OCS では、(4-17)式から(4-19)式の制御則を組み込んだ簡易操縦運動モデルを使って、与えられた移動を最短時間で実行するための制御目標の時間的変化を非線型最適化手法を用いて求める。両者の比較を Fig.4-4 に示す。縦軸は制御目標、横軸は制御開始からの経過時間である。Fig.4-4 から OCS では、最終目標より大きな目標値を与えていることがわかる。これは、目標値を大きくし、制御系全体としてのゲインを高めることで速応性を上げ、最短時間制御を実現するためである。

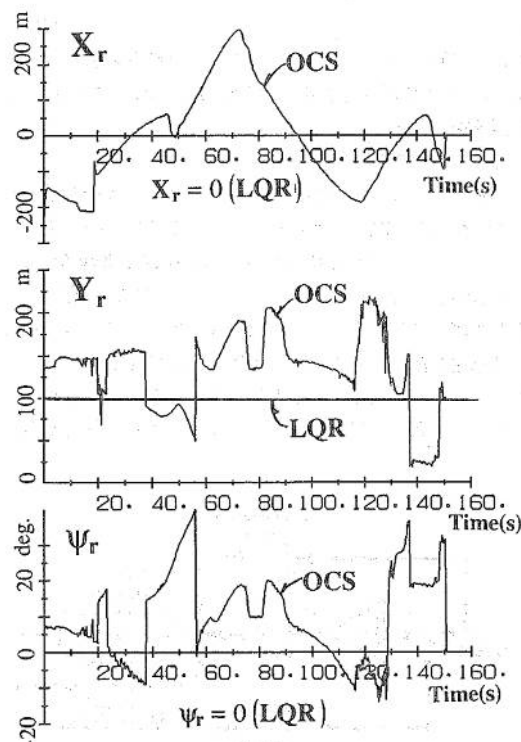


Fig.4-4 Time histories of control references by LQR and OCS during moving to point(0,100)

次に、この制御目標に従って船を制御したシミュレーション結果を比較する。(4-17)式から(4-19)式の制御則を組み込んだ詳細操縦運動モデルに Fig.4-4 に示した制御目標を与え、得

られた航跡を Fig.4-5 に示す。上段が OCS、下段が LQR による制御結果の航跡であるが、双方とも原点から移動を開始している。船の形は 20 秒毎の船の位置を示し、船首付近の数字は制御開始からの経過時間を示す。OCS は、制御目標を時間の関数として与えているが、モデル化誤差のため終端時刻までに制御が完了しない場合には、以後の目標値として最終目標値を与えている。Fig.4-5 からわかるように、両者の特徴的な差は、LQR では船首方位角をほぼ零に保ったまま正横に移動しているのに対し、OCS では斜航角になるべく小さくなるように船首方位角を変えて移動している点である。OCS による制御では、最短時間で移動するために斜航角を小さくし抵抗を低く抑えることで、移動速度を速める移動経路を算出していることがわかる。

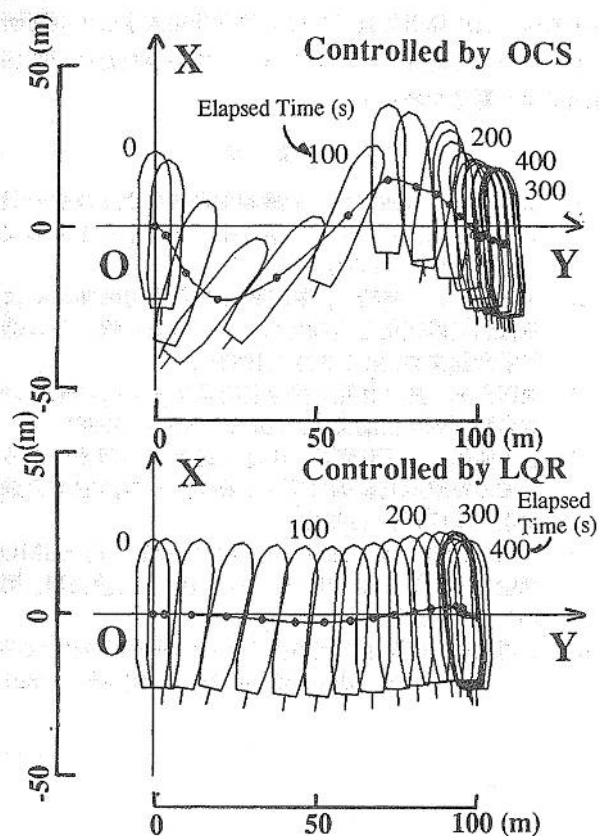


Fig.4-5 Comparison of ship's trajectory controlled by between LQR and OCS

4.4.2 斜め前方への移動

LQR は、線型の状態方程式を基礎式としており、線型の仮定の範囲を外れる運動を制御する場合には、運動をいくつかのフェーズに分け、制御ゲインを運動フェーズに応じてスケジューリングしたり制御則を切り換えるなどの対策が必要である。本論文で取り上げた斜

め前方への移動問題の場合、船首方位角が大きくなると船体前後方向の速度と X 座標、左右方向の速度と Y 座標の関係が線型でなくなるため制御不能となる。そのような場合でも、OCSを用いることにより制御可能となることを示す。

まず、LQR によって、右斜め前方への移動を制御したシミュレーション結果の航跡を Fig.4-6 に示す。左側の図が、 $(X,Y) = (100m, 100m)$ への移動の場合であり、右側が $(200m, 200m)$ への移動を試みた場合である。 $(200m, 200m)$ への移動では、移動中に船首方位角が大きくなり、制御不能に陥っている。これは、前後方向の運動は横方向の運動に比べ制御に対する応答性がよいため、遠くへの移動では前進船速が大きくなり、線型化の仮定が成り立たなくなるためである。

