

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2022年1月13日(13.01.2022)



(10) 国際公開番号
WO 2022/009904 A1

- (51) 国際特許分類:
F02D 45/00 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2021/025526
- (22) 国際出願日: 2021年7月6日(06.07.2021)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2020-116438 2020年7月6日(06.07.2020) JP
- (71) 出願人: 国立研究開発法人 海上・港湾・航空技術研究所 (NATIONAL INSTITUTE OF MARITIME, PORT AND AVIATION TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒1810004 東京都三鷹市新川6丁目38番1号 Tokyo

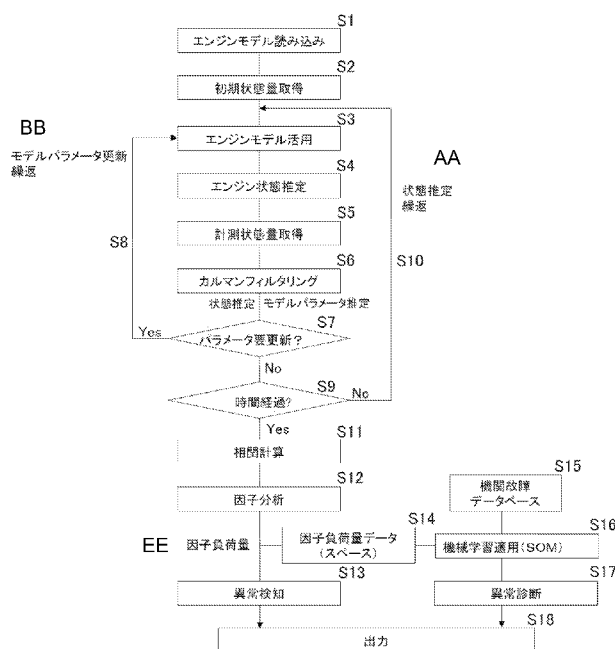
(JP). 株式会社三井E & Sマシナリー(MITSUI E&S MACHINERY CO., LTD.) [JP/JP]; 〒1048439 東京都中央区築地5丁目6番4号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: ボンダレンコ オレクシー (BONDARENKO Olesiy); 〒1810004 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 Tokyo (JP). 福田 哲吾(FUKUDA Tetsugo); 〒1810004 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 Tokyo (JP). 宮川 修二郎(MIYAKAWA Shujiro); 〒7068651 岡山県玉野市玉3丁目1番1号 株式会社三井E & Sマシナリー内 Okayama (JP). 宮地 健(MIYACHI Ken); 〒7068651 岡山

(54) Title: ENGINE ABNORMALITY DIAGNOSIS METHOD, ENGINE ABNORMALITY DIAGNOSIS PROGRAM, AND ENGINE ABNORMALITY DIAGNOSIS SYSTEM

(54) 発明の名称: エンジンの異常診断方法、エンジンの異常診断プログラム、及びエンジンの異常診断システム

[図2]



- S1 Read engine model
- S2 Acquire initial state quantity
- S3 Utilize engine model
- S4 Estimate engine state
- S5 Acquire measured state quantity
- S6 Kalman filtering
- S7 Parameter update needed?
- S8 Repeat model parameter update
- S9 Time elapsed?
- S10 Repeat state estimation
- S11 Correlation calculation
- S12 Factor analysis
- S13 Abnormality detection
- S14 Factor load quantity data (space)
- S15 Engine malfunction database
- S16 Machine learning application (SOM)
- S17 Abnormality diagnosis
- S18 Output
- AA State estimation
- BB Model parameter estimation
- EE Factor load quantity

(57) Abstract: This engine abnormality diagnosis method, engine abnormality diagnosis program, and engine abnormality diagnosis system, with which early detection and cause diagnosis of an engine abnormality are performed, involve execution of a step S2 for acquiring an initial state quantity of an engine model 10, a step S3 for applying the initial state

WO 2022/009904 A1

県玉野市玉3丁目1番1号 株式会社三井
E & S マシナリー内 Okayama (JP).

(74) 代理人: 阿部 伸一, 外 (ABE Shinichi et al.);
〒1710033 東京都豊島区高田3丁目11-
12 KTビル3階 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保
護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ,
BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ,
EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN,
HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, IT, JO, JP, KE, KG, KH,
KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG,
US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保
護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS,
MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM,
ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ,
TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ,
DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT,
LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS,
SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM,
GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

quantity and utilizing the engine model 10, a step S4 for obtaining an estimated state quantity using the engine model 10, a step S5 for acquiring a measured state quantity of an engine 1, a step S6 for subjecting the residual error between the measured state quantity and the estimated state quantity to a nonlinear Kalman filter, a step S10 for applying a Kalman gain to the engine model 10 and repeating steps S4 - S6, a step S11 for calculating a measured state quantity or a residual error correlation, a step S12 for performing a factor analysis on the measured state quantity or the residual error correlation to derive a factor load quantity, a step S13 for calculating a factor score from the factor load quantity and detecting an abnormality, a step S16 for applying the factor load quantity to machine learning, a step S17 for diagnosing the abnormality on the basis of the machine learning, and a step S18 for outputting the result of diagnosis.

