

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)

正員 正 司 公 一* 正員 大 津 皓 平**

A Study on the Optimization of Ship Maneuvering
by Optimal Control Theory (3rd Report)

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

Summary

In the previous reports^{1),2)}, the method for solving nonlinear optimal control problems of ship maneuvering motions is discussed and the optimal solutions for operating the control devices, such as rudder, CPP and side thruster, are given by them. In this paper, the above method is applied to obtain optimal control references for the feedback control systems. As the closed loop system is driven by the control references, the control reference is regarded as a control input for the closed loop dynamics. Therefore the optimizing technique presented in the previous reports can be applicable. Usually the control references are given by the step function. By using optimal control references instead of the step function, the motion controlled by the feedback system is improved. As the presented method overrides the previous controller, we call it OCS (Override Control System).

Using a small training ship, some numerical simulations are carried out. Then some applications of OCS are shown for the dynamic positioning system controlled by the linear quadratic regulator (LQR). According to the results, the LQR can not be applicable for the nonlinear motion. However, by using the OCS it can be applicable even in the nonlinear region.

1. 結 言

第一報¹⁾, 第二報²⁾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。そして例題として幅寄せ操船と着桟操船を考え, 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。また, 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。さらに, 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。

前報までに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といえる。しかし, 実際の制御に適用することを考えると, 第二報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, 一般商船でも最近ではオートパイロット程度の自動装置は装備されている。第三報では, これらの既存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

* 石川島播磨重工(株)技術研究所

** 東京商船大学商船学部

原稿受理 平成5年7月9日

秋季講演会において講演 平成5年11月9, 10日

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、本論文ではこれを OCS (Override Control System) と呼ぶ。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、前報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、ここでは、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、考察した結果を報告する。

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。ここではまず、「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。本論文では、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、本章では、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。

2.1 線型状態方程式

LQR 理論を適用するため、Fig. 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。

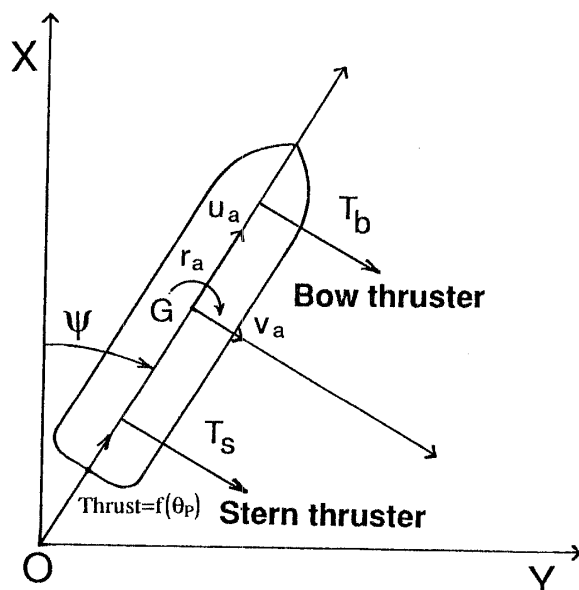


Fig. 1 Co-ordinate systems

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

$$X = Y = \phi = 0 \quad (2)$$

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, ϕ 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仮定する。(()^T は転置行列)

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (3)$$

$$x = (u_a, v_a, r_a, X, Y, \phi)^T \quad (4)$$

$$u = (\theta_p, T_b, T_s)^T \quad (5)$$

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

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

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。

$$y = Cx \quad (8)$$

$$C = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

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³⁾を考える。制御目標を r とし、制御誤差の積分値を w とすると両者は次の関係を持つ。

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

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

$$\begin{pmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{w}_e \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & 0 \\ -C & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_e \\ w_e \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} B \\ 0 \end{pmatrix} u_e \quad (11)$$

$$e = r - y = (-C \ 0) \begin{pmatrix} x_e \\ w_e \end{pmatrix} \quad (12)$$

$$w_e = w - w_\infty \quad (13)$$

この拡大系に対する最適サーボ系は、 Q_1 を半正定、 Q_2 と

R を正定な重み行列とする評価関数

$$J = \int_0^{\infty} (x^T Q_1 x + w^T Q_2 w + u^T R u) dt \quad (14)$$

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。

$$u_e = Fx_e + Gw_e \quad (15)$$

ここで、 F と G は、リカッチ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。 w_{∞} として(14)式を最小にする値を用い、 x, w の初期値を零とす。また、定常外乱の無いシステムでは、 $u_{\infty}=0, x_{\infty}=(0, r)$ となることを考慮すると(15)式は、次式で与えられる³⁾。

$$u = Fx + Gw + Hr \quad (16)$$

ここで、 H はリカッチ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。(16)式の制御則で示される制御系を Fig.2 のブロック線図に示す。具体的な制御則を明らかにするため、(16)式のベクトル表示を、 F, G, H の零要素を無視して、CPP の翼角指令 θ^* 、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式を得る。

