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)

 正員正司公一*
 正員大津皓平**

 堀田敏行***

A Study on the Optimization of Ship Maneuvering by Optimal Control Theory (2nd Report)

by Kouichi Shouji, *Member* Kohei Ohtsu, *Member* Toshiyuki Hotta

Summary

In the first report¹), the method to solve nonlinear optimal control problems of ship maneuvering motions is discussed. In this paper, the above theory is extended to the formulations under disturbances from the environment, such as wind and tidal current. Some examples of optimal solutions under some environmental disturbances are shown, and how to operate ship under such conditions is discussed. Then, the mathematical models of actual hardware devices, such as steering gear, CPP and side thruster, are presented under considerations of some limitations of their performances, and some new response functions and constraints functions to take account of the limitations are proposed.

Then, the practical techniques are discussed for the use of the proposed method presented here for the purpose of automatically controlling an actual ship. Using a small training ship, sea trial tests are carried out to confirm the perfomance of the proposed controller. The results show the good performance with less feedback informations than conventional one.

1. 緒 言

第一報"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"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。そして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,設定した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

- * 石川島播磨島工(株)技術研究所
- ** 東京商船大学商船学部
- *** 東京商船大学「汐路丸」機関長

原稿受理 平成5年1月11日 春季講演会において講演 平成5年5月19,20日 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。そして,これらの方法を使った数値 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。第二報では,第一報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。

2. 外乱の定式化

本章では、第一報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

日本造船学会論文集 第173号

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 ュエータの電気的,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 本論文では無視する。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目標とする。し たがって、モデル化誤差はフィードバック制御あるいは人 の判断により修正されることが期待できるので、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。

以上のような理由から本論文では、まず外乱の定常成分の みについて定式化を考え、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 響を調べる。

2.1 定常風の影響

Fig.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.1の記号を使って風圧 力を表すと次式となる。

$$X_{w} = \frac{1}{2} \rho_{a} A_{of} U_{w}^{2} C_{X} \cos \alpha \tag{1}$$

$$Y_{W} = \frac{1}{2} \rho_{a} A_{os} U_{W}^{2} C_{Y} \sin \alpha \qquad (2)$$

$$N_{W} = \frac{1}{2} \rho_{a} A_{os} L_{PP} U_{W}^{2} C_{N} \sin \alpha \qquad (3)$$

ここで、 ρ_a は空気の密度、 A_{os} 、 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 は相対風速、 α は相対風向 を表す。船体固定座標系で測った相対風速と相対風向の関 係は、次式で与えられる。

$$u_{W} = -U_{W} \cos \alpha \tag{4}$$

$$v_{W} = -U_{W} \sin \alpha \tag{5}$$

(4)式と(5)式を(1)式から(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。

$$X_{W} = -\frac{1}{2}\rho_{a}A_{of}C_{X}U_{W}u_{W} \tag{6}$$

$$Y_{w} = -\frac{1}{2}\rho_{a}A_{os}C_{Y}U_{w}v_{w} \tag{7}$$

$$N_{W} = -\frac{1}{2} \rho_{a} A_{os} C_{N} U_{W} v_{W} \tag{8}$$

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。

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

$$(m+m_y)\dot{v}_a + mu_a r = Y_H + Y_R + Y_T + Y_W$$
(10)

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

ここで,

m, mx, my: 質量, 付加質量

Izz, Jzz: 慣性モーメント, 付加慣性モーメント

ua, va, 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_r, N_r:サイドスラスタの横力,回頭モーメント

なお、右辺流体力の詳細については第一報に示されている 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,第一報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を調べた結果をFig.2とFig.3に示す。Fig.2には航跡の比較を示し,Fig.3には舵角と方位角の時系列の比

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)



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



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

較を示す。Fig. 2, Fig. 3 とも無風状態(絶対風速が零)の最 適解を実線で示した。

外乱条件

相対風速:20 m/s, 30 m/s

相対風向:±45°(向風),±135°(追風)

初期条件

オートパイロットにより 12 ノットで定針定速航行 終端条件

位置:500 m 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

所要時間最小(最短時間問題)

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 うに制御すれば、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 いての重要な知見を得ることができ、操船訓練や航路計画 等に利用できるものと考える。

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. 1にあるように、船体固定座標系で測った潮流の流速を uc, vc とすると、船体固定座標系で測った対水速度は次式 となる。

$$u = u_a - u_c = u_a - U_{cx} \cos \Psi - U_{cy} \sin \Psi \qquad (12)$$

 $v = v_a - v_c = v_a + U_{cx} \sin \Psi - U_{cy} \cos \Psi$ (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(9)式から(11)式を書き直すと次式を得る。