(57) 要約: エンジンの異常の早期検知及び原因診断を行うエンジンの異常診断方法、エンジンの異常診断プログラム、及びエンジンの異常診断システムは、エンジンモデル10の初期状態量を取得するステップS2と、初期状態量を適用しエンジンモデル10を活用するステップS3と、エンジンモデル10で推定状態量を得るステップS4と、エンジン1の計測状態量を取得するステップS5と、計測状態量と推定状態量との残差を非線形カルマンフィルタにかけるステップS6と、カルマンゲインをエンジンモデル10に適用しステップS4~S6を繰り返すステップS10と、計測状態量、又は残差の相関を計算するステップS11と、計測状態量、又は残差の相関に対して因子分析し因子負荷量を求めるステップS12と、因子負荷量から因子スコアを計算し異常を検知するステップS13と、因子負荷量を機械学習に適用するステップS16と、機械学習に基づいて異常を診断するステップS17と、診断結果を出力するステップS18とを実行する。

明 細 書

発明の名称：

エンジンの異常診断方法、エンジンの異常診断プログラム、及びエンジンの異常診断システム

技術分野

[0001] 本発明は、エンジンの異常を数学的なエンジンモデルを用いて異常診断する、エンジンの異常診断方法、エンジンの異常診断プログラム、及びエンジンの異常診断システムに関する。

背景技術

[0002] 船舶等に搭載されているエンジンの異常を早期に検知することは安全面や効率面等の観点から重要である。

ここで、特許文献1には、エンジンのある作動点で最適に設計されたカルマンフィルタ・ゲインと、実機エンジンを忠実にモデル化した非線形ダイナミックシミュレーション・モデルとから成る一定ゲイン拡張カルマンフィルタ（CGEKF）を利用して、観測変数と観測変数推定値との間に差が生じる場合はモデルの状態変数の一部分を成すチューニングパラメータをその差が最小となるように調整することにより、その非線形ダイナミックシミュレーション・モデルを常に実機に忠実なモデルとするガスタービンエンジンの性能推定システムが開示されている。また、段落0010には、エンジン使用による経年変化や損傷による性能劣化を、エンジンの非線形ダイナミックシミュレーション・モデルと推定フィルタにより常に推定・検出・監視するエンジン性能推定システムおよび方法であることが記載されている。

また、特許文献2には、航空機の飛行中に航空機の飛行パラメータをリアルタイムで決定するためのシステムであって、航空機の推定されるべき少なくとも2個の事前選択された飛行パラメータ間の相互依存関係を定める飛行力学方程式に基づき構成されて、航空機の飛行中に、選択された飛行パラメータの合同推定値を供するように形成された拡張カルマンフィルタを含むシ

システムが開示されている。

また、特許文献3には、プロセスを制御するのに用いられる制御信号をコントローラが生成できるようにするためにコントローラの各実行サイクル中にコントローラに新しいプロセス変数推定を提供しながら、遅い又は間欠的なプロセスフィードバック信号からプロセス変数値の推定を生じるように構成されるカルマンフィルタが開示されている。

先行技術文献

特許文献

- [0003] 特許文献1：特開2009-68359号公報
特許文献2：特開2013-49408号公報
特許文献3：特開2018-88289号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0004] 特許文献1は、段落0005に、「計測可能項目と計測不能項目との間の相関関係を変化させる経年劣化や損傷等の影響が十分に反映された高精度な非線形ダイナミックシミュレーション・モデルとすることが可能となる。」と記載されているように、非線形ダイナミックシミュレーション・モデルを逐次チューニングし、エンジンの計測不能項目を計測可能項目から推定し、その推定結果を用いてガスタービンエンジンを制御するものであり、エンジンの異常の早期検知とその原因の診断を行うものではない。

特許文献2は、飛行力学方程式によって相互に関連付けられた少なくとも2個の飛行パラメータを拡張カルマンフィルタによって同時に推定して航空機の飛行制御に用いるものであり、エンジンの異常の早期検知とその原因の診断を行うものではない。

特許文献3は、化学プロセスや石油プロセス等のプロセス制御システムにおけるカルマンフィルタの改善に関するものであり、エンジンの異常の早期検知とその原因の診断を行うものではない。

そこで本発明は、エンジンの異常の早期検知とその原因の診断を行うことができるエンジンの異常診断方法、エンジンの異常診断プログラム、及びエンジンの異常診断システム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