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

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

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

ここで、例えば f_{11} 等は、各マトリクスの要素を示す。また、 X_r, Y_r および ϕ_r は、各々 X 座標、 Y 座標および方位角の目標値を表わす。

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 Q_1, Q_2, 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⁴⁾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 100 m の目標変化を与えたときに、アクチュエータに要求される能力が最大

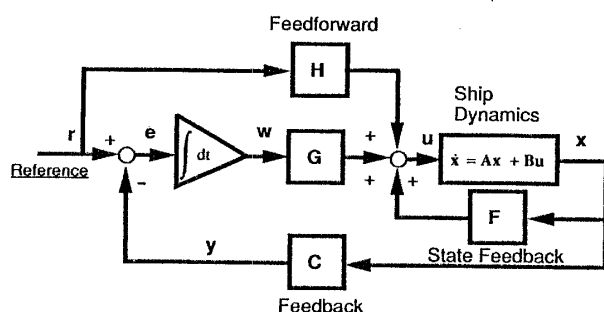


Fig. 2 Block diagram of augmented LQR

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。

3. O C S

OCS は、前章で設定した LQR の上位に位置し、制御目標 r を与える演算部である。本章では、第一報で示した最適制御入力を求める手法を用いて、OCS における最適制御目標を求める方法について述べる。

3.1 OCS の構成

Fig. 3 に OCS と既存の制御装置の関係を示す。Fig. 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、第二報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。

$$(|\theta_{Pr} - \theta^*| T_c + a) \dot{\theta}^* + \theta^* = \theta_{Pr} \quad (20)$$

ここで、 a は制御周期程度の小さな正の定数、 θ_{Pr}, θ^* 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、 $1/T_c$ で与えられる。

さて、Fig. 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、第一報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。前報まででは、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。

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。本報告では、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。第一報の手法を適用するための手順を要約して以下に示す。

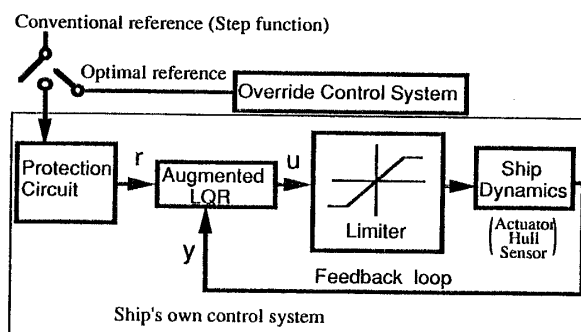


Fig. 3 Configuration of the OCS servo system

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. 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能力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, 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。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, 制御目標に制御値を設け, 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, 第一報で示したように, 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。

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

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

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

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. 制御性能の比較

本章では, 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, 第一報で用いた詳細操縦運動モデル⁵⁾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。なお, 以後簡単のため OCS+LQR システムを単に OCS と呼ぶ。

LQR : 線型状態空間表現, (3)式+制御則(16)式

OCS : 簡易操縦運動モデル²⁾+制御則(17), (18), (19)式

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

性能比較は, CPP と船首尾スラストを用いて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。

4.1 正横への移動

横への移動の制御則として, 100 m 右正横へ移動するケ

ースを考える。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, (17)式から(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 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 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。

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。(17)式から(19)式の制御則を組み込んだ詳細操縦運動モデルに Fig. 4 に示した制御目標を与え, 得られた航跡を Fig. 5 に示す。原点から移動を開始するものとし, 上段が OCS, 下段が LQR による制御結果の航跡である。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. 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つ