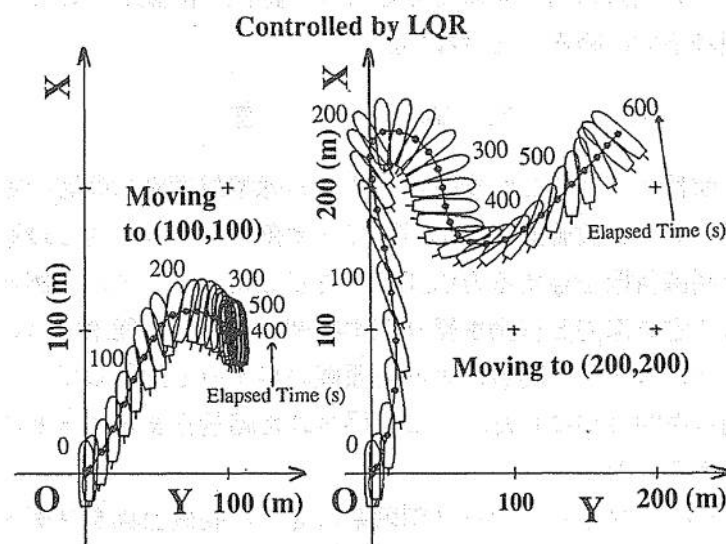


Fig.4-6 Ship's trajectory controlled by LQR

次に、OCS を用いて同様の移動制御を行ったシミュレーション結果の航跡を Fig.4-7 に示す。LQRのみで制御した場合とは異なり、 $(200m, 200m)$ への移動が可能となっている。また、前述の横移動の時と同様に、なるべく斜航角が小さくなるように船首方位角を制御している。このときの制御目標を Fig.4-8 に示す。図の左側に $(100m, 100m)$ への移動時、右側に $(200m, 200m)$ への移動時の制御目標を示す。前述したように前後方向の運動は制御に対する応答性能が高く、高ゲイン状態になっている。したがって、OCS により必要以上にゲインを高めることは、制御系の安定性の観点から好ましくない。このため、 $(100m, 100m)$ と $(200m, 200m)$ への移動に対して、各々 X 座標の制御目標の最大値を $150m$ および $250m$ 以下に制限している。

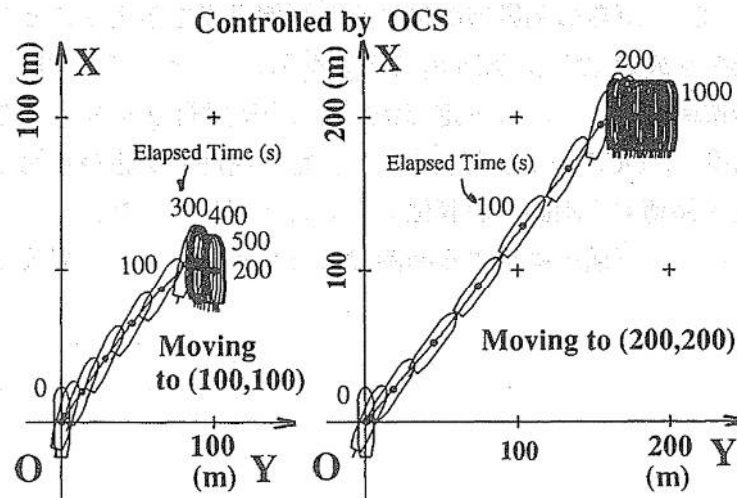


Fig.4-7 Ship's trajectory controlled by OCS

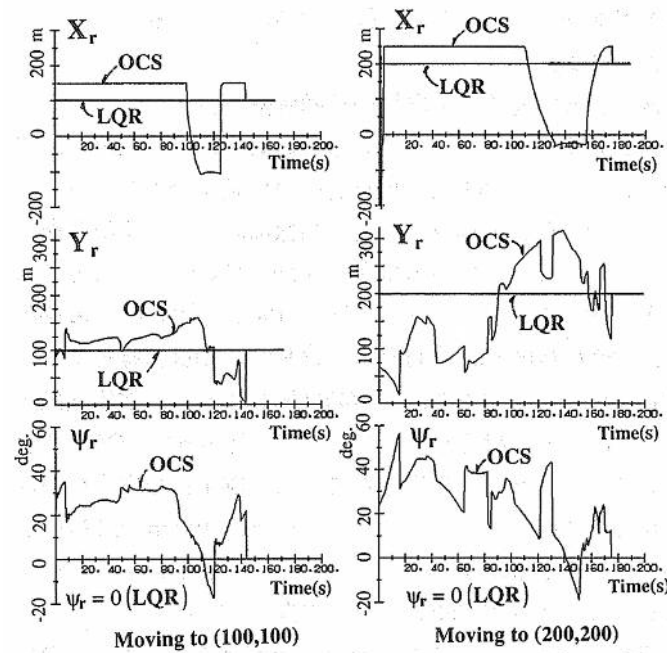


Fig.4-8 Time histories of control references by LQR and OCS during moving to point (100,100) and (200,200)

Fig.4-6 から Fig.4-8 に示した結果から次のようなことがわかる。近くへの移動など、偏差が小さく操作量に余裕がある場合は、目標値を大きくして速応性を高めている。逆に、遠くへの移動の場合は徐々に目標値を大きくすることで偏差を小さくし、能力以上の操作量を要求しないようにしている。このように OCS は、運動が線型な範囲を超えても常にアクチュ

エータの能力以内で制御できるよう目標値を調整するので、制御不能に陥ることはない。

4.5 結言

前章までに示した操船に対する非線型最適制御問題の定式化および数値解法を応用して、制御システムに対し最適な制御目標を与える方法(OCS)を示した。1 例として定点保持と移動を繰り返す制御に適用し、従来行われてきたステップ関数による目標値の与え方と比較してその利点を明らかにした。ここで得られた結論をまとめると次のようになる。

