

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 5 日現在

機関番号：13903

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24560987

研究課題名(和文) 多変数適応極値制御手法による船舶エンジンの最適化制御

研究課題名(英文) Optimizing Control of Main Engines of Ship by Multivariable Adaptive Extremum Control Technique

研究代表者

水野 直樹 (Mizuno, Naoki)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：30135404

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：荒天下を運航する船舶では、高波によりエンジン回転数が大幅に増減幅し、エンジンの故障する危険性がある。その対策として現在はエンジン回転数を最低限度まで下げる方法が採られているが、この方法には燃料消費量が増加する問題点が存在した。そこで評価関数を最適化することにより、エンジン回転数増減幅と燃料消費量増加の双方を防ぐ制御方法が検討されている。

本研究では、この最適化手法として適応極値制御手法、直接探索法を梃とするとともに、逆2次補間を用いた直接探索法を提案した。これらの手法の評価を、種々の海象条件を模擬した条件でシミュレーションによって評価し、提案手法の有効性を確認した。

研究成果の概要(英文)：In this research, we consider an optimization problem of control system of marine engine.

First, a parameter optimization scheme, based on the adaptive extremum method and hill-climbing technique are considered for marine engine control system. The structure of marine engine control system is based on PID compensator and internal model for wave disturbance with dumping factor. Next, a parameter optimization scheme based on hill-climbing technique is extended to improve the convergence speed and stability of convergence. Finally, the model based evaluation and tuning of proposed optimizing scheme is investigated. The effectiveness of the proposed scheme is evaluated by computer simulations under various sea conditions.

研究分野：制御工学

キーワード：最適化制御 多変数最適化 エンジン制御 船舶制御

1. 研究開始当初の背景

既存のエンジンの燃費改善を行う可能性の一つとして、エンジンの特性を数式モデル化し、そのモデルに基づき、有効性の知られた「最適制御手法」に基づく制御系設計を行って既存の制御装置を置きかえることで燃費低減化を図る手法が国内外で試みられていた。これはエンジンを従来の制御手法より最適な状態で稼働させ燃費を改善することを目的としているが、実際の船舶エンジンの特性は運転状況や環境条件によって変化し、予め決定したモデルに基づいて設計された制御装置ではすべての運転状況に対して最適な運転状況を実現することは困難であると考えられた。さらに、個別のエンジンでどこまで燃費低減化が可能かは諸条件に依存して事前に把握することが困難であるため、設計した制御装置が非現実的なものになってしまう可能性があった。

これに対して、エンジンが実際に運転されている状態で評価関数に基づく数値最適化を実行できれば、エンジン特性や環境条件の変化に対応して制御装置が修正され、により直接燃費を改善可能であると着想した。このような手法は、「最適化制御」として知られているもので、過去にも最適制御と同様に制御性能を向上させる手法として注目されていた時期があった。

しかしながら、制御系全体の安定性の解析が必ずしも容易ではなかったため、その後は理論解析の進んだ適応制御理論や対象特性の変化を考慮したロバスト最適制御理論などに注目が集まり、制御理論研究のなかで大きな発展もなく近年に至っていた。しかし、最近になって「制御パラメータの摂動によって生じる評価関数の増減に基づいてパラメータを自動調整する手法」を適応制御理論の観点から見直す「適応極値制御理論」の研究が発表され、再度注目を集めるようになった。

適応制御理論を基礎とした考え方の導入で、従来は経験的に設定されていた最適化制御の設定パラメータを体系的に設定することができるのと同時に、各パラメータの設定と性能の関係の明確化が期待できると考えた。

2. 研究の目的

本研究は、図1に示すような波浪中を航行する船舶に対して、最近急速に要求が高まりつつある船舶エンジンの燃費低減問題に新しい「最適化制御」手法を開発し、既存のエンジンの燃費を可能な限り高めることを目指すものである。



