A Study on Optimal Control of Ship Propulsion Systems

○学 三塩 亮一 (神戸市立高専) 正 加島 正 (神戸市立高専)

Ryoichi MISHIO, Kobe City College of Technology, Gakuenhigashimachi8-3, Nishi-ku, Kobe
Tadashi KASHIMA, Kobe City College of Technology

A ship propulsion system shows complex dynamic behaviors and consideration of dynamic characteristics is indispensable for development of effective control system. In this paper, the propulsion system is mathematically modeled and an optimal control scheme is formulated in order to transit the system in shorter time under proposed performance criterion. Finally, system simulations are conducted and advantages of the propose control system have been quantitatively evaluated.

Keywords: Propulsion System, Optimal Control

1.はじめに

船舶の推進に関する主要な要素のエンジン部および軸系を含むプロペラ部、船体部を統合して船用推進システムと呼ぶ。現在、船用推進システムに関する研究の多くはエンジンを主体とした制御について議論している⁽¹⁾。しかし、エンジンの応答は船体部に比べ非常に早い⁽²⁾、エンジンが目標値に達したとしてもシステム全体が平衡状態に達していないという現象が生じる。従って、システム全体の制御性能の向上を図るためには船体部の動特性を考慮する必要がある。

本研究では船体部を含めた枠組みで船用推進システムの最適制御について論じる。まず、各々の要素の応答特性を考慮して、エンジン部とプロペラ部を静的システムとみなし、船体部を動的システムとしてシステムモデルを構築した。次に評価関数を定義し最適制御問題として定式化した。さらに、船速を従来よりも短時間で増速するための制御法を提案し、これらの問題の解法のために最適解探索アルゴリズムを構築した。また、シミュレーションを行い、本研究で提案する最適制御システムが適切に動作することを確認した。最後に、その成果を既存の制御システムに適用することにより制御性能を大きく向上することを示した。

2.システムモデル

船体部は運動を1自由度に限定し、風圧力などの流体抵抗以外の外力を無視すると

$$\dot{v} = \frac{1}{M} \{ t_p (1 - t_d) - R \} \quad (1)$$

と表現できる。ここで v および M , t_p , t_d , R はそれぞれ船速 m/s および船体質量 kg, プロペラスラスト N, スラスト減少率, 船体抵抗 N, である。プロペラ回転速度と船速の関数で決まるプロペラスラストは

$$t_p = K_t \rho D^4 n^2 \quad (2)$$

と表される。ここで ρ , D , n はそれぞれ海水密度 kg/m³, プロペラ径 m, プロペラ回転速度 rps である。またトルク係数 K_t は線形近似すると、

$$K_t = -0.4227J + 0.3331 \quad (3)$$

となる。なお、 J は前進係数であり

$$J = \frac{v(1-w)}{nD} \quad (4)$$

と定義され、ここで w は伴流係数である。結局、船体の流体抵抗が船速の2乗に比例すると考えれば、式(1)は、

$$\dot{v} = c_1 v^2 + c_2 v \omega + c_3 \omega^2 \quad (5)$$

となる。ここで ω はプロペラの回転速度 rad/s である。また c_1 , c_2 および c_3 は推進システムの諸元を式(1)~(4)に代入して得られる定数である。なお、エンジン部やプロペラ部の応答性は船体部に比べ非常に小さいため、両者ともに静的システムとみなした。次にシステム入力 u を、

$$\dot{\omega} = u \quad (6)$$

と定義し、回転加速度変化最小規範に基づく制御システムについて考察する。

3.最適制御問題

3.1 定式化

船用推進システムの運動は式(5)と式(6)で表現でき、状態変数を $x = (x_1, x_2)^T = (v, \omega)^T$ と定義すると、

$$\dot{x} = f(x, u) = \begin{bmatrix} c_1 x_1^2 + c_2 x_1 x_2 + c_3 x_2^2 \\ u \end{bmatrix} \quad (7)$$

となる。

次に、プロペラの回転加速度変化を最小とする制御システムを構築するため、評価関数を、

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{t_f} u^2 dt \quad (8)$$

と定義し、ここで t_f は制御時間 sec である。さらに、最適軌道を得るために随伴係数 $\lambda = (\lambda_1, \lambda_2)^T$ を用いてハミルトン関数を、

$$H = u^2 + \lambda_1 (c_1 x_1^2 + c_2 x_1 x_2 + c_3 x_2^2) + \lambda_2 u \quad (9)$$

と定義する。このとき、

$$\frac{\partial H}{\partial u} = 0, \quad \dot{\lambda}^T = -\frac{\partial H}{\partial x}, \quad \text{and} \quad \dot{x} = \frac{\partial H}{\partial \lambda} \quad (10)$$