- (1) フィードバック制御系に対する制御目標を制御入力と考え、最適制御入力として最適な制御目標を得る方法を示し、第2章で示した非線型最適制御手法を適用することにより解を得ることができた。
- (2) 既存の制御装置に最適な制御目標を与えることで操船を最適化する OCS の考え方を示した。その上で、CPP と船首尾スラストによる定点保持を LQR で行うシステムを構築し、OCS の 1 適用例として、定点保持の状態から他の点へ移動する制御を最適化できることがわかった。
- (3) 正横へ移動する制御では、LQR にステップ関数で制御目標を与えた場合には、船首方位角を零に保ちながら横に移動するが、OCS による最適制御では、斜航角が小さくなるよう船首方位角を制御し、効率の良い移動をすることがわかった。
- (4) OCS は、常にアクチュエータの能力以内で制御できるよう制御目標を調整するため、LQR では制御不可能な線型の仮定の範囲を超える大きな運動制御に対しても、制御可能であることがわかった。

第5章 疑似逆行列を用いた多入力多出力制御⁽²⁴⁾

5.1 緒言

洋上風力発電の建設や海洋エネルギー資源の探索あるいは開発・支援など海洋作業のためのオフショア作業船の需要が高まっている。これらの船舶には、一般に位置保持性能や高度な操船性能が要求されるため、バウスラスト、スターンスラストや旋回式推進器を複数装備するなど、船体を自由自在に操るためのアクチュエータが多数装備されている。操船により制御される船体運動は、前後運動・左右運動・回頭運動の3自由度運動であるが、多数のアクチュエータを使ってこれらの3自由度の運動を制御する方法は無数に存在する。前章まででは、すべてのアクチュエータを使って最適レギュレータを構成してきたが、多数のアクチュエータを使って伝達マトリクスを構成する制御系においては、重み係数や評価関数を設定する確立された方法は報告されていない。ロボット工学等では、このような出力に対して入力の数が多い正則ではない問題について、疑似逆行列を使って、伝達マトリクスを正則化して解く方法が知られている。本章では、2基の旋回式スラストとバウスラストを有する作業船について、要求される運動モードに対して必要な制御力を疑似逆行列を使って各アクチュエータに配分し、制御システムを1入力1出力系化することで、古典制御理論や最短時間操船問題¹⁷⁾の適用が可能であることを示す。

5.2 推力配分の定式化

多入力多出力系では、制御しようとしている運動モードに対して、無数のアクチュエータ作動の組み合わせが考えられる。ここでは、疑似逆行列を用いて複数のアクチュエータからなる制御システムにおいて、目標とする前後運動、左右運動と回頭運動に対して一意にアクチュエータ作動の組み合わせを求めることができることを示す。

5.2.1 疑似逆行列

$\mathbf{x}$ を n 次、 $\mathbf{y}$ を m 次、 $\mathbf{F}$ を $m \times n$ 次のマトリクスとし、 $\mathbf{x}$ と $\mathbf{y}$ の関係を次式で表す。

$$\mathbf{F}\mathbf{x} = \mathbf{y} \quad (5-1)$$

$n \neq m$ の場合 $\mathbf{F}^{-1}$ は存在しないが、(5-2)式のような性質を持つ $n \times m$ のマトリクスを左側から掛けることにより、(5-3)式のように(5-1)式の解の一つを求めることが可能である。

$$\mathbf{F}^R \mathbf{F} = \mathbf{I} \quad (5-2)$$

$$\mathbf{F}^R \mathbf{F} \mathbf{x} = \mathbf{F}^R \mathbf{y} \quad \therefore \mathbf{x} = \mathbf{F}^R \mathbf{y} \quad (5-3)$$

ここで、 $\mathbf{I}$ は $n \times n$ の単位マトリクスである。

(5-3)式において $\mathbf{x}$ のノルムが最小になる $\mathbf{F}^R$ が Moore-Penrose の疑似逆行列として知られて

おり、(5-4)式で与えられる。

$$\mathbf{F}^R = \mathbf{F}^T (\mathbf{F} \mathbf{F}^T)^{-1} \quad (5-4)$$

ここで、 T は行列の転置を示す。(5-4)式において $\mathbf{x}$ のノルムが最小になることについては、Lagrange の未定定数法を用いて確認できる。

制約条件すなわち(5-5)式のもとで評価関数として $\mathbf{x}$ のノルム(5-6)式を最小にする問題をLagrange の未定定数法により考える。

$$\mathbf{g} = \mathbf{y} - \mathbf{F} \mathbf{x} \quad (5-5)$$

$$f = (\mathbf{x}^T \mathbf{x})^{\frac{1}{2}} \quad (5-6)$$

(5-5)式と(5-6)式から得られる Lagrange の未定定数法による偏微分連立方程式は、(5-7)式と(5-8)式となる。

$$\frac{\partial}{\partial \mathbf{x}} \left((\mathbf{x}^T \mathbf{x})^{\frac{1}{2}} - \lambda (\mathbf{y} - \mathbf{F} \mathbf{x}) \right) = \mathbf{x} + (\lambda \mathbf{F})^T = \mathbf{x} + \mathbf{F}^T \lambda^T = 0 \quad (5-7)$$

$$\frac{\partial}{\partial \lambda} \left((\mathbf{x}^T \mathbf{x})^{\frac{1}{2}} - \lambda (\mathbf{y} - \mathbf{F} \mathbf{x}) \right) = -(\mathbf{y} - \mathbf{F} \mathbf{x}) = 0 \quad (5-8)$$

(5-7)式を解いて(5-9)式が得られ、同様に(5-8)式を解いて(5-10)式が得られる。

$$\mathbf{x} = -\mathbf{F}^T \lambda^T \quad (5-9)$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{F} \mathbf{x} \quad (5-10)$$

(5-9)式を(5-10)式に代入して整理すると、(5-3)式に示される $\mathbf{F}^R$ が(5-4)式で表されるとき、 $\mathbf{x}$ のノルムが最小になることが(5-11)式によって示される。

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{F} \mathbf{x} = -\mathbf{F} \mathbf{F}^T \lambda^T \\ (\mathbf{F} \mathbf{F}^T)^{-1} \mathbf{y} &= -\lambda^T \\ \mathbf{x} &= \mathbf{F}^T (-\lambda^T) = \mathbf{F}^T (\mathbf{F} \mathbf{F}^T)^{-1} \mathbf{y} \end{aligned} \quad (5-11)$$

