

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6900034号
(P6900034)

(45) 発行日 令和3年7月7日(2021.7.7)

(24) 登録日 令和3年6月18日(2021.6.18)

(51) Int. Cl.	F I	
FO2D 45/00 (2006.01)	FO2D 45/00	372
FO2D 13/02 (2006.01)	FO2D 45/00	362
FO2D 41/04 (2006.01)	FO2D 45/00	364A
	FO2D 45/00	368F
	FO2D 13/02	G
請求項の数 17 (全 22 頁) 最終頁に続く		

(21) 出願番号 特願2017-140205 (P2017-140205)
 (22) 出願日 平成29年7月19日(2017.7.19)
 (65) 公開番号 特開2019-19783 (P2019-19783A)
 (43) 公開日 平成31年2月7日(2019.2.7)
 審査請求日 平成30年11月6日(2018.11.6)
 審判番号 不服2020-11250 (P2020-11250/J1)
 審判請求日 令和2年8月13日(2020.8.13)

(73) 特許権者 501204525
 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術
 研究所
 東京都三鷹市新川6丁目38番1号
 (74) 代理人 100098545
 弁理士 阿部 伸一
 (74) 代理人 100189717
 弁理士 太田 貴章
 (72) 発明者 ボンダレンコ オレクシー
 東京都三鷹市新川6丁目38番1号 国立
 研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究
 所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 エンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法、エンジン制御プログラム及びエンジン制御装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

排気弁と燃料調節手段と過給機を備えた2ストローク式のエンジンをエンジンモデルによりエンジン状態を推定するエンジン状態観測器を用いて制御するエンジン制御方法であって、

前記エンジンの回転数、前記過給機の過給機回転数、掃気圧力、排気温度、排気圧力、及び前記エンジンの負荷からなる状態パラメータと、エンジンダイナミックスの非線形関数と、エンジンモデルパラメータと、前記燃料調節手段の燃料ポンプバック値とを組み合わせ、前記燃料ポンプバック値の更新によって前記状態パラメータがどのように変化するかを表す前記エンジンモデルである非線形状態空間方程式に対して、前記状態パラメータのそれぞれの状態初期値を設定し、

またセンサ値として前記エンジンの回転数と、前記燃料ポンプバック値と、前記排気弁の排気弁開度又は動作タイミングを検出して前記エンジン状態観測器の前記エンジンモデルに入力し、前記非線形状態空間方程式で前記状態パラメータのそれぞれの前記状態初期値と前記燃料ポンプバック値を用いて前記状態パラメータを推定し、推定した前記状態パラメータを観測して観測パラメータとし、前記観測パラメータと前記センサ値としての前記エンジンの回転数とをカルマンフィルターにかけて前記観測パラメータを補正し、補正した前記観測パラメータとしての前記エンジンの回転数と前記センサ値としての前記燃料ポンプバック値より燃料量を求め、補正した前記観測パラメータとしての前記過給機回転数と、前記掃気圧力と、前記排気温度と、前記排気圧力と、空気量との関係式に基づいて前

10

20

記エンジンへの前記空気量を求め、前記燃料量と、前記エンジンへの前記空気量と、前記センサ値としての前記排気弁開度又は前記動作タイミングと、予め取得した前記エンジンの掃気効率とにより空気過剰率を推定し、前記エンジン状態観測器で所定の時間ごとに推定した前記空気過剰率が基準とする前記空気過剰率よりも下がった場合に、前記空気過剰率を回復するように少なくとも前記排気弁の前記排気弁開度を制御することを特徴とするエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法。

【請求項 2】

前記空気過剰率が基準とする前記空気過剰率よりも下がった場合に、前記排気弁開度の制御として閉弁タイミングを早める制御を行い前記空気過剰率を回復することを特徴とする請求項 1 に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法。

10

【請求項 3】

前記空気過剰率が基準とする前記空気過剰率よりも下がった場合に、前記空気過剰率を回復するよう前記燃料量を調節する前記燃料調節手段をさらに制御することを特徴とする請求項 1 又は請求項 2 に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法。

【請求項 4】

排気弁と燃料調節手段と過給機を備えた 2 ストローク式のエンジンをエンジンモデルによりエンジン状態を推定するエンジン状態観測器を用いて制御するエンジン制御方法であって、

前記エンジンの回転数、前記過給機の過給機回転数、掃気圧力、排気温度、排気圧力、及び前記エンジンの負荷からなる状態パラメータと、エンジンダイナミックスの非線形関数と、エンジンモデルパラメータと、前記燃料調節手段の燃料ポンプ圧力値とを組み合わせた、前記燃料ポンプ圧力値の更新によって前記状態パラメータがどのように変化するかを表す前記エンジンモデルである非線形状態空間方程式に対して、前記状態パラメータのそれぞれの状態初期値を設定し、

20

またセンサ値として前記エンジンの回転数と、前記燃料調節手段により調節される燃料量と、前記排気弁の排気弁開度としてのリフト量又は動作タイミングをセンサで検出して前記エンジン状態観測器に入力し、前記非線形状態空間方程式で前記状態パラメータのそれぞれの前記状態初期値と前記燃料ポンプ圧力値を用いて前記状態パラメータを推定し、推定した前記状態パラメータを観測して観測パラメータとし、前記観測パラメータと前記センサ値としての前記エンジンの回転数とをカルマンフィルターにかけて前記観測パラメータを補正し、補正した前記観測パラメータとしての前記過給機回転数と、前記掃気圧力と、前記排気温度と、前記排気圧力と、前記空気量との関係式に基づいて前記エンジンへの前記空気量を求め、前記燃料量と、前記エンジンへの前記空気量と、前記センサ値としての前記排気弁開度又は前記動作タイミングと、予め取得した前記エンジンの掃気効率とにより空気過剰率を推定し、前記エンジン状態観測器で所定の時間ごとに推定した前記空気過剰率が基準とする前記空気過剰率よりも下がった場合に、前記空気過剰率を回復するように少なくとも前記排気弁の前記排気弁開度を制御することを特徴とするエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法。

30

【請求項 5】

入力された前記状態初期値と、時刻 k において検出して入力した前記エンジンの回転数と、前記燃料ポンプ圧力値と、前記排気弁の前記排気弁開度又は前記動作タイミングを用いて、前記エンジン状態観測器で、前記空気過剰率及び前記エンジンの負荷を推定することを特徴とする請求項 1 から請求項 4 のいずれか 1 項に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法。

40

【請求項 6】

前記空気過剰率の推定結果により前記排気弁の前記排気弁開度を制御し、時刻 $k+1$ において検出して入力した前記エンジンの前記回転数と、前記燃料ポンプ圧力値と、前記排気弁の前記排気弁開度又は前記動作タイミングを用いて前記エンジン状態観測器で前記空気過剰率及び前記エンジンの負荷を推定するため、前記エンジンモデルの前記時刻 $k+1$ の前記状態パラメータとして補正した前記観測パラメータをもって更新することを特徴

50

とする請求項 5 に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法。

【請求項 7】

前記状態パラメータの推定結果の推定誤差が予め定めた許容範囲から逸脱した場合、特定の前記エンジンに合う前記エンジンモデルとしての前記非線形状態空間方程式の前記エンジンモデルパラメータを更新し、更新した前記エンジンモデルパラメータに基づいて前記状態パラメータの推定を行うことを特徴とする請求項 1 から請求項 6 のいずれか 1 項に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法。

【請求項 8】

前記エンジン状態観測器における前記観測パラメータの補正には、拡張カルマンフィルタ又はアンセンテッドカルマンフィルタを使用することを特徴とする請求項 1 から請求項 7 のいずれか 1 項に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法。

【請求項 9】

前記状態初期値の設定状況に基づいて前記拡張カルマンフィルタ又は前記アンセンテッドカルマンフィルタを選択することを特徴とする請求項 8 に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法。

【請求項 10】

前記拡張カルマンフィルタ又は前記アンセンテッドカルマンフィルタを予め選択し、前記エンジン状態観測器に設定することを特徴とする請求項 8 に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法。

【請求項 11】

前記エンジンは船舶に搭載され、前記船舶を推進するプロペラを駆動することを特徴とする請求項 1 から請求項 10 のいずれか 1 項に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法。

【請求項 12】

前記エンジン状態観測器は、前記プロペラの状態も考慮して前記空気過剰率及び前記エンジンの負荷を推定することを特徴とする請求項 11 に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法。

【請求項 13】

排気弁と燃料調節手段と過給機を備えた 2 ストローク式のエンジンをエンジンモデルによりエンジン状態を推定するエンジン状態観測器を用いて制御するエンジン制御プログラムであって、

前記エンジンモデルが、前記エンジンの回転数、前記過給機の過給機回転数、掃気圧力、排気温度、排気圧力、及び前記エンジンの負荷からなる状態パラメータと、エンジンダイナミックスの非線形関数と、エンジンモデルパラメータと、前記燃料調節手段の燃料ポンプブラック値とを組み合わせた、前記燃料ポンプブラック値の更新によって前記状態パラメータがどのように変化するかを表す非線形状態空間方程式であり、