図1 波浪中を航行する船舶

船舶エンジンの燃費を本質的に改善する方法としては、低燃費の新エンジンを開発し、既存のエンジンと置きかえることが考えられるが、その実施には多大な時間や費用を要するだけでなく、機器のライフサイクルを見たCO2低減の観点からはすべての船舶に実施可能とは言えない。それに対して、新しい制御理論や高性能化した組み込みコンピュータを前提とした本研究はコストの削減や資源の有効利用をも同時に目指すものである。

3. 研究の方法

本研究では、これまでに行ってきた研究を基に、まず評価関数の計算(測定)に遅れの存在する場合に対応可能なアルゴリズムを構築し、その応用として船舶エンジンの燃費低減を実現する改良型多変数適応極値制御系実現法の検討を行った。つぎに、シミュレーション評価によって制御アルゴリズムの性能評価を定量的に行えるようにするため、エンジンモデルパラメータを最適化ソフトウェアによって最適化する。最適化したエンジンモデルを用いたアルゴリズムの評価のうち実験によってその有効性を評価する予定であったが、実験対象として予定していた船舶のエンジン制御システムが変更になり、実験は不可能となった。そのため、実際の船舶のエンジンの挙動を十分に再現できる非線形モデルを対象として、実用的最適化アルゴリズムの開発、評価を行った。

採用したモデルは、図2のような構成であり、大きく分けるとエンジンおよび船体系のブロックからなっている。

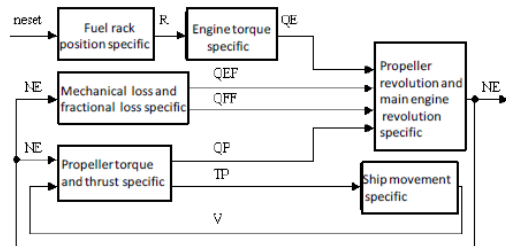


図2 エンジン 船体系モデル

4. 研究成果

4.1 適応極値制御手法の設計法の改善

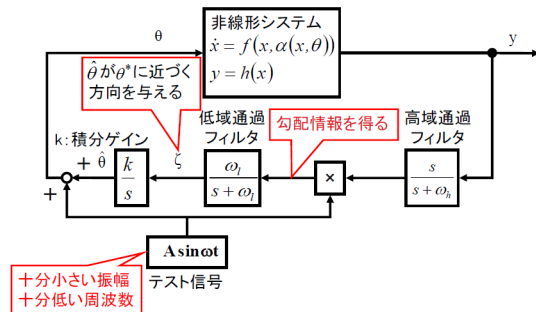


図3 適応極値制御系の基本構成

適応極値制御系の基本構成は、図3のようになっている。

ここで、 $s/(s + \omega_h)$ ：高域フィルタ、

$\omega_l/(s + \omega_l)$ ：低域フィルタ、 k ：積分ゲインである。

図3の制御系は以下の式で表わされる。

$$\dot{x} = f(x, \alpha(x, \hat{\theta} + a \sin \omega t)) \quad (1)$$

$$\dot{\hat{\theta}} = k\xi \quad (2)$$

$$\xi = -\omega_l \zeta + \omega_l(y - \eta) a \sin \omega t \quad (3)$$

$$\dot{\eta} = -\omega_k \eta + \omega_k y \quad (4)$$

この制御系の基本的なアイデアはシステムの制御信号（最適化するパラメータ）に正弦波状のゆっくりとした摂動信号 $a \sin \omega t$ を加え、その応答波形を出力側で観察することにより対象となる非線形システムの勾配情報を入手し、最大となる点 θ^* の推定値 $\hat{\theta}$ を θ^* の方向に修正するというものである。

摂動信号はパラメータの最適値 θ^* の両側で出力 y 周期的な応答を与える。高域フィルタ $s/(s + \omega_h)$ により y の直流成分を除去した信号と $a \sin \omega t$ は、前述の仮定から $\hat{\theta} < \theta^*$ なら同相、 $\hat{\theta} > \theta^*$ なら逆相となる。この2つの（近似的な）正弦波の積から低域フィルタ $\omega_l/(s + \omega_l)$ により、直流成分 ξ を抽出する。この直流成分 ξ が積分器 $\hat{\theta} = k/s\xi$ で積分されることにより $\hat{\theta}$ が θ^* に近づく方向に修正されるが、そこでは、テスト信号を加えた際に変化する制御性能を表す評価値が直接、遅れなく観測可能と仮定している。