5.2.2 疑似逆行列を使った推力配分

供試船として2基の旋回式スラストとバウスラストを有する作業船を考える。Fig.5-1 に座標系と記号の定義を示す。図中の記号は、以下の諸量を示す。

l_x : 旋回式スラストの重心から船体長手方向の距離

l_y : 旋回式スラストの中心線から船体横方向の距離

l_b : バウスラストの重心から船体長手方向の距離

X : 全スラストの合力の前後方向成分

Y : 全スラストの合力の左右方向成分

N : 全スラストによる回頭モーメント

F_b : バウスラストの推力

T_1 : 左舷旋回式スラストの推力の前後方向成分

T_2 : 左舷旋回式スラストの推力の左右方向成分

T_3 : 右舷旋回式スラストの推力の前後方向成分

T_4 : 右舷旋回式スラストの推力の左右方向成分

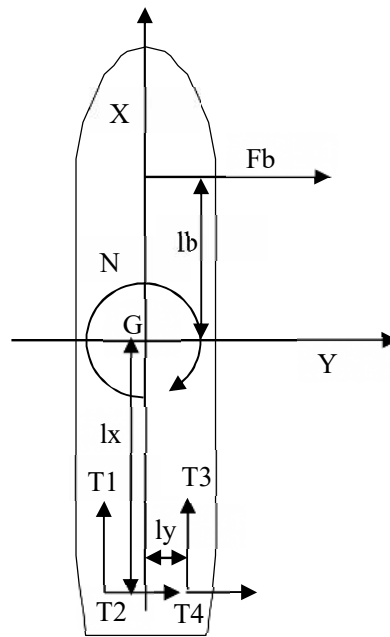


Fig.5-1 Coordinate system and definition of symbols

スラストの合力は図中の記号を用いて(5-12)式で与えられる。

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ N \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ l_b & l_y & -l_x & -l_y & -l_x \end{pmatrix} \begin{pmatrix} F_b \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{pmatrix} \quad (5-12)$$

(5-12)式の中央のマトリクスが(5-1)式の $\mathbf{F}$ に相当するので、(5-4)式によって疑似逆行列を求め推力配分を求めると(5-13)式を得る。

$$\begin{pmatrix} F_b \\ T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & f_{22} + l_b f_{32} & f_{23} + l_b f_{33} \\ 0.5 & l_y f_{32} & l_b f_{33} \\ 0 & f_{22} - l_x f_{32} & f_{23} - l_x f_{33} \\ 0.5 & -l_y f_{32} & -l_b f_{33} \\ 0 & f_{22} - l_x f_{32} & f_{23} - l_x f_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X \\ Y \\ N \end{pmatrix} \quad (5-13)$$

ここで、マトリクスの要素は以下である。

$$\begin{cases} D = 2(l_x + l_y)^2 + 6l_y^2 \\ f_{22} = (l_b^2 + 2(l_x^2 + l_y^2))/D \\ f_{23} = (2l_x - l_b)/D \\ f_{32} = f_{23} \\ f_{33} = 3/D \end{cases} \quad (5-14)$$

(5-13)式により各旋回式スラスタに推力が配分されると、旋回式スラスタの作動状態が以下のように決まる。

左舷推力

$$T_L = \sqrt{T_1^2 + T_2^2} \quad (5-15)$$

左舷首振り角

$$\theta_L = \tan^{-1}(T_2/T_1) \quad (5-16)$$

右舷推力

$$T_R = \sqrt{T_3^2 + T_4^2} \quad (5-17)$$

右舷首振り角

$$\theta_R = \tan^{-1}(T_4/T_3) \quad (5-18)$$

5.3 操縦運動制御計算例

(5-13)式によって、制御量ベクトル $(X, Y, N)^T$ が与えられると、それぞれのアクチュエータに要求される推力が一意に配分されることを示した。このことは、 X, Y, N をそれぞれ独立して制御ができることを示す。すなわち、多入力多出力系が1入力1出力系に置き換えられたことを意味する。ここでは、1入力1出力系に対しては、古典制御が適用できるので多入力多出力系に対して、従来の古典制御理論が適用できることを示す。さらに、前章までに述べてきた最適制御手法についても複雑な推力配分を考慮しなくても一般的な最適手法を用いることで最適解が得られることを示す。

5.3.1 古典制御理論による計算例

(5-13)式は、前後方向、左右方向、回頭方向の運動に必要な力を独立して得ることができることを示している。したがって、それぞれの運動方向の偏差に対してフィードバックをかけることで希望する運動をさせることができる。ここでは、例として停船状態から船首方位を保持しながら正横に動き出し一定速度で移動するという問題を考える。制御方法は、以下に示す比例積分(PI)制御により操縦運動制御に必要な制御力を求めた。

$$X = -k_P x u \quad (5-19)$$

$$Y = k_{PY}(v_c - v) + k_{IY} \int (v_c - v) dt \quad (5-20)$$

$$N = -k_{PN}r + k_{IN}(\psi_c - \psi) \quad (5-21)$$

ここで、 k_{PX}, k_{PY}, k_{PN} は比例ゲイン、 k_{IY}, k_{IN} は積分ゲイン、 u は、前後方向速度、 v, v_c は横方向速度と横方向速度の目標値、 r, ψ, ψ_c は回頭角速度、船首方位、目標船首方位を表す。供試船は、サプライボートとし Table 5-1 に主要目を示す。

Table 5-1 Principal particulars

Length Between Perpendiculars	64.0m
Breadth	13.6m
Draft	4.5m
Displacement	3,246t
Block Coefficient	0.8095