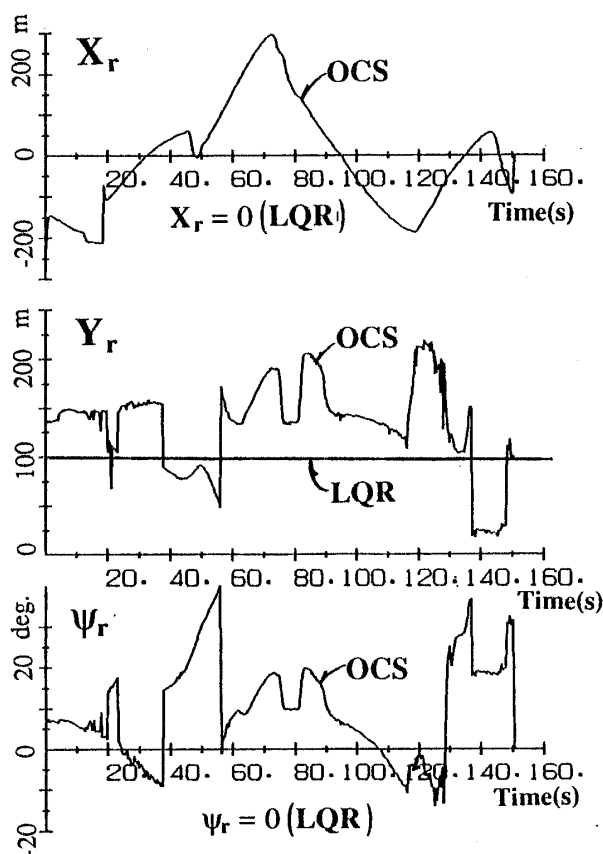


Fig. 4 Time histories of control references by LQR and OCS during moving to (0, 100)

たまま正横に移動しているのに対し、OCS では斜航角が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。一般に、斜航角が大きいほど船体抵抗は大きく、船体を動かすために大きな力を必要とする。OCS による制御では、抵抗を低く押えるよう船首方位角を制御し、合理的で効率の良い移動をしていることがわかる。

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定点保持問題の場合、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. 6 に示す。左側の図が、 $(X, Y) = (100 \text{ m}, 100 \text{ m})$ への移動の場合であり、右側が $(200 \text{ m}, 200 \text{ m})$ への移動を試みた場合である。 $(200 \text{ m}, 200 \text{ m})$ 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から、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。

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. 7 に示す。LQR のみで制御した場合とは異なり、 $(200 \text{ m}, 200 \text{ m})$ 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. 8 に示す。左側に $(100 \text{ m}, 100 \text{ m})$ への移動時、右側に $(200 \text{ m}, 200 \text{ m})$ 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、 $(100 \text{ m}, 100 \text{ m})$ と $(200 \text{ m}, 200 \text{ m})$ への移動に対して、各々 X 座標の制御目標の最大値を 150 m および 250 m 以下に制限している。