コンピュータに、

前記エンジンモデルの前記状態パラメータのそれぞれの状態初期値として入力された前記エンジンの回転数、前記過給機回転数、前記掃気圧力、前記排気温度、前記排気圧力、及び前記エンジンの負荷を取得する状態初期値取得ステップと、

時刻 k における前記エンジンの回転数と、前記燃料ポンプブラック値と、前記排気弁の排気弁開度又は動作タイミングをセンサ値として取得するセンサ値取得ステップと、

前記状態パラメータのそれぞれの前記状態初期値と、前記センサ値としての前記燃料ポンプブラック値を前記非線形状態空間方程式に適用して、前記状態パラメータを推定する状態パラメータ推定ステップと、

推定した前記状態パラメータを観測し観測パラメータとする観測ステップと、

前記観測パラメータと前記センサ値としての前記エンジンの回転数とをカルマンフィルタにかけて前記観測パラメータを補正する観測パラメータ補正ステップと、

補正した前記観測パラメータとしての前記エンジンの回転数と前記燃料ポンプブラック値より燃料量を求める燃料量導出ステップと、

10

20

30

40

50

補正した前記観測パラメータとしての前記過給機回転数と、前記掃気圧力と、前記排気温度と、前記排気圧力と、前記空気量との関係式に基づいて前記エンジンへの前記空気量を求める空気量導出ステップと、

前記燃料量と、前記エンジンへの前記空気量と、前記センサ値としての前記排気弁開度又は前記動作タイミングと、予め取得した前記エンジンの掃気効率とにより前記空気過剰率を推定する空気過剰率推定ステップと、

時刻 $k+1$ において取得した前記センサ値としての前記燃料ポンプ圧力値を前記非線形空間状態方程式に入力し、前記空気過剰率推定ステップの前記空気過剰率を所定の時間ごとに推定するため、補正した前記観測パラメータを時刻 $k+1$ における前記非線形空間状態方程式の前記状態パラメータとして更新するパラメータ更新ステップと、

前記空気過剰率の推定結果に基づいて推定した前記空気過剰率が基準とする前記空気過剰率よりも下がった場合に、前記空気過剰率を回復するように少なくとも前記排気弁の前記排気弁開度を制御する制御ステップとを実行させることを特徴とするエンジン状態観測器を用いたエンジン制御プログラム。

【請求項 14】

前記状態パラメータ推定ステップにおける前記状態パラメータの推定結果の推定誤差が予め定めた許容範囲から逸脱した場合に前記エンジンモデルパラメータを更新するエンジンモデルパラメータ更新ステップをさらに備え、更新した前記エンジンモデルパラメータに基づいて前記状態パラメータの推定を行うことを特徴とする請求項 13 に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御プログラム。

【請求項 15】

前記観測パラメータ補正ステップにおいて、拡張カルマンフィルタ又はアンセンテッドカルマンフィルタを使用することを特徴とする請求項 13 又は請求項 14 に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御プログラム。

【請求項 16】

前記状態初期値の設定状況に基づいて前記拡張カルマンフィルタ又は前記アンセンテッドカルマンフィルタを選択する選択ステップをさらに備えたことを特徴とする請求項 15 に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御プログラム。

【請求項 17】

請求項 13 から請求項 16 のいずれか 1 項に記載のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御プログラムを利用したエンジン制御装置であって、前記エンジン状態観測器を含むコンピュータと、前記エンジンモデルの前記状態パラメータのそれぞれの前記状態初期値を入力する入力手段と、前記エンジンの回転数と、前記燃料ポンプ圧力値と、前記排気弁開度を前記センサ値として取得するセンサ値取得手段と、少なくとも前記排気弁の前記排気弁開度を制御する制御手段とを備えたことを特徴とするエンジン状態観測器を用いたエンジン制御装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、排気弁と燃料調節手段を備えたエンジンを、エンジンモデルによりエンジン状態を推定するエンジン状態観測器を用いて制御するエンジン制御方法、エンジン制御プログラム及びエンジン制御装置に関する。

【背景技術】

【0002】

近年、船舶推進プラントに対する環境規制が益々強化され、さらに E E D I (エネルギー効率設計指標) に代表される CO₂ 削減規制の強化等も行われている。推進プラントにはこれらの規制に対応するための各種対策装置が必要となり、システムが複雑化しているが、推進プラントとして、安全性と省エネ運航の更なる追求の両立が求められる。このため、推進プラントに対する高度な実海域自動適用制御技術が必要となっている。

実海域自動適用制御技術には、推進プラントのシミュレータで仮想プラントを作成し、

10

20

30

40

50

実際のプラントと比較することで、推進プラントの制御を行うものがある。推進プラントの中核となるのはエンジンであり、エンジンモデルが実エンジンを忠実に代表し、しかもリアルタイムの制御を行えるように計算が簡単なモデルである必要がある。

【0003】

エンジン性能で最も重要な状態パラメータは、燃料量とその燃焼に必要な空気量であり、エンジンの効率を上げたり排気に含まれる汚染物質を低減したりするためには、空気過剰率（空燃比）を適正に制御することが必要である。しかし、従来はいずれのパラメータも特に非定常状態において正確に計測することが出来ず、制御に用いることができていない。

【0004】

また、エンジン性能を最大効率に維持するためには、エンジン状態パラメータを与えられた運転状態で最適値に保つ必要がある。エンジン性能を制御する従来の制御方法は二つあり、一つはオープンループ制御、もう一つはクローズドループ制御である。

オープンループ制御は、制御アクションと状態パラメータの関係を定常状態のマップで予め作成しておき制御に利用する方法である。オープンループ制御は単純であるが、経年劣化等によりエンジン状態が変わった場合はマップを適用できないため、複雑な制御を必要とするエンジン性能の制御には適用できない。

クローズドループ制御は、現在最も使われている。クローズドループ制御は、エンジン状態パラメータ（最も簡単にはエンジン回転数）を計測し、最適設定値との差を最小にする制御である。しかしながら、従来のクローズドループ制御の代表とも言えるPID制御は線形制御であるが、実際のエンジン状態は非線形であり、線形制御を使う方法は最適とは言えない。これを補うためには、オープンループ制御と同様に予めマップを作成しておき、エンジン状態に応じて使う必要があるが、マップを作成するためにはあらゆる運転状態に応じたパラメータを計算しておく必要があるため膨大な時間がかかる。しかも、作成したマップがエンジン固有の非線形をカバーしていると保障できるものではない。さらに、問題を複雑にするものとして計測センサの信頼性があり、劣化に伴う間違った計測や、計測できても多くの雑音を含むことがあり、精度の高い制御ができない。

【0005】

ここで、特許文献1には、エンジンのセンサにより取得した温度等のパラメータの値を拡張カルマンフィルタ（EKF）が実装された状態推定器に入力し、入力されたパラメータの値とエンジンの予測モデルを用いて、非計測又は非感知パラメータを推定することによりエンジンの状態を推定し、最適化アルゴリズムを用いて、状態に基づきアクチュエータ向けのコマンドを生成し、そのコマンドをエンジンに送ることによりエンジン性能を最適化する方法が開示されている。

また、特許文献2には、マニホールドに連結されている複数のシリンダと、マニホールドの下流で空燃比を推定する検出器と、拡張カルマンフィルタ（EKF）が実装された推定器とを有し、エンジン回転数及びクランク軸の角度等によって定まる遅延時間と空燃比を推定器に入力し、個別のシリンダの空燃比を推定する方法が開示されている。

また、特許文献3には、エンジンのクランクシャフトのクランク角度を測定し、クランク角速度推定誤差とクランク角度推定誤差を演算し、非線形カルマンフィルタを用いてエンジントルクを推定する方法が開示されている。

また、特許文献4には、外部環境等によって変化する油水温や給気圧力に応じて、燃焼室の所定の密閉期間（排気弁が閉じた後、吸気弁が開弁するまでの燃焼室が密閉された期間）、吸気弁閉時期、密閉期間中燃料噴射量などを補正するバルブタイミング制御装置が開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特開2005-248946号公報

【特許文献2】特開2006-336645号公報

10

20

30

40

50

【特許文献3】特開2017-82662号公報

【特許文献4】特開2002-129991号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

しかしながら、エンジン性能で最も重要な状態パラメータである空気過剰率を非定常状態においても正確に推定することでエンジン状態を把握し、推定した空気過剰率に基づいてエンジンの制御を効率的に行う技術はこれまで提案されていない。

【0008】

そこで本発明は、エンジンモデルを用いて空気過剰率を推定し、推定した空気過剰率に基づいてエンジンを制御することによりエンジン性能を非定常状態においても最大効率に維持することができる、エンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法、エンジン制御プログラム及びエンジン制御装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0009】