1 例として一定の左右速度で正横へ移動するシミュレーションを実施した結果を Fig.5-2 に示す。設定条件は $v_c = 0.2 \text{ m/s}$ 、 $\psi_c = 0^\circ$ とした。上が移動航跡、下が運動の時系列である。図からほぼ制御目標どおり船首方位を保ったまま正横に移動することができている。なおここでは、(5-19)式から(5-21)式に示した PI 制御で操縦運動を制御できることを示すのが目的なので、ゲインのチューニングを高レベルでは行っていない。しかし、多入力多出力系を 1 入力 1 出力システムに置き換えることができているので、前後、左右と船首方位に対して独立して、従来の古典制御理論を適用することができ複数のアクチュエーターが装備されているにもかかわらず容易に制御ができていることがわかる。Fig.5-3 には各アクチュエーターの作動状況を示す。前後、左右と方位角のそれぞれについて単純に PI 制御をしているだけだが、旋回式スラスタの首振り角と推力(スラスタのプロペラピッチ角)が発進直後から定常状態に至るまでの間で、複雑な動きをしており疑似逆行列を使って多入力多出力系を 1 入力 1 出力系に置き換えることで複数のアクチュエーターを効率よく組み合わせて制御ができていることがわかる。

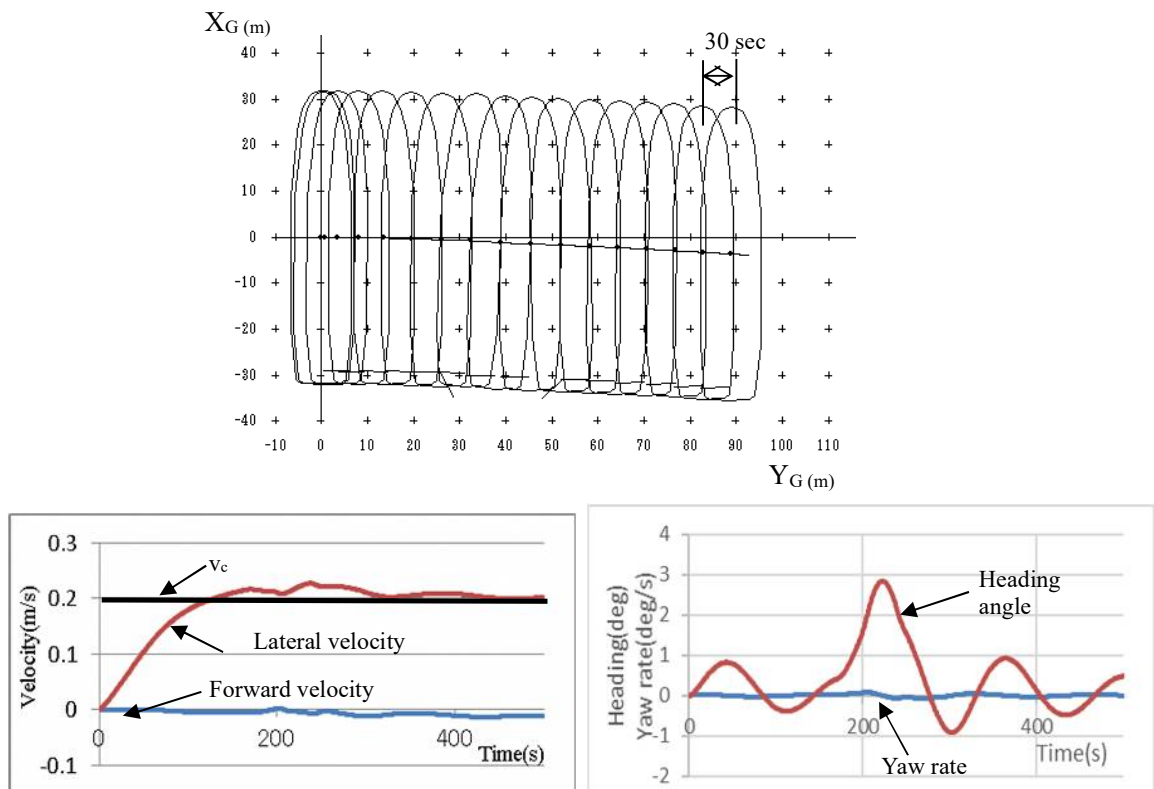


Fig.5-2 Example of maneuvering motion controlled by PI control

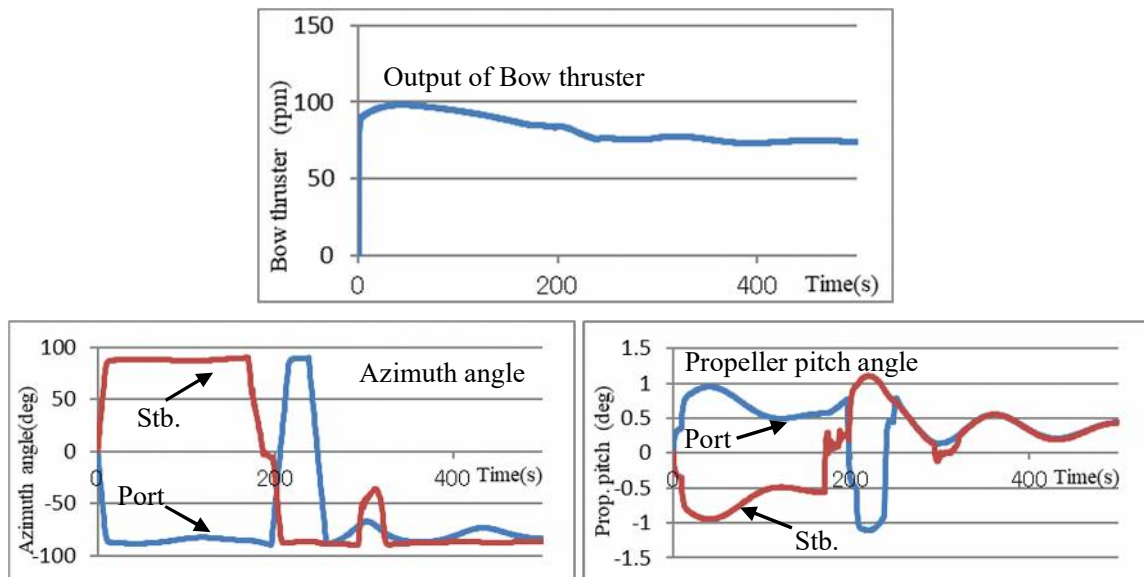


Fig.5-3 Examples of actuator actions controlled by PI control

5.3.2 最短時間操船問題への適用

多入力多出力系を1入力1出力系へ変換することによって、多数あるアクチュエータの複雑な操作の組み合わせを考慮することなく、要求される出力に対して各アクチュエータ