[0005] 請求項1記載に対応したエンジンの異常診断方法においては、エンジンの異常を、数学的なエンジンモデルを用いて異常診断するプログラムであって、エンジンモデルの初期状態量を取得する初期状態量取得ステップと、エンジンモデルに初期状態量を適用しエンジンモデルを活用するエンジンモデル活用ステップと、エンジンモデルで初期状態量に基づいてエンジンの状態を計算し推定状態量を得るエンジン状態推定ステップと、エンジンの計測状態量を取得する計測状態量取得ステップと、取得した計測状態量と計算した推定状態量との残差を非線形カルマンフィルタにかけるカルマンフィルタリングステップと、非線形カルマンフィルタにかけて得られたカルマンゲインをエンジンモデルに適用し、エンジン状態推定ステップと、計測状態量取得ステップと、カルマンフィルタリングステップを繰り返す繰返ステップと、非線形カルマンフィルタにかけたときの計測状態量、又は残差の相関を計算する相関計算ステップと、計測状態量、又は残差の相関に対して因子分析し因子負荷量を求める因子分析ステップと、因子負荷量から因子スコアを計算し異常を検知する異常検知ステップと、因子負荷量を機械学習に適用する機械学習適用ステップと、機械学習に基づいて異常を診断する異常診断ステップと、エンジンの異常の診断結果を含む異常情報を入力する出力ステップとを実行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、計測状態量、又は計測状態量と計算した推定状態量との残差を利用して因子分析にかけることにより、計算した因子スコアに基づきエンジンの異常を早期に検知することができる。また、因子負荷量を機械学習に適用しエンジンの異常の原因を診断することができる。

[0006] 請求項2記載の本発明は、カルマンフィルタリングステップで得られた結

果、又は取得した計測状態量を処理した結果をエンジンモデル活用ステップに適用して、エンジンモデルを更新するモデル更新ステップをさらに実行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、エンジンモデルを更新して推定状態量の計算精度を常に高い状態に保つことができる。

[0007] 請求項3に記載の本発明は、相関計算ステップにおける計測状態量、又は残差の相関の計算は、相関行列に基づいて行うことを特徴とする。

請求項3に記載の本発明によれば、簡単な計算により計測状態量、又は残差の相関の計算精度を向上させることができる。

[0008] 請求項4に記載の本発明は、因子分析ステップにおいて、相関行列としての共分散行列に基づいて特異値分解(SVD)をして因子負荷量を導出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、共分散行列の形に捉われず本質的に重要なものを抽出し、エンジンの異常を早期に検知することができる。

[0009] 請求項5に記載の本発明は、機械学習は、自己組織化マップ(SOM)を用いることを特徴とする。

請求項5に記載の本発明によれば、教師なし機械学習である自己組織化マップ(SOM)を利用してエンジンの異常の原因を分類することができる。

[0010] 請求項6に記載の本発明は、初期状態量取得ステップで取得する初期状態量は、エンジンの負荷(Q_p)と燃料ポンプラック位置(h_p)を含む燃料供給量であることを特徴とする。

請求項6に記載の本発明によれば、エンジンの状態を推定する上で重要であるエンジンの負荷(Q_p)と燃料ポンプラック位置(h_p)を含む燃料供給量に基づいて、推定状態量を得ることができる。

[0011] 請求項7に記載の本発明は、計測状態量取得ステップで取得する計測状態量は、エンジンの回転数(n_e)であることを特徴とする。

請求項7に記載の本発明によれば、エンジンとして計測する機会の多いエンジンの回転数(n_e)を、エンジンの異常診断に用いることができ、計測精度

も高くすることができる。

- [0012] 請求項 8 記載の本発明は、エンジン状態推定ステップの推定状態量として、過給機回転数(n_{tc})、掃気圧(P_s)、掃気温度 (T_s)、及び排気ガス温度(T_e)を得ることを特徴とする。

請求項 8 に記載の本発明によれば、エンジンの状態を推定する上で有用な過給機回転数(n_{tc})、掃気圧(P_s)、掃気温度 (T_s)、又は排気ガス温度(T_e)についての診断結果を得ることができる。

- [0013] 請求項 9 記載に対応したエンジンの異常診断プログラムにおいては、エンジンの異常を、数学的なエンジンモデルを用いて異常診断するプログラムであって、コンピュータに、エンジンの異常診断方法における初期状態量取得ステップ、エンジンモデル活用ステップ、エンジン状態推定ステップ、計測状態量取得ステップ、カルマンフィルタリングステップ、繰返ステップ、相関計算ステップ、因子分析ステップ、異常検知ステップ、機械学習適用ステップ、異常診断ステップ、及び出力ステップを実行させることを特徴とする。

請求項 9 に記載の発明によれば、計測状態量、又は計測状態量と計算した推定状態量との残差を利用して因子分析にかけることにより、計算した因子スコアに基づきエンジンの異常を早期に検知することができる。また、因子負荷量を機械学習に適用しエンジンの異常の原因を診断することができる。