請求項1記載に対応したエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法においては、排気弁と燃料調節手段と過給機を備えた2ストローク式のエンジンをエンジンモデルによりエンジン状態を推定するエンジン状態観測器を用いて制御するエンジン制御方法であって、エンジンの回転数、過給機の過給機回転数、掃気圧力、排気温度、排気圧力、及びエンジンの負荷からなる状態パラメータと、エンジンダイナミックスの非線形関数と、エンジンモデルパラメータと、燃料調節手段の燃料ポンプバック値とを組み合わせた、燃料ポンプバック値の更新によって状態パラメータがどのように変化するかを表すエンジンモデルである非線形状態空間方程式に対して、状態パラメータのそれぞれの状態初期値を設定し、またセンサ値としてエンジンの回転数と、燃料ポンプバック値と、排気弁の排気弁開度又は動作タイミングを検出してエンジン状態観測器のエンジンモデルに入力し、非線形状態空間方程式で状態パラメータのそれぞれの状態初期値と燃料ポンプバック値を用いて状態パラメータを推定し、推定した状態パラメータを観測して観測パラメータとし、観測パラメータとセンサ値としてのエンジンの回転数とをカルマンフィルターにかけて観測パラメータを補正し、補正した観測パラメータとしてのエンジンの回転数とセンサ値としての燃料ポンプバック値より燃料量を求め、補正した観測パラメータとしての過給機回転数と、掃気圧力と、排気温度と、排気圧力と、空気量との関係式に基づいてエンジンへの空気量を求め、燃料量と、エンジンへの空気量と、センサ値としての排気弁開度又は動作タイミングと、予め取得したエンジンの掃気効率とにより空気過剰率を推定し、エンジン状態観測器で所定の時間ごとに推定した空気過剰率が基準とする空気過剰率よりも下がった場合に、空気過剰率を回復するように少なくとも排気弁の排気弁開度を制御することを特徴とする。

請求項1に記載の本発明によれば、非定常状態においても確実かつ正確に計測できるエンジン回転数等に基づいて空気過剰率を推定するため、推定した空気過剰率の精度が高い。また、エンジン状態を把握する上で重要な空気過剰率を推定して排気弁の排気弁開度を制御するため、エンジン性能を最大効率に維持しやすくなる。ここで、空気過剰率は正確に推定された真の空気過剰率であることが好ましい。真の空気過剰率とは予めエンジンの掃気効率を、実際対象とするエンジンで計測したデータ、数値流体力学(CFD)計算をした結果等に基づき、より詳細に把握して推定したエンジンシリンダ内の空気過剰率をいう。

【0010】

請求項2記載の本発明は、空気過剰率が基準とする空気過剰率よりも下がった場合に、排気弁開度の制御として閉弁タイミングを早める制御を行い空気過剰率を回復することを特徴とする。

請求項2に記載の本発明によれば、空気過剰率を効果的に回復でき、さらにエンジン性能を最大効率に維持しやすくなる。

10

20

30

40

50

【0011】

請求項3記載の本発明は、空気過剰率が基準とする空気過剰率よりも下がった場合に、空気過剰率を回復するよう燃料量を調節する燃料調節手段をさらに制御することを特徴とする。

請求項3に記載の本発明によれば、排気弁の排気弁開度に加えて燃料調節手段も制御するため、さらにエンジン性能を最大効率に維持しやすくなる。

【0012】

請求項4記載の本発明は、排気弁と燃料調節手段と過給機を備えた2ストローク式のエンジンをエンジンモデルによりエンジン状態を推定するエンジン状態観測器を用いて制御するエンジン制御方法であって、エンジンの回転数、過給機の過給機回転数、掃気圧力、排気温度、排気圧力、及びエンジンの負荷からなる状態パラメータと、エンジンダイナミックスの非線形関数と、エンジンモデルパラメータと、燃料調節手段の燃料ポンプバック値とを組み合わせた、燃料ポンプバック値の更新によって状態パラメータがどのように変化するかを表すエンジンモデルである非線形状態空間方程式に対して、状態パラメータのそれぞれの状態初期値を設定し、またセンサ値としてエンジンの回転数と、燃料調節手段により調節される燃料量と、排気弁の排気弁開度としてのリフト量又は動作タイミングをセンサで検出してエンジン状態観測器に入力し、非線形状態空間方程式で状態パラメータのそれぞれの状態初期値と燃料ポンプバック値を用いて状態パラメータを推定し、推定した状態パラメータを観測して観測パラメータとし、観測パラメータとセンサ値としてのエンジンの回転数とをカルマンフィルターにかけて観測パラメータを補正し、補正した観測パラメータとしての過給機回転数と、掃気圧力と、排気温度と、排気圧力と、空気量との関係式に基づいてエンジンへの空気量を求め、燃料量と、エンジンへの空気量と、センサ値としての排気弁開度又は動作タイミングと、予め取得したエンジンの掃気効率とにより空気過剰率を推定し、エンジン状態観測器で所定の時間ごとに推定した空気過剰率が基準とする空気過剰率よりも下がった場合に、空気過剰率を回復するよう少なくとも排気弁の排気弁開度を制御することを特徴とする。

請求項4に記載の本発明によれば、空気過剰率の推定精度を高めることができる。

【0013】

請求項5記載の本発明は、入力された状態初期値と、時刻kにおいて検出して入力したエンジンの回転数と、燃料ポンプバック値と、排気弁の排気弁開度又は動作タイミングを用いて、エンジン状態観測器で、空気過剰率及びエンジンの負荷を推定することを特徴とする。

請求項5に記載の本発明によれば、空気過剰率及びエンジンの負荷の推定精度を高めることができる。

【0014】

請求項6記載の本発明は、空気過剰率の推定結果により排気弁の排気弁開度を制御し、時刻k+1において検出して入力したエンジンの回転数と、燃料ポンプバック値と、排気弁の排気弁開度又は動作タイミングを用いてエンジン状態観測器で空気過剰率及びエンジンの負荷を推定するため、エンジンモデルの時刻k+1の状態パラメータとして補正した観測パラメータをもって更新することを特徴とする。

請求項6に記載の本発明によれば、最新の観測パラメータを用いることで空気過剰率及びエンジンの負荷の推定精度を高めることができる。

【0015】

請求項7記載の本発明は、状態パラメータの推定結果の推定誤差が予め定めた許容範囲から逸脱した場合、特定のエンジンに合うエンジンモデルとしての非線形状態空間方程式のエンジンモデルパラメータを更新し、更新したエンジンモデルパラメータに基づいて状態パラメータの推定を行うことを特徴とする。

請求項7に記載の本発明によれば、特定のエンジンに合わせたエンジンモデルパラメータにより、誤差を小さくして状態パラメータの推定精度を高めることができる。

【0016】

10

20

30

40

50

請求項 8 記載の本発明は、エンジン状態観測器における観測パラメータの補正には、拡張カルマンフィルタ又はアンセンテッドカルマンフィルタを使用することを特徴とする。

請求項 8 に記載の本発明によれば、非線形カルマンフィルタを用いることで、空気過剰率及びエンジンの負荷の推定精度を高めることができる。

【0017】

請求項 9 記載の本発明は、状態初期値の設定状況に基づいて拡張カルマンフィルタ又はアンセンテッドカルマンフィルタを選択することを特徴とする。

請求項 9 に記載の本発明によれば、エンジンモデルの状態に応じて、空気過剰率及びエンジンの負荷の推定を的確に行うことができる。

【0018】

請求項 10 記載の本発明は、拡張カルマンフィルタ又はアンセンテッドカルマンフィルタを予め選択し、エンジン状態観測器に設定することを特徴とする。

請求項 10 に記載の本発明によれば、空気過剰率及びエンジンの負荷の推定を迅速に行うことができる。

【0019】

請求項 11 記載の本発明は、エンジンは船舶に搭載され、船舶を推進するプロペラを駆動することを特徴とする。

請求項 11 に記載の本発明によれば、船舶に搭載されたエンジンを最大効率で運用することができる。

【0020】

請求項 12 記載の本発明は、エンジン状態観測器は、プロペラの状態も考慮して空気過剰率及びエンジンの負荷を推定することを特徴とする。

請求項 12 に記載の本発明によれば、プロペラモデルを用いて負荷の推定精度を高めることができる。

【0021】

請求項 13 記載に対応したエンジン状態観測器を用いたエンジン制御プログラムは、排気弁と燃料調節手段と過給機を備えた 2 ストローク式のエンジンをエンジンモデルによりエンジン状態を推定するエンジン状態観測器を用いて制御するエンジン制御プログラムであって、エンジンモデルが、エンジンの回転数、過給機の過給機回転数、掃気圧力、排気温度、排気圧力、及びエンジンの負荷からなる状態パラメータと、エンジンダイナミクスの非線形関数と、エンジンモデルパラメータと、燃料調節手段の燃料ポンプラック値とを組み合わせた、燃料ポンプラック値の更新によって状態パラメータがどのように変化するかを表す非線形状態空間方程式であり、コンピュータに、エンジンモデルの状態パラメータのそれぞれの状態初期値として入力されたエンジンの回転数、過給機回転数、掃気圧力、排気温度、排気圧力、及びエンジンの負荷を取得する状態初期値取得ステップと、時刻 k におけるエンジンの回転数と、燃料ポンプラック値と、排気弁の排気弁開度又は動作タイミングをセンサ値として取得するセンサ値取得ステップと、状態パラメータのそれぞれの状態初期値と、センサ値としての燃料ポンプラック値を非線形状態空間方程式に適用して、状態パラメータを推定する状態パラメータ推定ステップと、推定した状態パラメータを観測し観測パラメータとする観測ステップと、観測パラメータとセンサ値としてのエンジンの回転数とをカルマンフィルタにかけて観測パラメータを補正する観測パラメータ補正ステップと、補正した観測パラメータとしてのエンジンの回転数と燃料ポンプラック値より燃料量を求める燃料量導出ステップと、補正した観測パラメータとしての過給機回転数と、掃気圧力と、排気温度と、排気圧力と、空気量との関係式に基づいてエンジンへの空気量を求める空気量導出ステップと、燃料量と、エンジンへの空気量と、センサ値としての排気弁開度又は動作タイミングと、予め取得したエンジンの掃気効率とにより空気過剰率を推定する空気過剰率推定ステップと、時刻 $k+1$ において取得したセンサ値としての燃料ポンプラック値を非線形状態空間方程式に入力し、空気過剰率推定ステップの空気過剰率を所定の時間ごとに推定するため、補正した観測パラメータを時刻 $k+1$ にお