Fig. 7, Fig. 8 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

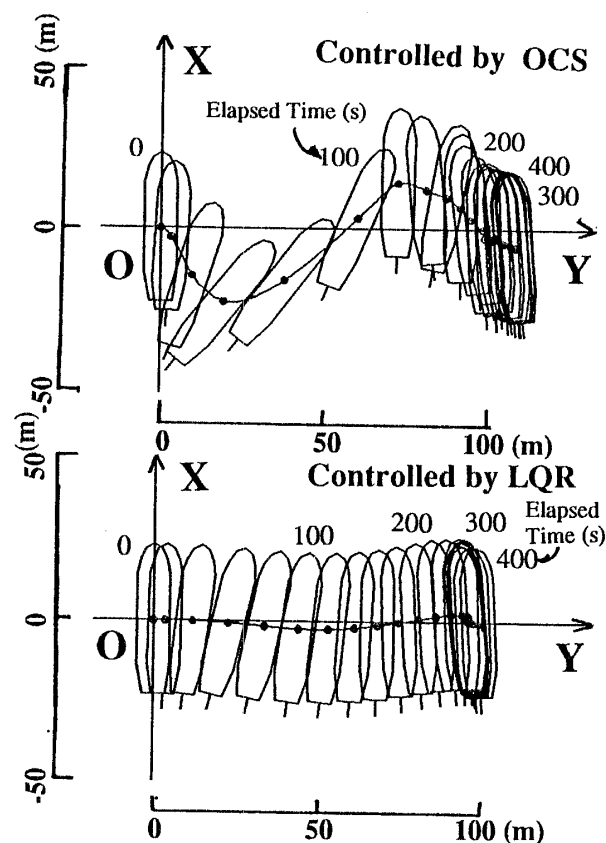


Fig. 5 Comparison of ship's trajectory controlled by LQR and OCS

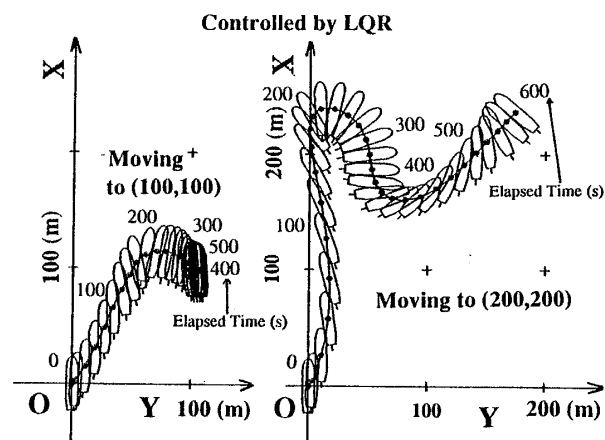


Fig. 6 Ship's trajectory controlled by LQR

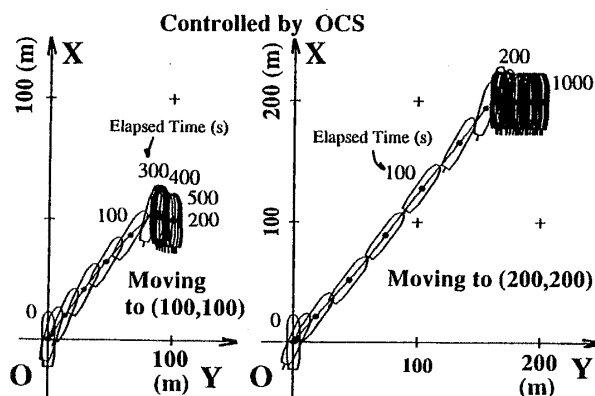


Fig. 7 Ship's trajectory controlled by OCS

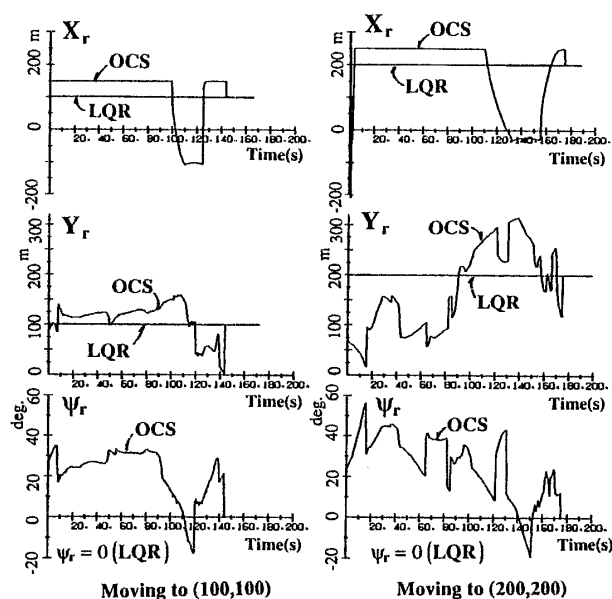


Fig. 8 Time histories of control references by LQR and OCS during moving to point (100, 100) and (200, 200)

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。

5. 結 言

前報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。そして、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、第一報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。そして、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。

(5) 評価関数を変えることで、最短時間問題以外の OCS を構築することができる。また、ここでは、供試船を「汐路丸」としたが、高速艇や一般商船についても適用可能である。今後このような船舶についても適用範囲を広げる必要がある。

(6) 本報告では、定点保持問題を考えたが、前報までで扱ってきた幅寄せ操船や着浅操船等への応用が考えられる。また、風や潮流などの外乱下での問題も取り扱うことができる。今後、種々の操船方法に対する理論的拡張や実船への適用を考えより実用的なものとする必要がある。

最後に本研究にあたり、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に厚く御礼申し上げます。また、本研究の遂行にあたりご援助いただいた、石川島播磨重工業(株)技術研究所藤井克哉前副所長、堤孝行前部長および計算解析などにご協力いただいた船舶海洋開発部の方々に心から感謝の意を表します。また、本研究は、石川島播磨重工(株)と東京商船大学との共同研究で行なわれた研究の一環である。ご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

- 1) 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)
- 2) 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)
- 3) 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)
- 4) 小川原陽一, 新宅英司: ILQ 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)
- 5) 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 162 号, (1987)
- 6) 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)