- [0014] 請求項 10 記載に対応したエンジンの異常診断システムにおいては、エンジンと、エンジンモデルの初期状態量を入力する条件入力手段と、エンジンの状態を計測し計測状態量を得る状態量計測手段と、エンジンの異常診断方法、又はエンジンの異常診断プログラムを実行するコンピュータと、コンピュータより出力されるエンジンの異常の診断結果を含む異常情報を提供する情報提供手段とを備えたことを特徴とする。

請求項 10 に記載の本発明によれば、コンピュータを利用して、エンジンの異常の早期検知とその原因の診断を行った結果を含む異常情報を提供することができる。

[0015] 請求項 1 1 記載の本発明は、コンピュータで、エンジンモデルの更新を行うことを特徴とする。

請求項 1 1 に記載の本発明によれば、コンピュータで、エンジンモデルを更新することにより推定状態量の計算精度の向上が容易にできる。

[0016] 請求項 1 2 記載の本発明は、状態量計測手段で、計測状態量としてエンジンの回転数(n_e)を得ることを特徴とする。

請求項 1 2 に記載の本発明によれば、エンジンとして計測する機会が多いエンジンの回転数(n_e)を、エンジンの異常診断に用いることができ、計測精度も高くすることができる。

[0017] 請求項 1 3 記載の本発明は、情報提供手段で、異常の診断結果として、エンジンの過給機回転数(n_{tc})、掃気圧(P_s)、掃気温度(T_s)、及び排気ガス温度(T_e)の少なくとも 1 つの結果を提供す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、エンジンの状態を推定する上で有用な過給機回転数(n_{tc})、掃気圧(P_s)、掃気温度(T_s)、又は排気ガス温度(T_e)についての診断結果を得ることができる。

[0018] 請求項 1 4 記載の本発明は、異常情報の出力に基づいて、異常時にエンジンを制御する異常時制御手段を備えたことを特徴とする。

請求項 1 4 に記載の本発明によれば、異常時にエンジンを制御することにより、エンジンの異常が悪化したり、故障に至ることを防止できる。

[0019] 請求項 1 5 記載の本発明は、情報提供手段として、ヒューマンインターフェース手段を用いて異常情報を提供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、ヒューマンインターフェース手段からエンジンの異常情報が提供されることで、乗組員等は異常時に迅速かつ適切に対応することが可能となる。

[0020] 請求項 1 6 記載の本発明は、情報提供手段で提供される異常情報を、他の箇所に送信する送信手段を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、エンジンから離れた場所においてもリアルタイムにエンジンの異常を含む診断結果を知ることができる。

[0021] 請求項 17 記載の本発明は、状態量計測手段と、コンピュータと、情報提供手段とをオンラインで接続する接続手段を備えたことを特徴とする。

請求項 17 に記載の本発明によれば、エンジンの異常を含む診断結果を、オンラインでリアルタイムに伝送して提供することができる。

発明の効果

[0022] 本発明のエンジンの異常診断プログラムによれば、計測状態量、又は計測状態量と計算した推定状態量との残差を利用して因子分析にかけることにより、計算した因子スコアに基づきエンジンの異常を早期に検知することができる。また、因子負荷量を機械学習に適用しエンジンの異常の原因を診断することができる。

[0023] また、カルマンフィルタリングステップで得られた結果、又は取得した計測状態量を処理した結果をエンジンモデル活用ステップに適用して、エンジンモデルを更新するモデル更新ステップをさらに実行する場合は、エンジンモデルを更新して推定状態量の計算精度を常に高い状態に保つことができる。

[0024] また、相関計算ステップにおける残差の相関の計算は、相関行列に基づいて行う場合は、簡単な計算により計測状態量、又は残差の相関の計算精度を向上させることができる。

[0025] また、因子分析ステップにおいて、相関行列としての共分散行列に基づいて特異値分解(SVD)をして因子負荷量を導出する場合は、共分散行列の形に捉われず本質的に重要なものを抽出し、エンジンの異常を早期に検知することができる。

[0026] また、機械学習は、自己組織化マップ(SOM)を用いる場合は、教師なし機械学習である自己組織化マップ(SOM)を利用してエンジンの異常の原因を分類することができる。

[0027] また、初期状態量取得ステップで取得する初期状態量は、エンジンの負荷(Q_p)と燃料ポンプラック位置(h_p)を含む燃料供給量である場合は、エンジンの状態を推定する上で重要であるエンジンの負荷(Q_p)と燃料ポンプラック位

置(h_p)を含む燃料供給量に基づいて推定状態量を得ることができる。

[0028] また、計測状態量取得ステップで取得する計測状態量は、エンジンの回転数(n_e)である場合は、エンジンとして計測する機会の多いエンジンの回転数(n_e)をエンジンの異常診断に用いることができ、計測精度も高くすることができる。