10

20

30

40

50

ける非線形状態空間方程式の状態パラメータとして更新するパラメータ更新ステップと、空気過剰率の推定結果に基づいて推定した空気過剰率が基準とする空気過剰率よりも下がった場合に、空気過剰率を回復するように少なくとも排気弁の排気弁開度を制御する制御ステップとを実行させることを特徴とする。

請求項 1 3 に記載の本発明によれば、状態初期値と、非定常状態においても確實かつ正確に計測できるエンジン回転数等に基づいて空気過剰率を推定するため、推定した空気過剰率の精度が高い。また、エンジン状態を把握する上で重要な空気過剰率を推定して排気弁の排気弁開度を制御するため、非定常状態においても、エンジン性能を最大効率に維持しやすくなる。

【 0 0 2 2 】

請求項 1 4 に記載の本発明は、状態パラメータ推定ステップにおける状態パラメータの推定結果の推定誤差が予め定めた許容範囲から逸脱した場合にエンジンモデルパラメータを更新するエンジンモデルパラメータ更新ステップをさらに備え、更新したエンジンモデルパラメータに基づいて状態パラメータの推定を行うことを特徴とする。

請求項 1 4 に記載の本発明によれば、特定のエンジンに合わせたエンジンモデルパラメータにより、誤差を小さくして観測パラメータの推定精度を高めることができる。

【 0 0 2 3 】

請求項 1 5 に記載の本発明は、観測パラメータ補正ステップにおいて、拡張カルマンフィルター又はアンセンテッドカルマンフィルターを使用することを特徴とする。

請求項 1 5 に記載の本発明によれば、非線形カルマンフィルターを用いることで、空気過剰率及びエンジンの負荷の推定精度を高めることができる。

【 0 0 2 4 】

請求項 1 6 に記載の本発明は、状態初期値の設定状況に基づいて拡張カルマンフィルター又はアンセンテッドカルマンフィルターを選択する選択ステップをさらに備えたことを特徴とする。

請求項 1 6 に記載の本発明によれば、エンジンモデルの状態に応じて、空気過剰率及びエンジンの負荷の推定を的確に行うことができる。

【 0 0 2 5 】

請求項 1 7 に記載に対応したエンジン状態観測器を用いたエンジン制御装置は、エンジン状態観測器を用いたエンジン制御プログラムを利用したエンジン制御装置であって、エンジン状態観測器を含むコンピュータと、エンジンモデルの状態パラメータのそれぞれの状態初期値を入力する入力手段と、エンジンの回転数と、燃料ポンプ圧値と、排気弁開度をセンサ値として取得するセンサ値取得手段と、少なくとも排気弁の排気弁開度を制御する制御手段とを備えたことを特徴とする。

請求項 1 7 に記載の本発明によれば、非定常状態においても確實かつ正確に計測できるエンジン回転数に基づいて空気過剰率を推定するため、推定した空気過剰率の精度が高い。また、エンジン状態を把握する上で重要な空気過剰率を推定して排気弁の排気弁開度を制御するため、非定常状態においても、エンジン性能を最大効率に維持しやすくなる。

【 発明の効果 】

【 0 0 2 6 】

本発明のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法によれば、非定常状態においても確實かつ正確に計測できるエンジン回転数等に基づいて空気過剰率を推定するため、推定した空気過剰率の精度が高い。また、エンジン状態を把握する上で重要な空気過剰率を推定して排気弁の排気弁開度を制御するため、エンジン性能を最大効率に維持しやすくなる。

【 0 0 2 7 】

また、空気過剰率が基準とする空気過剰率よりも下がった場合に、排気弁開度の制御として閉弁タイミングを早める制御を行い空気過剰率を回復する場合には、空気過剰率を効果的に回復でき、さらにエンジン性能を最大効率に維持しやすくなる。

【 0 0 2 8 】

10

20

30

40

50

また、空気過剰率が基準とする空気過剰率よりも下がった場合に、空気過剰率を回復するよう燃料量を調節する燃料調節手段をさらに制御する場合には、排気弁の排気弁開度に加えて燃料調節手段も制御するため、さらにエンジン性能を最大効率に維持しやすくなる。

【0029】

また、本発明のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法によれば、排気弁と燃料調節手段と過給機を備えたエンジンをエンジンモデルによりエンジン状態を推定するエンジン状態観測器を用いて制御するエンジン制御方法であって、エンジンの回転数、過給機の過給機回転数、掃気圧力、排気温度、排気圧力、及びエンジンの負荷からなる状態パラメータと、エンジンダイナミックスの非線形関数と、エンジンモデルパラメータと、燃料調節手段の燃料ポンプバック値とを組み合わせた、燃料ポンプバック値の更新によって状態パラメータがどのように変化するかを表すエンジンモデルである非線形状態空間方程式に対して、状態パラメータのそれぞれの状態初期値を設定し、またセンサ値としてエンジンの回転数と、燃料調節手段により調節される燃料量と、排気弁の排気弁開度としてのリフト量又は動作タイミングをセンサで検出してエンジン状態観測器に入力し、非線形状態空間方程式で状態パラメータのそれぞれの状態初期値と燃料ポンプバック値を用いて状態パラメータを推定し、推定した状態パラメータを観測して観測パラメータとし、観測パラメータとセンサ値としてのエンジンの回転数とをカルマンフィルタ - にかけて観測パラメータを補正し、補正した観測パラメータとしての過給機回転数と、掃気圧力と、排気温度と、排気圧力と、空気量との関係式に基づいてエンジンへの空気量を求め、燃料量と、エンジンへの空気量と、センサ値としての排気弁開度又は動作タイミングと、予め取得したエンジンの掃気効率とにより空気過剰率を推定し、エンジン状態観測器で所定の時間ごとに推定した空気過剰率が基準とする空気過剰率よりも下がった場合に、空気過剰率を回復するように少なくとも排気弁の排気弁開度を制御するため、空気過剰率の推定精度を高めることができる。

【0030】

また、入力された状態初期値と、時刻 k において検出して入力したエンジンの回転数と、燃料ポンプバック値と、排気弁の排気弁開度又は動作タイミングを用いて、エンジン状態観測器で、空気過剰率及びエンジンの負荷を推定する場合には、空気過剰率及びエンジンの負荷の推定精度を高めることができる。

【0031】

また、空気過剰率の推定結果により排気弁の排気弁開度を制御し、時刻 $k+1$ において検出して入力したエンジンの回転数と、燃料ポンプバック値と、排気弁の排気弁開度又は動作タイミングを用いてエンジン状態観測器で空気過剰率及び負荷を推定するため、エンジンモデルの時刻 $k+1$ の状態パラメータとして補正した観測パラメータをもって更新する場合には、最新の観測パラメータを用いることで空気過剰率及びエンジンの負荷の推定精度を高めることができる。

【0032】

また、状態パラメータの推定結果の推定誤差が予め定めた許容範囲から逸脱した場合、特定のエンジンに合うエンジンモデルとしての非線形状態空間方程式のエンジンモデルパラメータを更新し、更新したエンジンモデルパラメータに基づいて状態パラメータの推定を行う場合には、特定のエンジンに合わせたエンジンモデルパラメータにより、誤差を小さくして状態パラメータの推定精度を高めることができる。

【0033】

また、エンジン状態観測器における観測パラメータの補正には、拡張カルマンフィルタ - 又はアンセンテッドカルマンフィルタ - を使用する場合には、非線形カルマンフィルタ - を用いることで、空気過剰率及びエンジンの負荷の推定精度を高めることができる。

【0034】

また、状態初期値の設定状況に基づいて拡張カルマンフィルタ - 又はアンセンテッドカルマンフィルタ - を選択する場合には、エンジンモデルの状態に応じて、空気過剰率及び

エンジンの負荷の推定を的確に行うことができる。

【0035】

また、拡張カルマンフィルタ又はアンセンテッドカルマンフィルタを予め選択し、エンジン状態観測器に設定する場合には、空気過剰率及びエンジンの負荷の推定を迅速に行うことができる。