 $m\dot{u}_a - mv_a r = -m_x \dot{u} + X_H(u,v,r) + X_P(u)$

$$+X_{R}(u,v,r)+X_{W}(u_{a},v_{a}) \qquad (14)$$

$$m\dot{v}_{a} + mu_{a}r = -m_{y}\dot{v} + Y_{H}(u,v,r) + Y_{T} + Y_{e}(u,v,r) + Y_{Y}(u,v_{e})$$
(15)

$$(I_{ZZ}+J_{ZZ})\dot{r} = N_{H}(u,v,r) + N_{T} + N_{R}(u,v,r) + N_{W}(u_{a},v_{a})$$
(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。

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

 $\dot{v} = \dot{v}_a + r(U_{cx}\cos\Psi + U_{cy}\sin\Psi) = \dot{v}_a + ru_c$ (18)

(17)式と(18)式を(14)式から(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。

$$(m+m_{x})\dot{u}_{a} = (mv_{a}+m_{x}v_{c})r + X_{H}(u,v,r) + X_{F}(u) + X_{R}(u,v,r) + X_{W}(u_{a},v_{a})$$
(19)

$$(m+m_y)\dot{v}_a = -(mu_a+m_yu_c)r + Y_H(u,v,r) + Y_T + Y_R(u,v,r) + Y_W(u_a,v_a) (20) (I_{ZZ}+J_{ZZ})\dot{r} = N_H(u,v,r) + N_T + N_R(u,v,r)$$

 $+N_{W}(u_{a},v_{a})$

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.4 と Fig.5 に示す。Fig.4 には航跡 の比較を示し、Fig.5 には舵角と方位角の時系列の比較を 示している。 潮流条件

日本造船学会論文集 第173号



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

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

流速:2,4,6ノット

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 12 ノット で定針定速航行, Fig.4 に潮速が6 ノットの時に流されな がら航行する場合の航跡を示した。

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

所要時間最小(最短時間問題)

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に向いており、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て いる。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. 実船の制御

第一報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 を受けた場合や第一報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,本法の実船への適用 を前提とした各装置に対する安全等を考慮したモデル化の 方法について述べる。

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。しかし、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は一次遅れと 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、本論文では、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表現し最 適解を求める。

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

(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/Tε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. 6に(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。縦軸に舵角を示 し,各々の目標舵角に対し,実線で(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を示す。横 軸は、目標舵角を指令してからの経過時間を示す。(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。ただし、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. 6から(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,本論文で用いる非線型最適制御問題の 解法を用いれば,制御入力の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

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

最大舵角を想定される制限値より小さくすることで対応で きる。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。

3.2 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(22)式同様のモデル化が可能であ り、次式で与えられる。

 $(|\theta_P^* - \theta_P| T_\theta + a)\dot{\theta}_P + \theta_P = \theta_P^*$ (24)

ここで, 6[#], 6^p は各々指令翼角と実翼角を示し, T₀ は翼 角の変節速度を表す定数である。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,零点に対して非対象な不等式拘束条件を等式拘束条件 に置き換える。次式に,翼角制御入力の最大値に対する拘 束条件を示す。

$$\theta_{Pd} = \frac{1}{2} (\theta_{Pu} - \theta_{Pl}) \sin u_d \tag{25}$$

$$\theta_P^* = \theta_{Pd} + \frac{1}{2}(\theta_{Pu} + \theta_{Pl}) \tag{26}$$

ここで、 θ_{Pu} 、 θ_{Pl} は各々翼角の上限値と下限値を表し、 u_a はダミー入力、 θ_{Pa} が仮の翼角指令値、 θ_s^* が真の翼角指令値を示す。すなわち、(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、(26)式によって(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にソフトウエア側 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(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、(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,その結果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。

日本造船学会論文集 第173号

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。

 $\frac{\theta_{Pa}}{2\pi f_c} + \theta_{Pa} = \theta_P \tag{27}$

ここで、 f_e 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 スラスタ装置

前進船速が大きい状態で船首および船尾スラスタを使用 することは、装置に負担をかけるので、ある船速以上での スラスタ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¹⁰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タの使用を制限す る。

$$I = \int_{0}^{1} \tau \{1 + R_{1} sigm(u - u_{0})(T_{b}^{2} + T_{s}^{2})\} dt$$
(28)
$$sigm(u - u_{0}) = \frac{1}{1 + e^{-W(u - u_{0})}}$$

(シグモイド関数)

ここで、rは終端時刻を表し、 T_s 、 T_b は各々船首と船尾ス ラスタの推力を表す。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項がスラスタ使用によるペ ナルティを表す。また、R1は正の実定数であり、第1項と 第2項の寄与度を決めるパラメータである。w はシグモイ ド関数の重みを示し、入力の u-u。は、u が前進船速、u。 がスラスタ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 uo より小 さい場合には、第2項はほとんど零になり、 uが uoより大 きい範囲では,ほぼ前後のスラスタ推力の2乗の和の R₁ 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,実験当日の船速が и₀より高い範囲でスラスタを使用 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タ使用を制限 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。