[0029] また、エンジン状態推定ステップの推定状態量として、過給機回転数(n_{tc})、掃気圧(P_s)、掃気温度(T_s)、及び排気ガス温度(T_e)を得る場合は、エンジンの状態を推定する上で有用な過給機回転数(n_{tc})、掃気圧(P_s)、掃気温度(T_s)、又は排気ガス温度(T_e)についての診断結果を得ることができる。

[0030] また、本発明のエンジンの異常診断プログラムによれば、計測状態量、又は計測状態量と計算した推定状態量との残差を利用して因子分析にかけることにより、計算した因子スコアに基づきエンジンの異常を早期に検知することができる。また、因子負荷量を機械学習に適用しエンジンの異常の原因を診断することができる。

[0031] また、本発明のエンジンの異常診断システムによれば、コンピュータを利用して、エンジンの異常の早期検知とその原因の診断を行った結果を含む異常情報を提供することができる。

[0032] また、コンピュータで、エンジンモデルの更新を行う場合は、コンピュータで、エンジンモデルを更新することにより推定状態量の計算精度の向上が容易にできる。

[0033] また、状態量計測手段で、計測状態量としてエンジンの回転数(n_e)を得る場合は、エンジンとして計測する機会の多いエンジンの回転数(n_e)をエンジンの異常診断に用いることができ、計測精度も高くすることができる。

[0034] また、情報提供手段で、異常の診断結果として、エンジンの過給機回転数(n_{tc})、掃気圧(P_s)、掃気温度(T_s)、及び排気ガス温度(T_e)の少なくとも1つの結果を提供する場合は、エンジンの状態を推定する上で有用な過給機回転数(n_{tc})、掃気圧(P_s)、掃気温度(T_s)、又は排気ガス温度(T_e)に

ついでに診断結果を得ることができる。

[0035] また、異常情報の出力に基づいて、異常時にエンジンを制御する異常時制御手段を備えた場合は、異常時にエンジンを制御することにより、エンジンの異常が悪化したり、故障に至ることを防止できる。

[0036] また、情報提供手段として、ヒューマンインターフェース手段を用いて異常情報を提供する場合は、ヒューマンインターフェース手段からエンジンの異常情報が提供されることで、乗組員等は異常時に迅速かつ適切に対応することが可能となる。

[0037] また、情報提供手段で提供される異常情報を、他の箇所に送信する送信手段を備えた場合は、エンジンから離れた場所においてもリアルタイムにエンジンの異常を含む診断結果を知ることができる。

[0038] また、状態量計測手段と、コンピュータと、情報提供手段とをオンラインで接続する接続手段を備えた場合は、エンジンの異常を含む診断結果を、オンラインでリアルタイムに伝送して提供することができる。

図面の簡単な説明

- [0039] [図1]本発明の実施形態によるエンジンの異常診断システムのブロック図
[図2]同エンジンの異常診断プログラムのフローチャート
[図3]同エンジンの異常診断の概要図
[図4]同因子分析の概念図
[図5]同計測データを用いた因子分析の例を示す図
[図6]同因子スコアの例を示す図
[図7]同各計測値の因子負荷量の変化を示す図
[図8]同エンジンの数学モデルの例を示す図
[図9]同エンジンモデルのパラメータを示す図
[図10]同カルマンフィルタの予測（推定）ステップと更新（修正）ステップの概念と計算式を示す図
[図11]同カルマンフィルタと因子分析との関係を示す図
[図12]同因子スコアによる異常検知の例を示す図

発明を実施するための形態

[0040] 以下に、本発明の実施形態によるエンジンの異常診断方法、エンジンの異常診断プログラム及びエンジンの異常診断システムについて説明する。

[0041] 図1はエンジンの異常診断システムのブロック図である。

エンジンの異常診断システムは、船舶等に搭載されているエンジン1の異常を数学的なエンジンモデル10を用いて診断する。

エンジンの異常診断システムは、エンジンモデル10の初期状態量を入力する条件入力手段2、エンジン1の状態を計測し計測状態量を得る状態量計測手段3、エンジンの異常診断方法又はプログラムを実行するコンピュータ4、コンピュータ4より出力されるエンジン1の異常の診断結果を含む異常情報を提供する情報提供手段（ヒューマンインターフェース手段：HMI）5、異常情報の出力に基づいて異常時にエンジン1を制御する異常時制御手段6、情報提供手段5で提供される異常情報を他の箇所に送信する送信手段7、及び各機器をオンラインで接続する接続手段8を備えている。エンジンモデル10は、エンジン1に対応して最初からコンピュータ4に組み込まれていることが好ましいが、例えば船舶のメンテナンス等に関連してエンジン1の一部又は全部が異なった状態に変更された場合は、条件入力手段2等を介して途中で変更することも可能である。

接続手段8は、例えばルーターやLAN等であり、状態量計測手段3と、コンピュータ4と、情報提供手段5とをオンラインで接続する。これにより、エンジン1の異常を含む診断結果を、オンラインでリアルタイムに伝送して提供することができる。なお、オンライン接続は、接続手段8を介して無線、有線いずれも利用することが可能である。