【0036】

また、エンジンは船舶に搭載され、船舶を推進するプロペラを駆動する場合には、船舶に搭載されたエンジンを最大効率で運用することができる。

【0037】

また、エンジン状態観測器は、プロペラの状態も考慮して空気過剰率及びエンジンの負荷を推定する場合には、プロペラモデルを用いて負荷の推定精度を高めることができる。

【0038】

また、本発明のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御プログラムによれば、状態初期値と、非定常状態においても確実かつ正確に計測できるエンジン回転数に基づいて空気過剰率を推定するため、推定した空気過剰率の精度が高い。また、エンジン状態を把握する上で重要な空気過剰率を推定して排気弁の排気弁開度を制御するため、非定常状態においても、エンジン性能を最大効率に維持しやすくなる。

【0039】

また、状態パラメータ推定ステップにおける状態パラメータの推定結果の推定誤差が予め定めた許容範囲から逸脱した場合にエンジンモデルパラメータを更新するエンジンモデルパラメータ更新ステップをさらに備え、更新したエンジンモデルパラメータに基づいて状態パラメータの推定を行う場合には、特定のエンジンに合わせたエンジンモデルパラメータにより、誤差を小さくして観測パラメータの推定精度を高めることができる。

【0040】

また、観測パラメータ補正ステップにおいて、拡張カルマンフィルタ又はアンセンテッドカルマンフィルタを使用する場合には、非線形カルマンフィルタを用いることで、空気過剰率及びエンジンの負荷の推定精度を高めることができる。

【0041】

また、状態初期値の設定状況に基づいて拡張カルマンフィルタ又はアンセンテッドカルマンフィルタを選択する選択ステップをさらに備えた場合には、エンジンモデルの状態に応じて、空気過剰率及びエンジンの負荷の推定を的確に行うことができる。

【0042】

また、本発明のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御装置によれば、非定常状態においても確実かつ正確に計測できるエンジン回転数に基づいて空気過剰率を推定するため、推定した空気過剰率の精度が高い。また、エンジン状態を把握する上で重要な空気過剰率を推定して排気弁の排気弁開度を制御するため、非定常状態においても、エンジン性能を最大効率に維持しやすくなる。

【図面の簡単な説明】

【0043】

【図1】本実施形態によるエンジン状態観測器を用いたエンジン制御装置の概念図

【図2】同エンジン状態観測器を用いた制御の概念図

【図3】同エンジン、制御部及び負荷の構成及び関係を示す構成図

【図4】同排気弁の制御系の機能ブロック図

【図5】同排気弁開度と空気過剰率との関係を示す図

【図6】同エンジンモデルパラメータの設定とカルマンフィルタの選択方法を示すフローチャート

【図7】同エンジン状態の推定方法を示すフローチャート

【図8】同エンジン状態の推定誤差を示す図

【発明を実施するための形態】

【0044】

10

20

30

40

50

以下に、本発明の実施形態によるエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法、エンジン制御プログラム及びエンジン制御装置について説明する。

【0045】

図1は、本実施形態によるエンジン状態観測器を用いたエンジン制御装置の概念図である。

エンジン制御装置10は、波や風の状態といった実海域を代表する外乱 (Actual Sea Condition) を考慮したプロペラモデル、及びエンジンモデルの各モジュールを組み込んだ推進プラントのシミュレータであり、いわゆる仮想プラント (Virtual Plant) を作成し、実際のプラント (Real Plant) と比較検討し、オフラインあるいはオンラインでエンジンモデルパラメータを修正し、シミュレータの精度を上げ、エンジンに対しきめ細かい制御を行う。

エンジン制御装置10は、エンジン状態観測器15を用いたエンジン制御プログラムを利用して、排気弁と燃料調節手段とを備えたエンジンを制御する。エンジンは、船舶に搭載されており、負荷として船舶を推進するプロペラを駆動するものである。

エンジン制御装置10は、エンジン状態観測器15を含むコンピュータ11と、エンジンの回転数を含む状態初期値を設定する入力手段12と、エンジンの回転数、燃料調節手段による燃料調節量、排気弁のリフト量、及び排気弁の動作タイミングを取得するセンサ値取得手段13と、排気弁及び燃料調節手段 (燃料ポンプラック) を制御する制御出力手段14とを備える。入力手段12は、制御盤、マウス、キーボード又はタッチパネル等である。なお、排気弁については、閉弁、開弁のタイミング、弁リフト量を単独又は組み合わせ

【0046】

図2は本実施形態によるエンジン状態観測器を用いた制御の概念図である。

エンジン制御装置10は、プロペラ2を駆動するエンジン1の回転数 n_e を検出器等のセンサ値取得手段13で取得し、エンジン状態観測器15に入力する。エンジン状態観測器15は、入力された回転数 n_e を用いてエンジンモデルによりエンジン状態として空気過剰率 λ とエンジンの負荷 q_p を推定する。そして、エンジン制御装置10は、最適なゲインを計算し、排気弁開度 $EV C$ (閉弁タイミング) と燃料ポンプラック h_p の制御更新信号を送出する。エンジン制御装置10は、送出された信号に基づき、制御出力手段14によって排気弁開度 $EV C$ 及び燃料ポンプラック h_p を調節する。なお、排気弁開度 $EV C$ の調節は、排気弁の閉弁タイミングの他、開弁タイミング、弁リフト量やこれらを組み合わせ

たものであってもよい。また、燃料調節手段の調節は、燃料ポンプラック h_p の他、燃料ポンプのタイミング、電子ガバナー、燃料調節機構等であってもよい。ここで空気過剰率 λ の推定に当たっては、予め実験やCFDシミュレーション等により、求めたエンジン1の掃気効率を利用する。特に、2ストロークエンジンの掃気過程において、供給された全給気のうち一部分はシリンダを素通りし、残りの給気は掃気が終わった後もシリンダ内に残る。このときシリンダ内には前サイクルの燃焼ガスなどからなる残留排気が存在するので、掃気後のシリンダ内全ガス量は残留給気と残留排気を加えたものになる。掃気完了後の残留給気の質量とシリンダ内全ガス量との質量の割合を掃気効率といい、掃気作用の良否を示す値である。掃気効率はシリンダ内の給気濃度を表し、エンジン出力に直結する値であるが、エンジン1の掃気方式によりその到達レベルが異なる。このため、エンジン1の正しい掃気効率を把握しておかないと真の空気過剰率 λ は導出できなく、空気過剰率 λ に基づいてエンジン性能を真に最大効率に維持することもできない。

このように、少なくともエンジン1の回転数 n_e を検出してエンジン状態観測器15に入力し、エンジン状態観測器15でエンジン状態として掃気効率に基づいた真の空気過剰率 λ とエンジンの負荷 q_p を推定し、推定した真の空気過剰率 λ に基づいて制御対象として排気弁及び燃料調節手段を制御する。确实かつ正確に計測できるエンジン1の回転数 n_e に基づいて、また掃気効率に基づいて空気過剰率 λ を推定するため、推定に用いるパラメータ数を少なくしつつ、空気過剰率 λ を精度よく推定できる。また、エンジン状態を把握する上で重要な空気過剰率 λ を推定して排気弁及び燃料調節手段を制御するため、船舶

に搭載されたエンジン 1 の性能を最大効率に維持して運用しやすくなる。

なお、排気弁のリフト量（開度）又は動作タイミングの少なくとも一方と、燃料調節手段による燃料調節量とをセンサ値取得手段 1 3 で取得して、エンジン状態観測器 1 5 に入力し、空気過剰率を含むエンジン状態の推定に利用することで、エンジン状態の推定精度を高めることができる。

また、エンジン状態観測器 1 5 が、プロペラモデルによりプロペラ 2 の状態も考慮してエンジン状態を推定することで、エンジン状態の推定精度をさらに高めることができる。

【 0 0 4 7 】

図 3 は、エンジン、制御部及び負荷の構成及び関係を示す構成図である。

エンジン 1 は、2 ストロークのジーゼルエンジンを想定しており、エンジン本体 3、過給機 4、給気管、インタークーラー 5、掃気レシーバ 2 0、排気弁 6、排気レシーバ 7、排気管、燃料調節手段 1 6（燃料ポンプ 1 6 a、電子ガバナー 1 6 b、燃料調節機構 1 6 c）及びコントローラ 1 7（排気弁タイミング変更機構 1 7 a、排気弁駆動ポンプ 1 7 b）を含んで構成される。

【 0 0 4 8 】

エンジン本体 3 は、シリンダ 3 a、ピストン 3 b、クランク 3 c 等を含んで構成される。エンジン本体 3 では、シリンダ 3 a 内におけるピストン 3 b の往復運動に応じてシリンダ 3 a に対する空気の給気及び掃気が行われる。また、シリンダ 3 a 内には、燃料調節手段 1 6 によって燃料が供給され、燃料と空気の混合気に点火及び燃焼・爆発が行われ、そのエネルギーがピストン 3 b を駆動させる。ピストン 3 b へ与えられた駆動力は、クランク 3 c を介して負荷へ伝達される。本実施形態における主たる負荷は、船舶推進用のプロペラ 2 であり、波風による外乱や船速の変化によりプロペラ 2 の負荷変動を生じ、エンジン 1 の非定常状態が発生する。