の動作を一意に決めることができることを示した。この手法を用いれば、多数のアクチュエータを有するシステムについてもアクチュエータの使用法に関する評価関数を考慮することなく、前章までに示した最適制御手法の適用が可能である。ここでは、例として第2章で設定した、「12kt でアプローチしてきた供試船を前方 500m、右方 100m の地点で反転して最短時間で止める」という問題について、前節で示した供試船を用いてシミュレーションを実施した。ただし、2点境界値問題に対する最適化問題を解く手法としては、第2章に示した方法ではなく、市販されている非線型計画法を使って解く方法²²⁾を採用した。シミュレーション結果を Fig.5-4 に示す。前節同様上に移動航跡、下に運動時系列を示す。また、Fig.5-5 に各アクチュエータの作動状況を示す。これらの図から供試船は、複数のアクチュエータを効率よく使用しながら滑らかに回頭しながら反転し、目標の地点で停船していることがわかる。

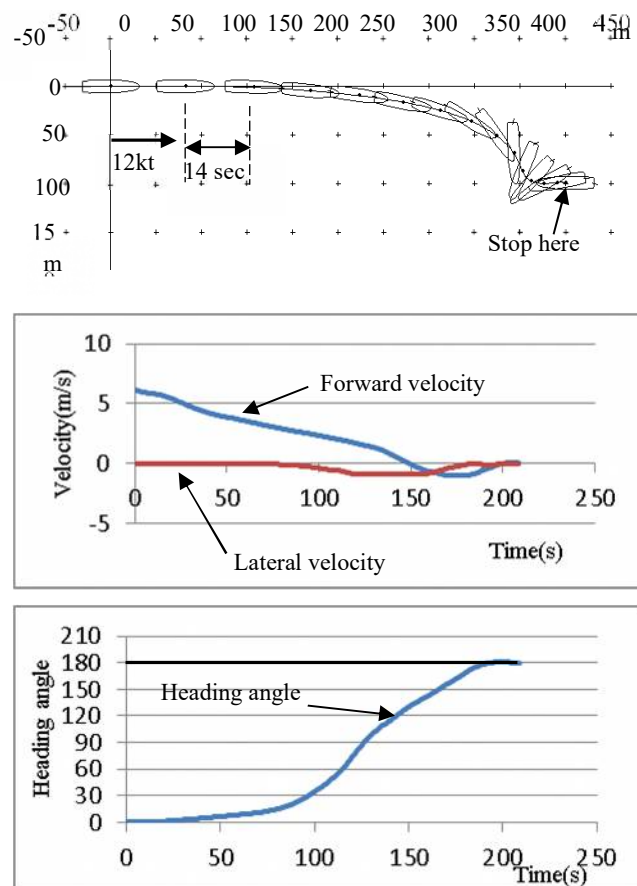


Fig.5-4 Example of maneuvering motion controlled by optimum control theory

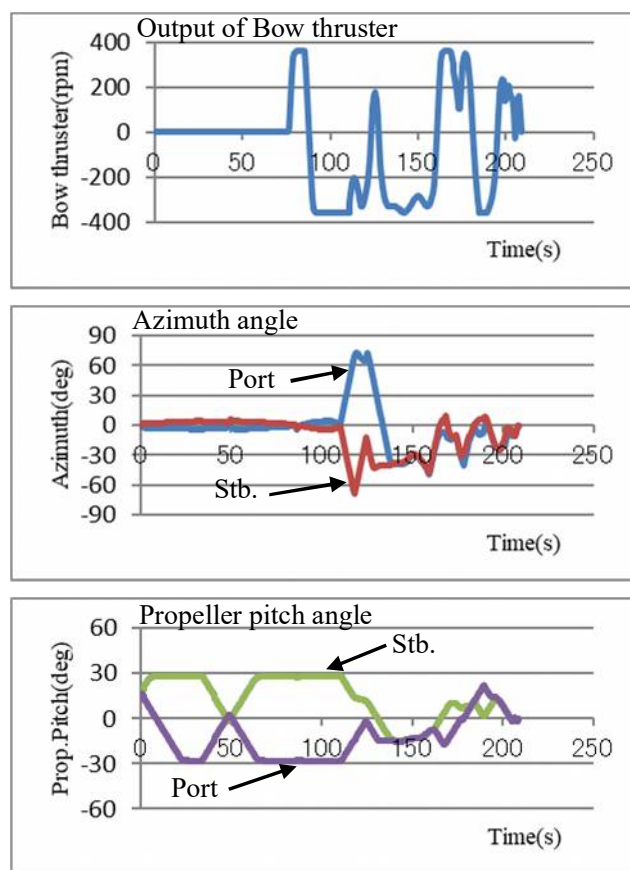


Fig.5-5 Examples of actuator actions controlled by optimum control theory

5.4 結言

疑似逆行列を使って2基の旋回式スラストとバウスラストを有する船の制御系を1入力1出力系に置き換えることができることを示した。本手法を用いることで、

- (1) 多入力多出力系に対しても従来型の古典制御によるフィードバック制御により、操縦運動を制御できることを示した。
- (2) 最短時間操船問題を非線型計画法により解くことができた。今後は最短時間以外の評価関数により種々の操船問題の最適化を図っていく。