4. 実船試験

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 EWS 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、実験当日の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 1 に計測項目と計測方法を示す。

Table 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	Shiojimaru's data acquisition system
CPP blade angle	Do
Wind direction	Do
Wind speed	Do

4.1 制御則

制御則は、第一報で示した方法を用いる。ただし、第一 報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。

$$\delta^{*} = \delta_{0} + K_{1}(\Psi_{0} - \Psi) + K_{2}(r_{0} - r)$$
(29)
$$\theta^{*}_{P} = \theta_{P0} + K_{3}(u_{0} - u)$$
(30)

ここで、 K_1 , K_2 , K_3 は比例ゲイン、添え字 \circ は最適解を示 す。また、スラスタを使用する場合には、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、(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スラスタでも行う。

 $T_b^* = T_{b0} + K_b \{ K_1(\Psi_0 - \Psi) + K_2(r_0 - r) \}$ (31)

 $T_{s}^{*} = T_{s0} - K_{s} \{ K_{1}(\Psi_{0} - \Psi) + K_{2}(r_{0} - r) \}$ (32)

ここで, K_b, K_sは比例ゲインを示す。

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.7とFig.8に示す。

初期条件

オートパイロットにより 12 ノットで定針定速航行 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

```
評価関数
```

所要時間最小(最短時間問題)

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

実験時の天候

a)200 m 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, 6.3 m/s

b) 300 m 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,12.4 m/s Fig.7には200mと300mの幅寄せ操船の航跡を示し, Fig.8には300mの幅寄せ操船における状態量と制御入力 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.7から実船試験においても位置を直接フ

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

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状態量を少なくする ことはできないと考えられる。外乱下における必要なフィ 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。

4.3 着桟操船

以下に示す条件で,自動着桟操船実施した結果を Fig.9 と Fig. 10 に示す。

初期条件

オートパイロットにより 12 ノットで定針定速航行 終端条件

位置:現在地点から現航路上 500 m 前方で 100 m 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

(28)式を用いる。(最短時間問題+スラスタ使用制限) 拘束条件

a)最適解計算時

最大舵角	:	15度
船首スラスタ CPP 翼角	:	15度
船尾スラスタ回転数	:	800 rpm

スラスタ使用船速 :4 m/s 以下

b)フィードバック時

	最大舵角	:	20度
ł	船首スラスタ CPP 翼角	:	20度
ł	船尾スラスタ回転数	:	1000 rpm

スラスタ使用船速 :2 m/s 以下

実験時の天候 気象海象

:晴, moderate

アプローチにおける相対風向風速:-47度, 7.8 m/s

Fig.9には航跡を示し, Fig.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.10の最適解の船首・船尾スラスタの使 用状況を見ると,制御開始後約70秒間は全くスラスタを使 用していないことがわかる。そして,スラスタ使用開始時 刻における最適解の前進船速は,約4.5m/sとなってお り,(28)式の評価関数によりスラスタ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. 10 からわかる

日本造船学会論文集 第173号

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

Fig. 10 Automatic berthing maneuver by proposed controller (status vectors and control inputs)

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。そして、Fig.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、停船点は前後左右と 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、スラスタによるフィードバ 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。 このことは、本船のように小型で船首・船尾にスラスタを有 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を示している。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。

5. 結 言

第一報では,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。本報告では 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 の実用性を示すと共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、設定された例 題の解から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,スラスタ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,実船においても第一報で示したように,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,着桟操船ではスラスタ推力推定モデルや 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) 本報告では,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 拡張を行ったが,第一報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。今後更に様々な要素の定式化を考え,より実用的で 精度の良い最適解を得ると共に実用化のための問題点を克 服する考えである。

最後に本研究にあたり,貴重な御助言を多数いただいた 石川島播磨重工業(株)技術研究所溝口純敏博士に厚く御礼 申し上げます。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 尚志船長以下乗組員の方々および研究室の方々に心からお 礼申し上げます。さらに,本研究の遂行にあたり御援助い ただいた石川島播磨重工業(株)技術研究所藤井克哉副所 長,堤孝行部長ならびに計算解析等に御協力いただいた船 舶海洋関発部の諸氏に感謝の意を表します。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。

参考文献

- 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)
- K. Shouji, K. Ohtsu, S. Mizoguchi : An Automatic Berthing Study by Optimal Control Techniques, Porc. of 2nd Control Application in Marine Systems, Italy, (1992)
- 3) 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)