しかし、多くの実際のシステムでは性能に関する評価値が直接観測できることは少なく、多くの場合、観測可能なシステムの動作変数を用いた評価関数を用いることが多い。

この評価関数として、本研究では波浪によって影響を受けるエンジンの回転数変動と回転数変動を抑えるためにエンジンに加える燃料の変化分からなる図4で示される検出器で得られる評価関数を提案した。

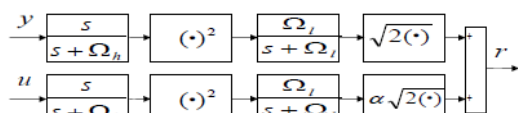


図4 エンジン回転数変動と燃料量変化の振幅を検出する評価関数

ここで、 r は燃料量変化に対する重みで、この重みを適切に設定し、制御装置のパラメータを最適化することで、制御誤差と制御に必要なエネルギーのバランスを考慮した制

御が期待できる。しかし、評価の遅れがあることや、ここで考慮している波浪外乱が周期的・かつ継続的な外乱であることを考慮した改良型の適応極値制御系を提案した(図5)。

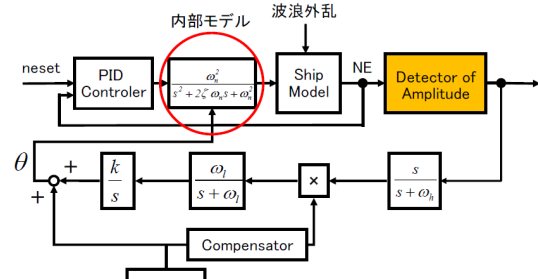


図5 改良型適応極値制御系

提案の手法は、評価関数の検出遅れを補償する「Compensator」を導入するとともに、制御系内に周期的な外乱の内部モデルを備えることで、最適化過程が不安定化することを防ぎ、また、簡単なPID制御装置でも定常的なエンジン回転数変動を十分に抑制できることを達成した。図6に典型的な最適化過程を示す。

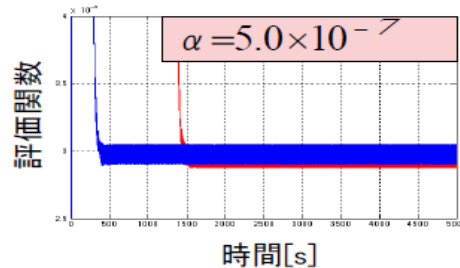


図6 最適化過程例

図中、青線は試行錯誤で最適化したPID制御による評価関数値を、赤線は提案の適応極値制御手法で最適化を行った際の評価関数値の変化を示す。

図から明らかなように、提案手法を用いることで試行錯誤による最適化以上の性能が自動的に得られることが分かる。

4.2 直接探索法による制御系の構成

前節で述べた極値制御手法による制御系は、1変数の最適化を基本としており、PIDゲインを同時に最適化することは困難である。そこで、複数のゲインを自動調整する方法として、直接探索法に基づいたパラメータの最適化手法も検討した。パラメータ調整の具体的な方法は可調整パラメータ（比例ゲイン K_p と微分ゲイン K_d を可調整とした。船舶主機関制御においては、外乱が定期的に加わる条件を考えるため、積分ゲイン K_i は一定値とした。）に、計画的な摂動を与え、パラメータが増加した区間、減少した区間、それぞれ先の評価関数値を実測し、その両者を比較して、パラメータ摂動の中心値を逐次修正するというものである。このとき、2つの制御パラメータに対する評価関数の形は図7に示