第 6 章 結論

本論文では、船舶の操船手順を数学的に導き出すことができれば、操船の最適化と自動化が可能であるという仮定の下に、最適制御理論による操船の最適化と自動化を試みた。その結果、操船問題を数学的に微分方程式の 2 点境界値問題に置き換えて、ある評価関数を最小にするという条件の下に最適化問題を解くことで最適な操船手法が得られることがわかった。すなわち、現在の位置、船速、方位や各アクチュエータの状態から目標とする位置、船速、方位や各アクチュエータの状態までの 2 点間を評価関数として最短時間で結ぶための各アクチュエータの操作方法を数学的に得ることができた。さらに、その結果を用いることで自動的に操船できることを示した。本論文では、

1. 線型制御と非線型制御の得失と適用範囲
2. 操船問題を 2 点境界値問題に置き換える
3. 線型および非線型最適問題を解くための操縦運動モデル
4. 最適解を使った操船の自動化
5. 外乱下での最適操船法の検討
6. 多数のアクチュエータを有する船舶の操船の最適化と自動化

を中心に、操船の最適化と自動化について検討を行った。

第 2 章では、操船に対する非線型最適制御問題を定式化し、数学的に最適な操船方法を見いだした。得られた非線型最適制御手法に対して、非線型解法の利点を明確にするため、変針操船法を例題として非線型解法と線型近似解法の差を示した。さらに、非線型最適制御手法を実用化するために、幅寄せ操船と着桟操船について、最適解を用いた自動操船法を示した。第 2 章で得られた結果は次のようになる。1 次系近似操縦運動モデルを用いれば、線型最短時間制御の解析解が得られるが、操舵機の応答を考慮できないため、転舵時期が遅れる。転舵時期の遅れの影響は、変針角が小さいほど大きい。一方、非線型最適解によると、操舵機の特性を考慮にいった最短時間変針操船は、指令値の符号を 2 回切り換える **Bang-Bang** 制御となる。

線型最適レギュレータの解である状態フィードバック制御を使って、大きな変針を行う場合、舵角の制限を越えないようフィードバックゲインを低くしなければならず、速応性が著しく低下する。非線型最適制御手法の評価関数に最短時間ではなく、線型最適レギュレータの評価関数を用いれば、重み係数の選び方によって、最短時間制御あるいは線型最適レギュレータに近い制御のどちらの制御方法も実現できる。

自動操船法については、幅寄せ操船や着桟操船など予め操船方法がわかりにくい操船について、非線型最適制御手法を用いた最短時間操船方法を得ることができた。この時、最適

解をフィードフォワード情報とし、状態量をフィードバックする制御方法を用いることで、最適解を求めるために用いた数学モデルが、オブザーバーの役目を果たすので、フィードバックする状態変数の数を減らすことができることがわかった。

第3章では、定常風や潮流等の外乱がある場合の最適制御問題について、外乱の定式化を示し、それぞれ例題を解くことにより外乱下における操船法の検討に本手法が利用できることを示した。

実船に適用するにあたり、操舵装置、CPP 駆動装置、スラスト装置等を使用するために考えられる制限事項を各々明らかにし、それらに対応するための応答モデルや信号処理モデルを示した。これらの結果をもとに小型練習船による実海域実験を実施し、実船においても位置を直接フィードバックすること無く、精度良い自動幅寄せ操船が実現できることを示した。しかし、着桟操船ではスラスト推力推定モデルや低速時のモデルの精度が低く、しかも低速で外乱の影響を受け易いため、良好な結果は得られなかった。

操縦運動モデルに外乱の影響を考慮したり、非線型性の高い評価関数を導入するなどの理論的拡張を行ったところ、非線型最適制御問題の解法はこれらの拡張に柔軟に対応することがわかった。また、評価関数に状態量や制御入力に対する制限条件違反をペナルティとして加えることで、種々の制約条件のある問題についても最適解が得られることがわかった。特に、シグモイド関数を利用することにより、オンオフに近い制約条件であっても評価関数に付加できることがわかった。

第4章では、フィードバック制御系に対する制御目標を制御入力と考え、最適制御入力として最適な制御目標を得る方法を示し、非線型最適制御手法を適用することにより解を得ることができた。既存の制御装置に最適な制御目標を与えることで操船を最適化する OCS の考え方を示した。これに基づき、CPP と船首尾スラストによる定点保持を LQR で行うシステムを構築し、OCS の 1 適用例として、定点保持の状態から他の点へ移動する制御を最適化することがわかった。加えて、OCS は、常にアクチュエータの能力以内で制御できるよう制御目標を調整するため、LQR では制御不可能な線型の仮定の範囲を超える大きな運動制御に対しても、制御可能であることがわかった。

第5章では、疑似逆行列を使って2基の旋回式スラストとバウスラストを有する船の制御系を1入力1出力系に置き換えることができることを示した。これにより、従来型の古典制御によるフィードバック制御により、操縦運動を制御できることを示した。最短時間操船問題を汎用されている非線型計画法を解くためのソフトウェアを使って解くことが可能であることがわかった。

以上、本論文では、最も難しい操船の一つである着岸操船などについて最短時間制御法を数学的に明らかにし、実船への適用の可能性を示した。ただし、安全性や他船との遭遇および海域条件などは考慮していないため、このままでは実用的ではない。

最短時間操船は、その船の持つ操縦性能の限界での操船であり操船の客観的な限界である。このことは、逆に目標を安全かつ余裕のあるものに設定すれば、期待通りの成果を得られることを意味する。評価関数の与え方、境界値の与え方などの改良を加え、今後のさらなる最適自動操船の発展に利するものとする。

本研究については、この後、最短時間自動着岸問題に関する研究として、系統的な計算による最短時間操船法の体系化²⁶⁾やタグによって支援されたコンテナ船のような一般の大型船に対する最短時間操船法の導出²⁶⁾、さらには外乱下における最短時間での定点停止法^{27),28)}やニューラルネットワークとの組み合わせ²⁹⁾といった新しい研究へ発展していった。また、近年では、大域的最適化に基づくニューラルネットワークを用いた制御^{30),31)}などの現代制御理論を取り入れた船舶操縦運動の自動化、自律化への足掛かりとなった。