【 0 0 4 9 】

過給機 4 は、圧縮機 C 及びタービン T を含んで構成される。過給機 4 では、エンジン本体 3 からの排気ガスのエネルギー（温度及び圧力）を利用してタービン T を高速回転させ、その回転力によって圧縮機 C を駆動することによって圧縮した空気をエンジン本体 3 のシリンダ 3 a 内へ供給する。すなわち、過給機 4 は、圧縮した空気をエンジン本体 3 に送り込み、エンジン 1 の本来の給気量を超える混合気を吸入・爆発させることで見かけの排気量を超える出力を与える。

【 0 0 5 0 】

過給機 4 において圧縮された空気は、ディフューザ等を介して給気管に送られる。給気管には、インタークーラー 5 が設けられる。インタークーラー 5 は、圧縮空気を中間冷却する。インタークーラー 5 を通った圧縮空気は掃気レシーバ 2 0 に送られて貯められる。掃気レシーバ 2 0 に貯められた圧縮空気は、エンジン本体 3 のピストン 3 b が下死点付近にあるときに開状態となる掃気ポートからエンジン本体 3 のシリンダ 3 a 内に送られる。燃料調節手段 1 6 は、燃料ポンプ 1 6 a、電子ガバナー 1 6 b 及び燃料調節機構 1 6 c を含んで構成される。電子ガバナー 1 6 b は、クランク 3 c の回転数を示す回転数信号 N_e を受けて、燃料ポンプ 1 6 a の駆動タイミングを制御する。燃料ポンプ 1 6 a は、電子ガバナー 1 6 b の制御により所望のタイミングで燃料をシリンダ 3 a 内に噴射させる。エンジン本体 3 のシリンダ 3 a 内には、燃料調節手段 1 6 から燃料が供給されて混合気となり、ピストン 3 b により圧縮されて混合気が燃焼させられる。燃焼によりピストン 3 b に駆動力が与えられる。

【 0 0 5 1 】

エンジン本体 3 での燃焼により発生した排気ガスは、排気弁 6 が開状態となると共に掃気レシーバ 2 0 に貯められた圧縮空気によって掃気されて排気レシーバ 7 に送られる。排気レシーバ 7 に貯められた排気ガスは、過給機 4 のタービン T に導かれて回転力を与えた後に排気される。

【 0 0 5 2 】

本実施形態では、排気弁 6 を閉状態から開状態にする開弁タイミング及び開状態から閉

状態にする閉弁タイミングは制御部 18 によって制御される。具体的には、制御部 18 が排気弁タイミング制御装置として機能し、排気弁タイミング変更機構 17 a を制御することによって排気弁 6 の作動タイミング及び開度（リフト量）が制御される。排気弁タイミング変更機構 17 a は、排気弁駆動ポンプ 17 b により発生した油圧を利用して、排気弁 6 を押す油圧アクチュエータに設けられた電磁式のリリーフバルブにより排気弁 6 を開く圧力を調整して排気弁 6 を制御する。排気弁 6 の制御については後述する。なお、排気弁 6 の制御は、作動タイミングのみでもよく、開度（リフト量）のみでもよく、これらを組み合わせてもよいが、作動タイミングのみの制御が排気弁タイミング変更機構 17 a の構成が簡略化できるため好ましい。

【0053】

また、本実施の形態では、掃気レシーバ 20 に掃気バイパス管 19 が接続される。掃気バイパス管 19 には流量センサ 19 a と取出弁 19 b が設けられる。取出弁 19 b を開状態にすることによって、掃気レシーバ 20 に送り込まれた圧縮空気の一部が空気潤滑用の供給管（図示せず）へ送り込まれる。一方、取出弁 19 b を閉状態とすることによって、掃気レシーバ 20 に送り込まれた圧縮空気は供給管に送り込まれない状態となる。取出弁 19 b の開度は、流量センサ 19 a の信号も利用し、制御部 18 によって制御される。

【0054】

図 4 は、排気弁の制御系の機能ブロック図を示す。本実施形態における船舶は、過給機 4 の近傍から加圧空気（掃気）を取り出して船体周囲に気泡を噴出させることによって空気潤滑を行い船舶の摩擦抵抗を低減する摩擦抵抗低減装置を搭載している。この空気潤滑を行う際に掃気を取り出した場合も、非定常状態に該当する。

エンジン状態観測器 15 は、センサ値取得手段 13 である回転数センサ 13 a、燃料調節量センサ 13 b 及び排気弁センサ 13 c からそれぞれエンジン 1 の回転数 n_e 、燃料ポンプ圧 h_p 及び排気弁開度 EVC の情報を取得する。回転数センサ 13 a はエンジン本体 3 に設けられ、燃料調節量センサ 13 b は燃料調節手段 16 に設けられ、排気弁センサ 13 c は排気弁 6 又は排気弁タイミング変更機構 17 a に設けられている。そして、回転数センサ 13 a によりエンジン 1 の回転数 n_e を検出し、燃料調節量センサ 13 b により燃料ポンプ圧 h_p を検出し、排気弁センサ 13 c により排気弁開度 EVC を検出する。

エンジン状態観測器 15 は、入力されたエンジン 1 の回転数 n_e 、燃料ポンプ圧 h_p 及び排気弁開度 EVC を用いてエンジンモデルによりエンジン状態として空気過剰率とエンジン 1 の負荷 q_p を推定し、最適なゲインを計算し、排気弁開度 EVC と燃料ポンプ圧 h_p の制御更新信号を制御出力手段 14 へ送出する。

制御出力手段 14 は、制御部（排気弁タイミング制御装置）18 に対して排気弁開度 EVC の制御設定信号を送出する。排気弁開度 EVC の制御設定信号を受信した制御部（排気弁タイミング制御装置）18 は、排気弁 6 を開閉させるタイミング及び開度（リフト量）を制御する。具体的には、排気弁タイミング変更機構 17 a により排気弁 6 の作動タイミング及び開度（リフト量）が調整される。排気弁タイミング変更機構 17 a は、制御部（排気弁タイミング制御装置）18 からの制御信号に応じて排気弁 6 を押す油圧アクチュエータに設けられた電磁式のリリーフバルブを制御し、それにより排気弁 6 を開く圧力を調整して排気弁 6 の作動タイミング及び開度（リフト量）を調整する。

また、制御出力手段 14 は、燃料調節手段 16 に対して燃料ポンプ圧 h_p の制御設定信号を送出する。燃料ポンプ圧 h_p の制御設定信号を受信した燃料調節手段 16 は、制御設定信号に応じて燃料量を調節する。

【0055】

本実施形態では、非定常状態として空気潤滑のための取出空気の取り出し状態に応じて少なくとも排気弁 6 の制御が行われる。空気潤滑のために必要な気泡として生成される空気の噴出量に関連して、掃気の取出空気の量が変更される。すなわち、掃気バイパス管 19 から取出弁 19 b 介して取り出される取出空気（掃気）の量が制御される。

【0056】

10

20

30

40

50

なお、取出空気の取り出し割合は、取出弁 19 b により制御される。ここで、図 4 に示した、掃気バイパス管 19 に設けられた流量センサ 19 a により掃気からの取出空気の取り出し量を検出し、エンジン 1 の回転数 n_e からエンジン 1 への空気量を算出し、取出空気の取り出し割合を求めることができる。なお、流量センサ 19 a を用いる代わりに取出弁 19 b の開度（変位）に基づいて取出空気の取り出し量を求めてもよい。

【0057】

なお、取り出し割合とは、例えば過給機 4 から供給される加圧空気（掃気）と取出空気との量の比をいう。この際、量は質量流量であることが好ましく、他の比のとり方であってもエンジン本体 3 に供給される掃気量が確保される比であることが好ましい。実際の制御に当たっては、エンジン本体 3 に供給される掃気量は、直接、流量を計測してもよいし、掃気圧等で代用してもよい。

【0058】

一方、取出空気の取り出し割合に応じてエンジン 1 における掃気圧が低下し、エンジン 1 の性能が低下する。また、排気ガス中の有害物質の量が増加するおそれがある。そこで、制御部 18 では、取出空気の量に応じてエンジン 1 の排気弁 6 をまず制御する。具体的には、制御部 18 は、取出空気に応じて排気弁 6 の閉弁タイミングを制御する。これにより、制御部 18 は、タイミング制御手段として機能する。

エンジン状態観測器 15 は、エンジン 1 の回転数 n_e 、燃料ポンプ圧 h_p 及び排気弁開度 EVC を用いてエンジンモデルによりエンジン状態として空気過剰率 λ とエンジン 1 の負荷 q_p を推定し、空気取り出しに合った最適なゲインを計算し、排気弁開度 EVC と燃料ポンプ圧 h_p の制御設定信号を制御出力手段 14 へ送出する。

先に制御した排気弁 6 の閉弁タイミングは、エンジン状態観測器 15 の制御設定信号である排気弁開度 EVC としての閉弁タイミングと差がある場合は、制御設定信号に従って修正される。

なお、上記の例では空気潤滑用の加圧空気として掃気を取り出す例を示したが、加圧空気として過給機 4 とインタークーラー 5 の間から給気を取り出して利用したり、排気レシーバ 7 から排気を取り出して利用してもよい。また、掃気、給気、排気を組み合わせて取り出して利用することも可能である。