すような凸関数となっていた。

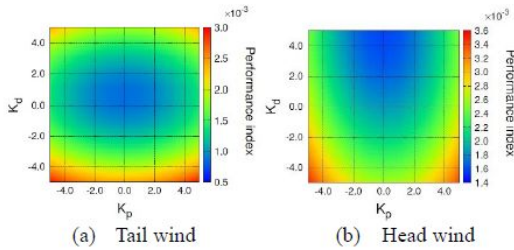


図7 評価関数の形態 (a)追い風(b)向かい風)

このような評価関数の形態を前提としたパラメータ調整法の概念図を図8に示す。

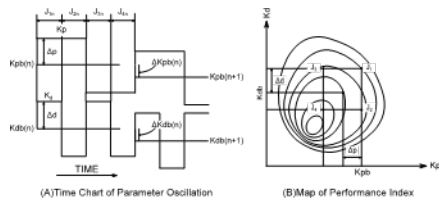


図8 直接探索法による複数パラメータの最適化

なお、パラメータ調整は次式である。

$$k_{pb}(n+1) = k_{pb}(n) + G_p [(J_3(n) + J_4(n)) - (J_1(n) + J_2(n))] \quad (5)$$

$$k_{db}(n+1) = k_{db}(n) + G_d [(J_3(n) + J_4(n)) - (J_1(n) + J_3(n))] \quad (6)$$

ここで K_{pb} 、 K_{db} はそれぞれ比例ゲイン、微分ゲインの摂動の中心値で、 J_i は図8の各区間における評価関数の実測値である。また G_p 、 G_d は正数のゲインで、 n は n 回目の試行であることを示す。

この手法を用いた場合の典型的な最適化過程は図9のようになる。

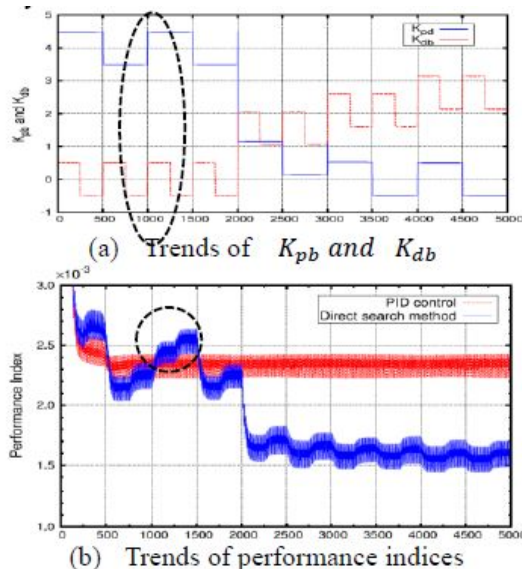


図9 直接探索法による最適化過程

本研究では、図9中のパラメータ摂動と評価関数の時間的変化(動特性)を図10に示すように1次遅れ系でモデル化し、そのパラメータを最小2乗法で推定することで、パラメータ調整式における評価関数値の整定時間を決定する手法を提案した。この手法によると、動特性を持つ評価関数を用いた直接最適化における不安定化を避けることができる。