[0042] 送信手段7はコンピュータ4に設けられている。また、コンピュータ4は、制御部11、初期状態量取得部12、エンジン状態推定部13、計測状態量取得部14、カルマンフィルタリング部15、繰返部16、相関計算部17、因子分析部18、異常検知部19、機械学習適用部20、異常診断部21、エンジンモデル更新部22、主メモリ23、補助メモリ24、エンジン

モデル活用部 27、出力部 28等を備える。

補助メモリ 24は、例えばハードディスク等である。補助メモリ 24には、エンジンモデル 10、因子負荷量スペース 25、及び機関故障データベース 26が格納されている。エンジンモデル 10は、エンジン 1の仕様及び特性に基づいて予め構築されたものである。因子負荷量スペース 25には、エンジン 1の異常を検知してから因子負荷量データが蓄積される。また、機関故障データベース 26には、シミュレーションプログラムでエンジン 1の故障のシミュレーションを行い収集したデータが集積される。なお、実際に故障したときのエンジン状態値がある場合は、そのエンジン状態値を機関故障データベース 26に集積することもできる。

[0043] 条件入力手段 2は、マウス、キーボード、及びタッチパネル等である。コンピュータ 4の操作者、又はユーザ 101は、条件入力手段 2を用いて初期状態量を入力する。初期状態量としては、エンジン 1の負荷(Q_p)と燃料ポンプラック位置(h_p)を含む燃料供給量を入力することが好ましい。これにより、エンジン 1の状態を推定する上で重要であるエンジン 1の負荷(Q_p)と燃料ポンプラック位置(h_p)を含む燃料供給量に基づいて推定状態量を得ることができる。入力された初期状態量は、コンピュータ 4の初期状態量取得部 12へ送信され取得される。また、エンジンモデル 10が変わるくらい運転条件が変わったときに、条件入力手段 2により、条件信号を入力することもできる。

[0044] 状態量計測手段 3は各種センサ等である。状態量計測手段 3では、計測状態量としてエンジン 1の回転数(n_e)を得ることが好ましい。これにより、エンジン 1として計測する機会が多いエンジン 1の回転数(n_e)をエンジン 1の異常診断に用いることができ、計測精度も高くすることができる。なお、状態量計測手段 3で計測される計測状態量としては、この他に例えばエンジン 1の掃気圧(P_s)、排気ガス温度(T_e)、及びエンジン 1の負荷(Q_p)等がある。状態量計測手段 3によって計測された計測状態量は、コンピュータ 4の計測状態量取得部 14へ送信される。また、計測状態量としては、計測

値そのもの以外に、計測値のある期間の平均値や平均値との差など、計測値に基づいて処理したものであってもよい。

[0045] 出力部28は、コンピュータ4によるエンジン1の診断結果を、送信手段7、情報提供手段（ヒューマンインターフェース手段）5、及び異常時制御手段6へ出力する。

なお、情報提供手段5、異常時制御手段6、及び送信手段7は、コンピュータ4の外部に設けることも可能である。

情報提供手段5は、エンジン1の異常の診断結果として、エンジン1の過給機回転数(n_{tc})、掃気圧(P_s)、掃気温度(T_s)、及び排気ガス温度(T_e)のうち少なくとも1つの結果を提供することが好ましい。これにより、エンジン1の状態を推定する上で有用な過給機回転数(n_{tc})、掃気圧(P_s)、掃気温度(T_s)、又は排気ガス温度(T_e)についての診断結果を得ることができる。また、情報提供手段5は、エンジン1の異常の診断結果のみならず異常検知情報を含むあらゆる異常に関連した情報を提供することが可能である。

送信手段7は、出力された診断結果を、コンピュータ4とは別の場所に設置された機器へ接続手段8を介し有線又は無線LANを通じて送信する。これにより、エンジン1から離れた場所においてもリアルタイムにエンジン1の異常の診断結果を含む異常情報を知ることができる。なお、図1では、異常情報を受信する箇所としてブリッジ100、及び船社等の陸上のユーザ101を示している。例えばコンピュータ4が機関室にある場合、情報提供手段5は異常情報を船内LANを通じてブリッジ100へ送信する。

情報提供手段（ヒューマンインターフェース手段）5は、例えばモニターやスピーカー等である。情報提供手段（ヒューマンインターフェース手段）5からエンジン1の異常情報が提供されることで、乗組員等は異常時に迅速かつ適切に対応することが可能となる。なお、情報提供手段5には、ヒューマンインターフェース手段以外に、異常情報を一時的に蓄える記憶手段や、異常情報を例えばスマートフォンに転送する転送手段等あらゆる情報の提供に関わる手段を含む。