及び状態量の初期条件 $x(0) = (x_1(0), x_2(0))^T$ と状態量の終端条件 $x(t_f) = (x_1(t_f), x_2(t_f))^T$ で決定される最適入力を満足するのが最適軌道である。

3.2 最適解探索アルゴリズム

初期条件として与えられる $x(0)$ および任意に設定した制御時間 t_f と随伴係数 $\lambda_0 = (\lambda_{01}, \lambda_{02})^T$ の初期値を用いて式(10)の微分方程式の数値解を得る。ここで得られる終端時間での状態 $x_f = (x_{1f}, x_{2f})^T$ が初期条件で与えられる $x(t_f)$ とは異なるので、その誤差を、

$$\begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{1f} - x_1(t_f) \\ x_{2f} - x_2(t_f) \end{pmatrix} \quad (11)$$

Fig.2 Trajectory

Fig.3 Engine torque

とおく. 次に, 一般に設定されているエンジンのトルク限度以内で船速を最短時間で目標値まで加速する制御について考察する. まず, 任意時間での状態 x よりエンジントルク $q_e(\dot{\omega}(t), \omega(t), v(t))$ を求める. そのときのプロペラ回転速度に対するトルク限度を $q_{elim}(\omega(t))$ とし, 両者の差の最小値を

$$\varepsilon = \min \{ q_{elim}(\omega(t)) - q_e(\dot{\omega}(t), \omega(t), v(t)) \} \quad (12)$$

とおく. このとき $(e_1, e_2, \varepsilon)^T$ は λ_0 と t_f の関数と考えることができるので, $(e_1, e_2, \varepsilon)^T$ を 0 にするための λ_0 と t_f の変化量 $\Delta\lambda_0$, Δt_f を

$$\begin{pmatrix} \Delta\lambda_{01} \\ \Delta\lambda_{02} \\ \Delta t_f \end{pmatrix} = - \begin{pmatrix} \frac{\partial e_1}{\partial \lambda_{01}}, \frac{\partial e_2}{\partial \lambda_{02}}, \frac{\partial \varepsilon}{\partial t_f} \end{pmatrix}^{-1} \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \varepsilon \end{pmatrix} \quad (13)$$

として近似することができる.

4. シミュレーション結果と考察

提案する最適制御システムの性能を定量的に確認するために船のモデルを次のように設定した.

排出量: 70,000ton, 最大船速: 14.5knot, 主機最大出力: 11,800ps, 主機最大回転数: 115rpm, 船体質量: $7.56 \times 10^7 \text{kg}$, プロペラ径: 6.2m, プロペラと軸系の慣性モーメント: $45,000 \text{kgm}^2$, 軸系効率: 0.97, 伴流係数: 0.4, スラスト減少率: 0.18, 流体抵抗係数: $1,409.1 \text{Ns}^2/\text{m}^2$

このモデルをもとに 25%MCR から 50%MCR と 50%MCR から 85%MCR への増速したときの最適軌道を求めた.

実際の船用推進システムは, エンジンの回転速度を制御量とする PID 制御を行っている. そこで, プロペラ回転速度の最適軌道を入力としたときに実機で適性に動作するかを確認する. そのために, PID 制御の推進システムモデルで 25%MCR から 50%MCR と 50%MCR から 85%MCR へ増速時の各々のシミュレーションを行う. また, ステップ参照入力の PID 制御で船速を増速したときのシミュレーションを比較のために行った.

従来の制御では, ステップ参照入力に対してプロペラ回転速度を制御量としている. このときプロペラの動特性は船体に比べ応答が極端に速いため, 50(s)以内に整定する. また, 船速は 25%MCR から 50%MCR へ増速するときの必要な増速量に対して 70%しか到達できなかった. この場合, システム全体が整定に至るまでは 1100(s)以上かかることがわかった.

一方, 提案する制御方式では, 従来の制御方式よりも滑らかに変化していることから加速度を飛躍的に抑えることができる. また, 25%MCR から 50%MCR と 50%MCR から 85%MCR にそれぞれ増速したときの整定時間は, 従来に比べ非常に早く前者では 392(s), 後者では 863(s)となった. これより船速を従来の制御法よりも早い時間で所定の船速へ増速できることがわかった.

参考文献

- (1) 田村直樹, 岸本功, 前田隆義, 佐藤勲, “電子ガバナ制御パラメータ最適化システムの開発”, 日本船用機関学会誌 vol.24, No.6, 1989
- (2) Tadashi Kashima, A.Seireg, "A Computer Control System for Ice-Transiting Ships", Proceeding of OMAE International Symposium Vol.I, pp.25-30, 1986