本論文では、オフラインでの計算による最適操船方法とその自動化についての研究について述べてきた。今後は、自律無人操船の実現に向けて、オンラインでのモデル同定やその結果に基づく逐次的な最適操船問題の解法とその結果を用いた自動操船方法について、さらに研究を進める必要がある。

謝辞

本研究は、石川島播磨重工業（株）技術研究所に在籍中に行った研究をまとめたものである。本研究にあたり、貴重な御助言を数多くいただいた石川島播磨重工業（株）技術研究所溝口純敏博士(研究当時)に厚く御礼申し上げます。さらに、研究途中において横浜国立大学助教授上野誠也博士(研究当時)から貴重な御助言をいただいたことに深く感謝いたします。また、実船実験において多数の御便宜、御協力をいただきました東京商船大学練習船「汐路丸」松村尚志船長、堀田敏行機関長並びに乗組員の方々および研究室の方々(いずれも研究当時)に心からお礼申し上げます。なお、本研究は石川島播磨重工業（株）と東京商船大学との共同で行われた研究の一環である。御協力いただいた関係諸氏に厚く謝意を表します。

最後に、公私に渡り多大な尽力と時間を割いて終始親切丁寧なご指導をいただいた、東京商船大学故大津皓平名誉教授、並びに大阪大学長谷川和彦名誉教授に、厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 田古里哲夫、田中厚成、岡本恒、中村明彦：回流水槽における操縦性試験および設定航路自動航法実験（第一報）、日本造船学会論文集、第 126 号、(1969)
- 2) 田中厚成、中村明彦、田古里哲夫：回流水槽における操縦性試験および設定航路自動航法実験（第二報）、日本造船学会論文集、第 128 号(1970)
- 3) 田中厚成、田古里哲夫：回流水槽における操縦性試験および設定航路自動航法実験（第三報）、日本造船学会論文集、第 130 号、(1971)
- 4) 南勝昭、小山健夫：ダイナミックポジショニングシステムにおける線形レギュレータの効果について、関西造船協会誌、第 188 号、(1983)
- 5) 小川原陽一、新宅英司: I L Q 最適サーボ理論による船舶の操縦運動制御に関する研究、日本造船学会論文集、第 170 号、(1991)
- 6) 高井忠夫、大津皓平：汐路丸による自動着岸実験にいて、日本航海学会論文集、第 83 号 (1990)
- 7) H. Yamato, T. Koyama, T. Nakagawa: Automatic berthing using the expert system, Proc. of 2nd Control Application in Marine Systems, Italy, (1992)
- 8) Yamato、 al. :Automatic Berthing By the Neural Controller, Proc. of 19th Ship Control System Symposium, USA, (1990)
- 9) K. Shouji, K. Ohtsu, S. Mizoguchi: An Automatic Berthing Study by Optimal Control Techniques, Proc. of 2nd Control Application in Marine Systems, Italy, (1992)
- 10) 加藤寛一郎：工学的最適制御、初版、東京大学出版会、(1988)
- 11) A. K. Wu, A. Miele : Sequential Conjugate Gradient-Restoration Algorithm for Optimal Control Problems with N on-Differential Constraints and General Boundary Conditions, Part 1, Optimal Control Applications & Methods, Vol. 1, (1980)
- 12) A. Miele、 R. R. Iyer : General Technique for Solving Nonlinear Two-Point Boundary-Value Problems Via the Method of Particular Solutions, Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 5, No. 5, (1970)
- 13) 森田知治他：練習船汐路丸（III）の操縦性能と IMO 操船ブックレット作成例、日本造船学会論文集、第 62 号、(1987)
- 14) 正司公一、石黒剛：港湾内での操縦運動を表す数学モデルについて、関西造船協会誌、第 212 号、(1989)
- 15) K. Shouji, T. Ishiguro, S. Mizoguchi: Hydrodynamic Forces by Propeller and Rudder Interaction at Low Speed, Proc.of MARSIM & ICSM 90, Japan,(1990)
- 16) I. D. Landau : System Identification and Control Design, Prentice Hall,(1990)

- 17) 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）、日本造船学会論文集、第 172 号、(1992)
- 18) 大津皓平、長谷川和彦：オートパイロットの評価と展望、第 3 回操縦性シンポジウムテキスト、(1981)
- 19) 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)、日本造船学会論文集、第 173 号、(1993)
- 20) 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)、日本造船学会論文集、第 174 号、(1993)
- 21) 池田雅夫、須田信英：積分型最適サーボ系の構成、計測自動制御学会論文集、Vol.24、No.1(1988)
- 22) 大津皓平：非線形計画法による最短時間操船の数値解法、日本造船学会論文集、第 196 号、2004
- 23) 野本健作、田口賢士：船の操縦性について(2)、造船協会論文集、第 101 号、(1956)
- 24) 正司公一、長谷川和彦：複数のアクチュエータを有する船舶の操縦運動制御に関する研究、日本船舶海洋工学会講演論文集、第 14 号、2012
- 25) 大島寛ほか：高信頼度知能化船(その 1)～(その 13)、日本造船学会誌、721 号-723 号、(1889-1990)
- 26) 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、日本造船学会論文集、180 号、1996
- 27) 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、日本航海学会論文集、91 号、1994
- 28) K.Ohtsu, K.Shouji, and T.Okazaki. : Minimum-time maneuvering of a ship, with wind disturbances. Control Eng. Practice, Vol. 4, 1996
- 29) 岡崎忠胤、正司公一、水野直樹、大津皓平：ニューラルネットワークによる最短時間操船に関する研究、日本航海学会論文集、97 号、1997
- 30) Atsuo Maki, Naoki Sakamoto, Yuhei Akimoto, Hiroyuki Nishikawa, Naoya Umeda : Application of optimal control theory based on the evolution strategy (CME-AS) to automatic berthing, Journal of Marine Science and Technology 25(1), 2020
- 31) Shoma Shimizu, Kenta Nishihara, Yoshiki Miyauchi, Kouki Wakita, Rin Suyama, Atsuo Maki, Sinichi Shirakawa : Automatic berthing using supervised learning and reinforcement learning, Ocean engineering 265 112553, 2022