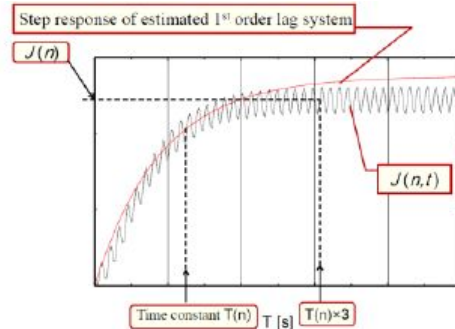


図10 最小2乗法による評価関数整定時間の推定

図11に提案手法による種々の条件下における最適化過程を示す。

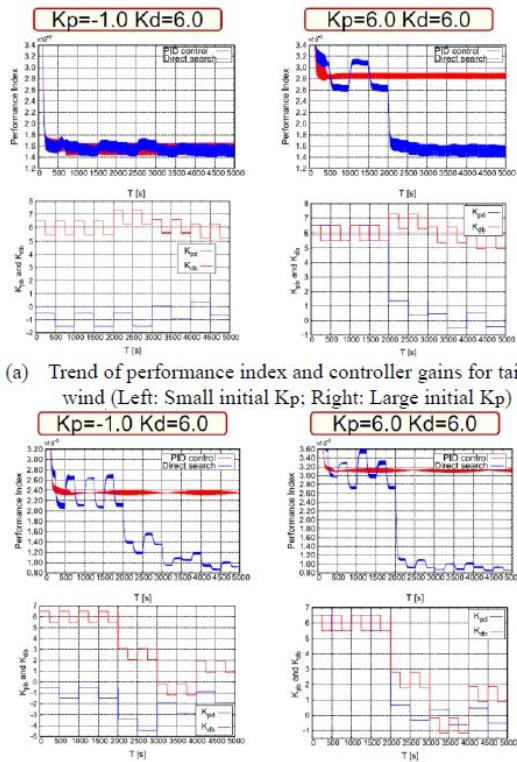


図11 異なる初期制御パラメータ,異なる外乱風向に対する最適化過程

この時の制御パラメータの挙動は図12のようになっており、初期値によらずほぼ一定の最適値に収束していることが分かり、提案手法の有効性が確認できた。

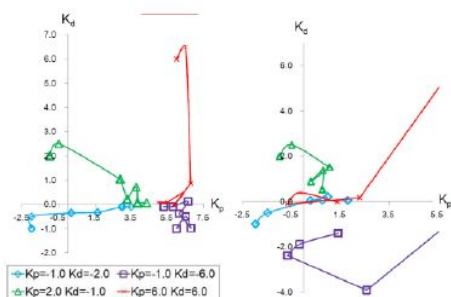


図 12 制御パラメータの挙動 (左: 追い風, 右: 向かい風)

4.3 逆 2 次補間法による直接探索法の改善

前節で述べた, 評価関数の整定時間推定機構を含む直接探索法による最適化制御系は, 多くの場合に有効であることが, 広範なシミュレーションによって確認できたが, 条件によっては収束に長時間を要したり, また, 外乱である波高が大きく変化した場合に最低化過程が不安定化することが見出された.

そこで, 評価関数が本研究で対象とする条件下で凸関数となることから, 評価関数のある断面を 2 次関数で近似して最適点を予測する逆 2 次補間法によるアルゴリズムの改善を試みた. 図 13 に逆 2 次補間法の原理を示す.

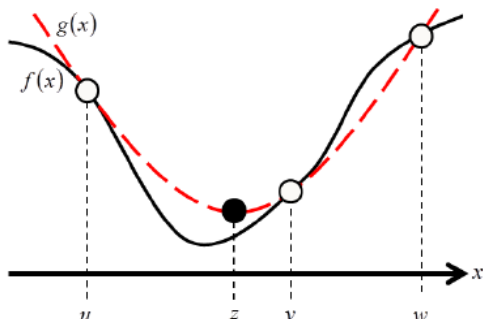


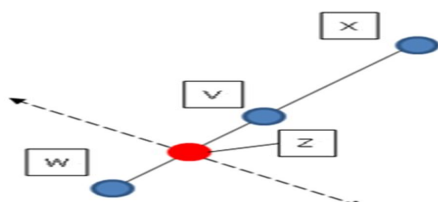
図 13 逆 2 次補間法の原理

図中, 黒の実線は実際の評価関数の断面を, 赤の破線は 3 点の評価関数値に基づき決定した 2 次関数 (表関数の会場の推定) を表し, この推定 2 次関数から推定最適点 z () を

$$z = v - \frac{1}{2} \frac{(v-u)^2 [g(v) - g(w)] - (v-w)^2 [g(v) - g(u)]}{(v-u)[g(v) - g(w)] - (v-w)^2 [g(v) - g(u)]}$$

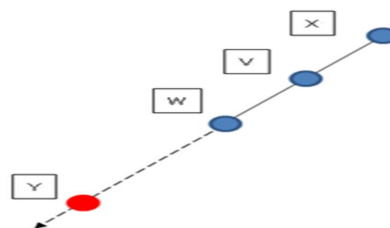
として予測する.