異常時制御手段6は、異常検知結果又は異常の診断結果に基づいて異常時にエンジン1を自動的に又は乗組員からの操作によって制御する。異常時にエンジン1を制御することにより、エンジン1の異常が悪化したり、故障に至ることを防止できる。なお、異常時制御手段6に提供される情報又は信号は、情報提供手段5に提供される情報の未加工の情報又は信号であってもよい。

[0046] 図2はエンジンの異常診断方法のフローチャート、図3はエンジンの異常診断の概要図である。なお、エンジンの異常診断方法はプログラムとして提供可能であるため、以下では、エンジンの異常診断プログラムがエンジンの異常診断方法における各ステップをコンピュータに実行させるものとして説明する。

パソコンがエンジンの異常診断プログラムの実行を開始すると、制御部11は、補助メモリ24に記憶されているエンジンモデル10を読み込む（エンジンモデル読込ステップS1）。

エンジンモデル読込ステップS1の後、初期状態量取得部12は、条件入力手段2で入力されたエンジンモデル10の初期状態量を取得する（初期状態量取得ステップS2）

初期状態量取得ステップS2の後、制御部11は、エンジンモデル活用部27において読み込んだエンジンモデル10に初期状態量を適用しエンジンモデル10を活用する（エンジンモデル活用ステップS3）。エンジンモデル活用ステップS3においては、エンジンモデル10の初期設定や更新が行われる。エンジンモデル10を使うために任意の初期状態量を適用する必要があるが、エンジンモデル10を活用するエンジンモデル活用ステップS3において出来るだけ現在の状態に近い初期状態量（例えば負荷や燃料量）を適用すれば、エンジンモデル10での計算時間が少なくなったり、エンジンモデル10による推定計算の精度が上がる等のエンジンモデル10の活用が図られる。また、カルマンフィルタリングステップS6での残差の入力、または取得した計測状態量を処理した結果をエンジンモデル活用ステップS3

において活用することによりエンジンモデル10の更新が行われ、エンジンモデル10が実物のエンジン1に忠実になり活用が図られる。

エンジン状態推定部13は、エンジンモデル10で初期状態量に基づいてエンジン1の状態を計算し推定状態量を得る（エンジン状態推定ステップS4）。

また、計測状態量取得部14は、状態量計測手段3による計測により得られたエンジン1の計測状態量を取得する（計測状態量取得ステップS5）。

[0047] カルマンフィルタリング部15は、取得した計測状態量と計算した推定状態量との残差を非線形カルマンフィルタに入力する（カルマンフィルタリングステップS6）。カルマンフィルタリングステップS6においては、状態推定とモデルパラメータの推定を行う。

カルマンフィルタリングステップS6の後、エンジンモデル更新部22は、エンジンモデル10を更新する必要があるか否かを判定する（モデル更新判定ステップS7）。

エンジンモデル更新部22は、モデル更新判定ステップS7において「Yes」、すなわちエンジンモデル10を更新する必要があると判定した場合は、カルマンフィルタリングステップS6で得られた結果、又は取得した計測状態量を処理した結果をエンジンモデル活用ステップS3に適用して、モデルパラメータを更新することによりエンジンモデル10を更新する（モデル更新ステップS8）。エンジンモデル10を更新することで、エンジン1の経年劣化等に対応し、推定状態量の計算精度を常に高い状態に保つことができる。また、コンピュータ4でエンジンモデル10を更新することにより、推定状態量の計算精度の向上が容易にできる。モデル更新判定ステップS7における判定は、予めモデルパラメータに閾値を設定することにより行われる。

一方、モデル更新判定ステップS7において「No」、すなわちエンジンモデル10を更新する必要がないとエンジンモデル更新部22が判定した場合、繰返部16は、所定の時間が経過したか否かを判定する（時間経過判定

ステップS 9)。繰返部16は、例えば0、1秒などの時間で区切って、 k 、 $k+1$ 、 $k+2$ …と繰り返す。

繰返部16は、時間経過判定ステップS 9において「No」、すなわち所定の時間が経過していないと判定した場合は、非線形カルマンフィルタに入力して得られたカルマンゲインをエンジンモデル10に適用し、エンジン状態推定ステップS 4と、計測状態量取得ステップS 5と、カルマンフィルタリングステップS 6を繰り返す（繰返ステップS 10）。

このように、状態推定とモデルパラメータ推定というカルマンフィルタの二つの機能を使い、エンジンモデル10の更新と状態推定を繰り返す。なお、計測状態量が確かな場合は、トラッキングフィルタを用いモデルパラメータを同定し、カルマンフィルタは状態推定のみを行うこともできる。

また、非線形カルマンフィルタは、アンセンテッドカルマンフィルタ又は拡張カルマンフィルタとすることが好ましい。これにより、非線形システムであるエンジン1に対して、カルマンゲインをより適切なものとし推定状態量の計算精度を向上させることができる。