【0059】

図 5 は、排気弁開度と空気過剰率との関係を示す図である。図 5 (a) は、当初の排気弁開度 (EVC_0)、第 1 の排気弁開度 (EVC_1)、及び第 2 の排気弁開度 (EVC_2) の閉弁タイミングを示している。

空気過剰率 λ は、実海域の波や風の状況が悪い非定常時や、過給機の性能劣化、また上記した掃気を取り出し状態等により低下するが、排気弁開度 EVC が当初の状態 (EVC_0) のままでは元の最適な空気過剰率 λ_0 の値を回復できない。このため、図 5 (b) に示すように、エンジン制御装置 10 は、エンジン状態観測器 15 が推定した空気過剰率 λ に応じて、排気弁開度 EVC を第 1 の排気弁開度 (EVC_1)、又は第 2 の排気弁開度 (EVC_2) に変え、元の最適な空気過剰率 λ_0 の値を回復するように制御する。これにより、エンジン性能を最大効率に維持することができる。

【0060】

次に、図 6 から図 8 を用いて、エンジン制御プログラムにおけるエンジン状態の推定方法について説明する。

本実施形態において、エンジン状態観測器 15 におけるエンジン状態の推定には、拡張カルマンフィルタ (EKF)、又はアンセンテッドカルマンフィルタ (UKF) を使用する。

【0061】

下式 (1) は、エンジン状態パラメータと空気過剰率 λ の非線形な関係式である。

10

20

30

40

【数 1】

$$\begin{aligned} \lambda &= F_{\lambda}(G_a, G_f, EVC), \\ \therefore G_a &= F_{G_a}(n_{tc}, P_s, T_e, P_e), \\ \therefore G_f &= F_{G_f}(n_e, h_p). \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 λ は空気過剰率、 G_a は空気量、 G_f は燃料量、 EVC は排気弁開度、 n_{tc} は過給機回転数、 p_s は掃気圧力、 T_e は排気温度、 P_e は排気圧力、 n_e はエンジン回転数、 h_p は燃料ポンプ圧力である。

【0062】

また、下式(2)は、エンジン動的モデルの非線形状態空間方程式を表す。エンジンの回転数 n_e 、過給機回転数 n_{tc} 、掃気圧力 p_s 、排気温度 T_e 、排気圧力 P_e の状態パラメータが、燃料ポンプ圧力 h_p 、エンジンの負荷 q_p の制御更新によってどのように変化するかの状態空間方程式を示す。

【数 2】

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} n_e \\ n_{tc} \\ p_s \\ T_e \\ P_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(n_e, n_{tc}, p_s, T_e, P_e, S_{A_1}) \\ A_2(n_e, n_{tc}, p_s, T_e, P_e, S_{A_2}) \\ A_3(n_e, n_{tc}, p_s, T_e, P_e, S_{A_3}) \\ A_4(n_e, n_{tc}, p_s, T_e, P_e, S_{A_4}) \\ A_5(n_e, n_{tc}, p_s, T_e, P_e, S_{A_5}) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} n_e \\ n_{tc} \\ p_s \\ T_e \\ P_e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1(h_p, q_p, S_{B_1}) \\ B_2(h_p, q_p, S_{B_2}) \\ B_3(h_p, q_p, S_{B_3}) \\ B_4(h_p, q_p, S_{B_4}) \\ B_5(h_p, q_p, S_{B_5}) \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} h_p \\ q_p \end{bmatrix} \quad (2)$$

ここで、 A_i 、 B_i はエンジンダイナミクスの非線形関数、 S_{A_i} 、 S_{B_i} は特定のエンジンに対するエンジンモデルパラメータの設定値である。

【0063】

また、下式(3)は、エンジン負荷 q_p が不明の場合のエンジン動的モデルの非線形状態空間方程式を表し、アンセンテッドカルマンフィルタ(UKF)用のものである。

【数 3】

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} n_e \\ n_{tc} \\ p_s \\ T_e \\ P_e \\ q_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_1(n_e, n_{tc}, p_s, T_e, P_e, q_p, S_{A_1}) \\ A_2(n_e, n_{tc}, p_s, T_e, P_e, q_p, S_{A_2}) \\ A_3(n_e, n_{tc}, p_s, T_e, P_e, q_p, S_{A_3}) \\ A_4(n_e, n_{tc}, p_s, T_e, P_e, q_p, S_{A_4}) \\ A_5(n_e, n_{tc}, p_s, T_e, P_e, q_p, S_{A_5}) \\ 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} n_e \\ n_{tc} \\ p_s \\ T_e \\ P_e \\ q_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1(h_p, S_{B_1}) \\ B_2(h_p, S_{B_2}) \\ B_3(h_p, S_{B_3}) \\ B_4(h_p, S_{B_4}) \\ B_5(h_p, S_{B_5}) \\ 0 \end{bmatrix} * [h_p] \quad (3)$$

【0064】

また、下式(4)は、拡張カルマンフィルタ(EKF)用のLTI(Linear time invariant)モデルである。この線形モデルを使用することにより、計算速度を上げることができる。

【数 4】

$$\begin{aligned} [\dot{x}]_{n \times 1} &= [A]_{n \times n} [x]_{n \times 1} + [B]_{n \times m} [u]_{m \times 1} \\ [y]_{l \times 1} &= [C]_{l \times n} [x]_{n \times 1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} [A]_{n \times n} &\Rightarrow A_{ij} = \left. \frac{dA_i}{dx_j} \right|_{\hat{x}_{j,0}} \\ [B]_{n \times m} &\Rightarrow B_{ik} = \left. \frac{dB_i}{du_k} \right|_{\hat{u}_{k,0}} \end{aligned} \quad (4)$$

【0065】

図6は、エンジンモデルパラメータの設定とカルマンフィルターの選択方法を示すフローチャートである。

まず、特定のエンジンに対するエンジンモデルパラメータ S_{An} 、 S_{Bn} を設定することにより、特定のエンジンに合う非線形モデルが作られる（非線形モデル作成ステップS1）。

非線形モデル作成ステップS1の後、作成したモデルが不確かか否かを判断する（判断ステップS2）。

判断ステップS2において、作成したモデルが不確かだと判断された場合は、式(3)を用いるアンセンテッドカルマンフィルター（UKF）が選択される（UKF選択ステップS3）。

判断ステップS2において、作成したモデルが確かだと判断された場合は、式(4)を用いる拡張カルマンフィルター（EKF）が選択される（EKF選択ステップS4）。

このように、アンセンテッドカルマンフィルター（UKF）と拡張カルマンフィルター（EKF）のどちらかを、エンジンモデルパラメータが不確かか否かによって選択するアルゴリズムがオフラインで予め作成される。

なお、図1に示すように、設定したエンジンモデルパラメータは、実際のプラントと比較して、必要に応じてオフラインで更新することができる。

また、これらオフラインのステップや更新は、オンラインで行うこともできる。

【0066】

図7は、エンジン状態の推定方法を示すフローチャートである。図7のフローチャートにおいては、エンジン状態がリアルタイムで所定の時間毎（例えば200Hz）にオンラインで推定される。

まず、エンジンの回転数 n_e 、過給機回転数 n_{tc} 、掃気圧力 p_s 、排気温度 T_e 、エンジンの負荷 q_p 、排気圧力 P_e を状態初期値として取得する（状態初期値取得ステップS10）。状態初期値を取得して設定することによりエンジン状態の推定精度を高めることができる。

状態初期値取得ステップS10の後、センサ値取得手段13から、時刻 k におけるエンジンの回転数 $n_e(k)$ 、燃料ポンプ圧 $h_p(k)$ 、及び排気弁開度 $EV C(k)$ を取得する（センサ値取得ステップS11）。なお、エンジンの回転数 $n_e(k)$ のみを取得するようにしてもよい。

センサ値取得ステップS11の後、センサ値取得ステップS11で取得した時刻 k におけるエンジンの回転数 $n_e(k)$ 、燃料ポンプ圧 $h_p(k)$ 、及び排気弁開度 $EV C(k)$ と、状態初期値取得ステップS10で取得した状態初期値に基づいて、エンジン状態観測器15が、エンジン状態として状態パラメータを推定し、これを観測し、補正して空気過剰率を推定する（エンジン状態推定ステップS12）。観測する観測パラメータは、エンジンの回転数 n_e 、過給機回転数 n_{tc} 、掃気圧力 p_s 、排気温度 T_e 、エンジンの負荷 q_p 、排気圧力 P_e である。エンジン状態観測器15におけるエンジン状態の推定には、拡張カルマンフィルター（EKF）又はアンセンテッドカルマンフィルター（UKF）

を使用することで、エンジン状態の推定精度を高めることができる。どちらを使用するかは図4を用いて説明した選択手順に従う。なお、拡張カルマンフィルタ（EKF）又はアンセンテッドカルマンフィルタ（UKF）を予め選択し、エンジン状態観測器15に設定しておいてもよい。この場合は、エンジン状態の推定をさらに迅速に行うことができる。

【0067】

エンジン状態推定ステップS12の後、燃料ポンプ圧 h_p 、及び排気弁開度EVCを推定された条件に基づいた制御の入力として、燃料調節手段16及び排気弁を制御する（制御ステップS13）。これにより、エンジン性能を最大効率に維持することができる。