具体的な最適化アルゴリズムでは評価した 3 点の評価関数値に応じて



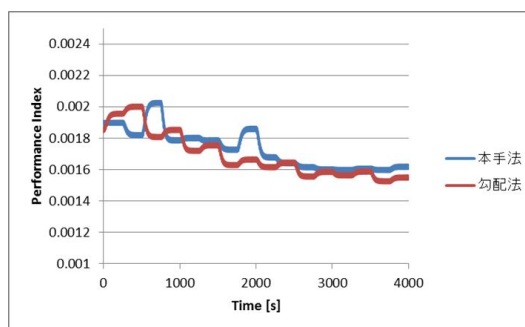
(a) $V < X$ かつ $V < W$ の場合

の場合には逆 2 次補間法により最適点を予測してパラメータを調整.

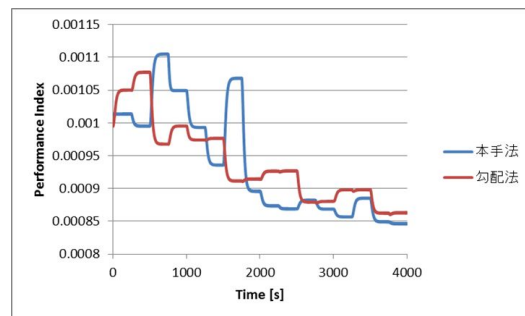


(b) $W < V < X$ または $X < V < W$ の場合には評価関数値の小さい方向への探索を実行するアルゴリズムを提案した.

提案のアルゴリズムを用いた場合の典型的な最適化過程 (波高 1.4m) を通常の直接探索法 (勾配法) と比較して図 14 に示す.



(a) 追い風



(b) 向かい風

図 14 逆 2 次補間法を導入した最適化過程

この例では, 両手法とも最適化が達成できているが, 波高が高い場合 (波高 5.5m) には図 15 に示すように本手法が有効であることが確かめられた.

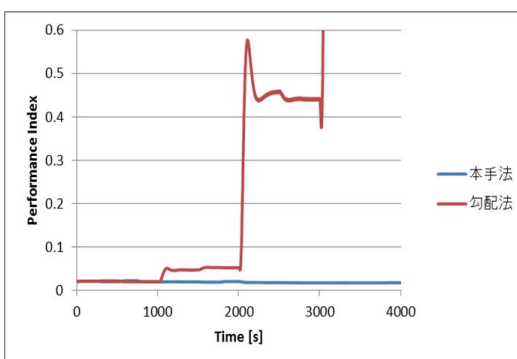


図 15 外乱が大きな場合の最適化過程

5. 主な発表論文等
(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計1件)

Naoki Mizuno, Naofumi Tsuduki and Takuya Tsuji, Design and Model-Based Evaluation of Optimizing Scheme for Control System of Main Engines of Ships in Rough Seas ,Proceedings of SICE 2015, 査読あり, CD-ROM, 2015, TuC09-1

〔学会発表〕(計3件)

中井祥平, 水野 直樹, 適応極値制御手法による船舶主機関制御系の設計, 日本機械学会東海支部第63期総会・講演会, 2014年3月18日~19日, 大同大学

都築尚史, 水野 直樹, 最適化制御手法による船舶主機関制御系の設計と評価, 日本機械学会東海支部第64期総会・講演会, 2015年3月13日~14日, 中部大学

Naoki Mizuno, Naofumi Tsuduki and Takuya Tsuji, Design and Model-Based Evaluation of Optimizing Scheme for Control System of Main Engines of Ships in Rough Seas, 34th Chinese Control Conference and SICE annual Conference 2015, 2015年7月28日~7月30日, InterContinental Hangzhou Hotel

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ等 なし

6. 研究組織

(1)研究代表者

水野 直樹 (MIZUNO NAOKI)

名古屋工業大学・大学院工学研究科・教授

研究者番号: 30135404