制御ステップS13の後、時刻 k の次の所定時間である時刻 $k+1$ におけるエンジンの回転数 $n_e(k+1)$ 、燃料ポンプ圧 $h_p(k+1)$ 、及び排気弁開度EVC($k+1$)を取得し（次時刻センサ値取得ステップS14）、エンジン状態推定ステップS12に戻る。

また、エンジン状態推定ステップS12で観測パラメータを補正した後、補正結果に基づいて、エンジンモデルの状態パラメータを更新する（観測パラメータ更新ステップS15）。

このように、エンジン状態観測器15は、エンジン状態の推定とエンジンモデルの状態パラメータの更新を繰り返し行う。

【0068】

また、図8は、エンジン状態の推定誤差を示す図である。図8において、縦軸は誤差、横軸は時間であり、点線でエンジン状態の推定誤差の許容範囲を示し、実線でエンジン状態の誤差推定値を示している。

エンジン制御装置10は、エンジン状態観測器15によるエンジン状態の推定誤差を追跡し、予め定めた許容範囲から逸脱した場合は、エンジンモデルパラメータを更新する（エンジンモデルパラメータ更新ステップS16）。

そして、更新したエンジンモデルパラメータに基づき、エンジン状態推定ステップS12においてエンジン状態の推定を行う。これにより、エンジンモデルパラメータの誤差を小さくしてエンジン状態の誤差推定精度を高め、信頼性を向上させることができる。

なお、エンジンモデルパラメータの更新に当たっては、予め定めた許容範囲から複数回逸脱した場合に更新することや、誤差を時間的に積分して所定の条件に達したら更新する等、各種の方法が採用できる。

【0069】

以上説明したように、クローズド、オープンループ制御を用いた従来の制御方法の問題を解決する手段として、本実施形態では、制御のための多くの計測センサを用いずに、エンジンモデルの状態に応じて、ソフトセンサと呼ばれる非線形カルマンフィルタのアンセンテッドカルマンフィルタ（UKF）、又は拡張カルマンフィルタ（EKF）を用いる観測器を使用する。

この数学モデルが二つの部分からできていることに大きな意味がある。すなわち、a) 特定のエンジンに適合する非線形モデルと、b) その非線形モデルに完全に結び付けられる線形モデルである。これにより、アンセンテッドカルマンフィルタ（UKF）を用いるエンジン状態観測器15、又は拡張カルマンフィルタ（EKF）を用いるエンジン状態観測器15を使用して、エンジンの非線形プロセスを効果的に追跡することが可能となる。さらに、通常は計測できないエンジン内部の状態を推定することが可能となる。特にエンジン性能で重要な真の空気過剰率とエンジンの負荷 q_p （プロペラ負荷）を推定でき、制御の入力に使用できる。これにより、エンジン状態の現在の運転状況を推定するだけでなく、近い将来のエンジン状態を的確に予測することができ、最適で安全な運転が可能となる。

なお、エンジン状態パラメータは、およそ的確に空気過剰率を推定できるものであれば他パラメータや組み合わせでもよく、また、観測パラメータは制御対象、制御項目等に

10

20

30

40

50

応じて他のパラメータや組み合わせを任意に選択できる。

【産業上の利用可能性】

【0070】

本発明のエンジン状態観測器を用いたエンジン制御方法、エンジン制御プログラム及びエンジン制御装置は、船舶推進プラントのエンジンの制御に好適に利用できる。特に2ストロークエンジンのシリンダ内の空気過剰率を最適に保ち、エンジン性能を最大効率に維持することができる。また、少なくとも空気過剰率が制御に必要な排気弁と燃料調整手段を備えたあらゆるエンジンの制御に利用できる。例えば、より細かい制御が必要なガスエンジンの制御に利用することもできる。

【符号の説明】

【0071】

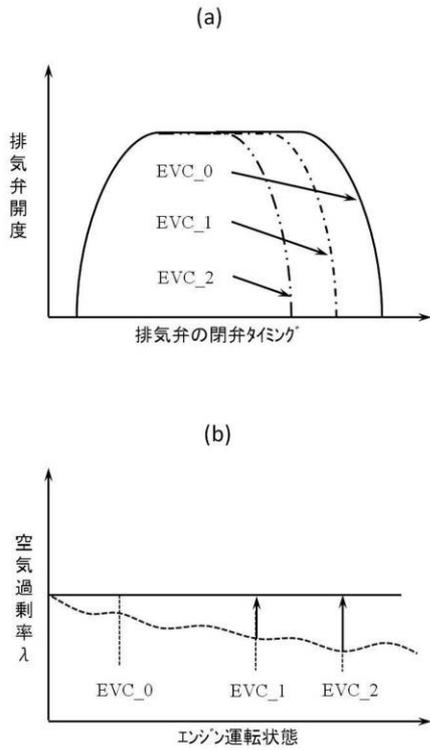
- 1 エンジン
- 2 プロペラ
- 6 排気弁
- 10 エンジン制御装置
- 11 コンピュータ
- 12 入力手段
- 13 センサ値取得手段
- 14 制御出力手段
- 15 エンジン状態観測器
- 16 燃料調節手段
- S3、S4 選択ステップ
- S10 状態初期値取得ステップ
- S11 センサ値取得ステップ
- S12 エンジン状態推定ステップ
- S13 制御ステップ
- S15 観測パラメータ更新ステップ
- 空気過剰率
- q_p エンジンの負荷
- n_e エンジンの回転数

10

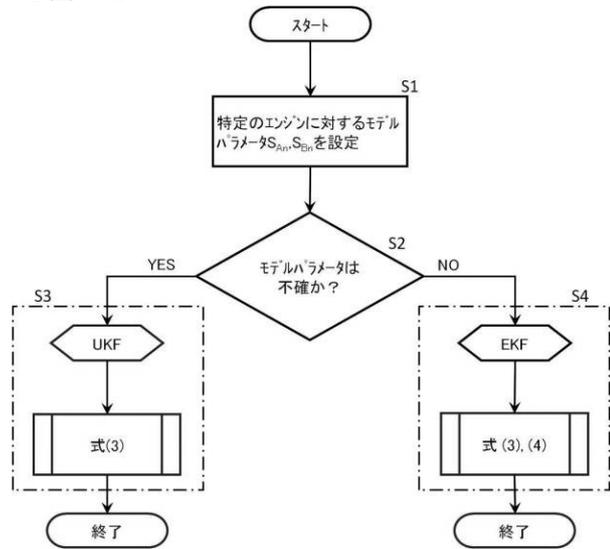
20

30

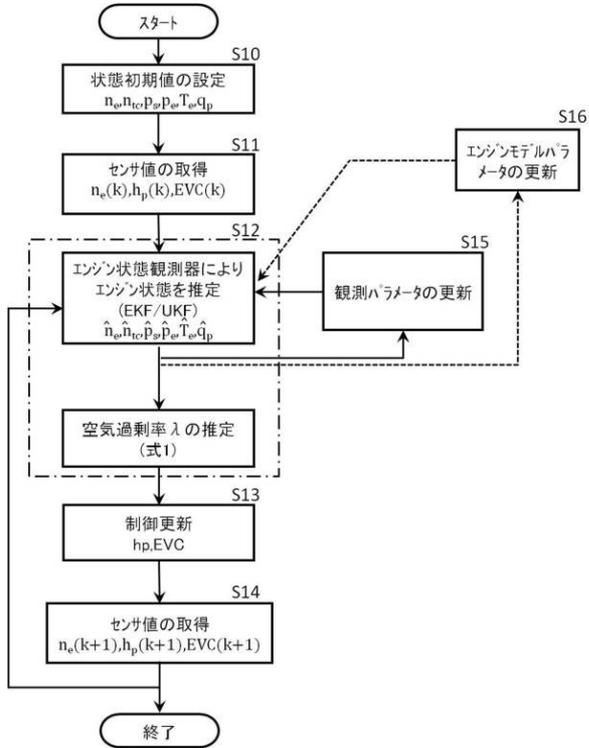
【図5】



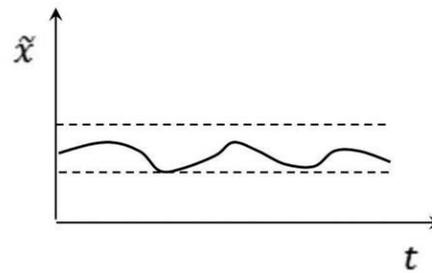
【図6】



【図7】



【図8】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
F 0 2 D 13/02 J
F 0 2 D 41/04

(72)発明者 福田 哲吾
東京都三鷹市新川6丁目38番1号 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所内

合議体
審判長 佐々木 正章
審判官 高島 壮基
審判官 鈴木 充

(56)参考文献 特開2006-336645(JP,A)
特開平11-236833(JP,A)
特開2004-60551(JP,A)
特開2004-100495(JP,A)
特開2011-153556(JP,A)
特開2005-133626(JP,A)
特開2017-82662(JP,A)
特開2012-146116(JP,A)
特開平8-200131(JP,A)
特開2010-236502(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

F02D 45/00
F02D 13/02
F02D 41/04