[0048] 一方、時間経過判定ステップS 9において「Yes」、すなわち所定の時間が経過したと繰返部16が判定した場合、相関計算部17は、非線形カルマンフィルタへの入力時に得た残差の相関を計算する（相関計算ステップS 11）。相関計算ステップS 11における残差の相関の計算は、相関行列に基づいて行うことが好ましい。これにより、簡単な計算により残差の相関の計算精度を向上させることができる。

なお、非線形カルマンフィルタへの入力時に得た残差の代わりに、取得した計測状態量を用いて、相関を計算することもできる。

[0049] 相関計算ステップS 11の後、因子分析部18は、残差の相関に対して因子分析し因子負荷量を求める（因子分析ステップS 12）。

なお、残差の相関の代わりに、取得した計測状態量の相関を用いて因子分析を行い、因子負荷量を求めることもできる。

因子分析ステップS 12の後、異常検知部19は、因子負荷量から因子ス

コアを計算し異常を検知する（異常検知ステップS 1 3）。異常検知ステップS 1 3で検知された異常は、異常情報として出力することもできる。

因子分析ステップS 1 2においては、相関行列としての共分散行列に基づいて特異値分解(SVD)をして因子負荷量を導出することが好ましい。これにより、共分散行列の形に捉われず本質的に重要なものを抽出し、エンジン1の異常を早期に検知することができる。

[0050] 因子分析ステップS 1 2で求めた因子負荷量は因子負荷量スペース25に蓄積される（因子負荷量蓄積ステップS 1 4）。機械学習適用部20は、機関故障データベース26に記憶されているデータを読み出す（機関故障データ読出ステップS 1 5）と共に、因子負荷量を機械学習に適用する（機械学習適用ステップS 1 6）。機械学習は、自己組織化マップ(SOM)を用いる。これにより、教師なし機械学習であるSOMを利用してエンジン1の異常の原因を明確に分類することができる。なお、機械学習アルゴリズムとしては、SOM以外にSVM (Support vector machine) や、Fuzzy C-means等を用いることもできる。

異常診断部21は、機械学習に基づいて異常を診断する（異常診断ステップS 1 7）。

異常検知ステップS 1 3及び異常診断ステップS 1 7の後、出力部28は、エンジン1の異常の診断結果を含む異常情報を出力する（出力ステップS 1 8）。出力ステップS 1 8における異常情報の出力には異常の診断結果以外にも異常検知情報や付随した情報を含めることができる。出力先は、上述のように情報提供手段（ヒューマンインターフェース手段）5、異常時制御手段6、及び送信手段7である。

[0051] 以下に因子分析を用いたエンジン1の異常診断について詳細に説明する。

図4は因子分析の概念図である。因子分析は、すべての計測値（計測状態量） y_m に共通で、その関係性が a_{im} で表せる隠れた（計測できない）変数因子Fを探すことである。これは線形の関係パラメータ a を使って下式（1）のように表される。

[数1]

$$y_i = a_{i1}f_1 + a_{i2}f_2 + \dots + a_{im}f_m + u_i \Rightarrow \mathbf{Y} = \mathbf{AF} + \mathbf{U} \quad \dots(1)$$

式1において、 f は共通因子、 $a_{i,m}$ は線形係数、残った u_i は説明できない因子で計測エラーかノイズである。

個々の計測値 y_m は、ある数の共通因子 f に線形で結びついている。線形係数 $a_{i,m}$ は因子負荷量と呼ばれる。因子分析とは隠れた変数（因子）を探ることであるが、この因子は計測値が変化した際の何らかの異常（事故原因）とみなすことができる。

図5は計測データを用いた因子分析の例を示す図である。図5に示すように、計測データ Y を使った因子分析の例として、計測値の具体的な追跡変化による主因子と因子負荷量 A の計算例を挙げると、計測値 y_1, y_2, \dots, y_m は例えばエンジン1の掃気圧、排ガス温度、 \dots エンジン負荷を表し、ある時刻の区間（例えば0～ t 区間）をひとまとめにして行列を作る（図5（a））。この行列の共分散行列を計算し各変数の標準偏差で割って R を求める（図5（b））。 R を特異値分解（SVD）して特異値 S を求める。次に第1因子負荷量 A を求める（図5（c））。各第1因子負荷量 a の二乗を足して分散の総和で割ったものが因子スコア D （インデックス）である（図5（d））。

なお、共分散行列の相関行列を特異値分解（SVD）することにより第1段階の因子負荷量を求め、これをEM（Expectation Maximization）法を使い、さらに特徴のある顕著な因子負荷量を求めることもできる。

[0052] 図6は因子スコアの例を示す図であり、図6（a）は生の因子スコア F_1 （ D_1 ）を示し、図6（b）はフィルタ後の因子スコア F_1 （ D_1 ）を示している。また、図7は各計測値の因子負荷量の変化を示す図であり、図7（a）は掃気圧、図7（b）は過給機回転数、図7（c）は排気ガス温度、図7（d）は掃気温度である。因子スコア D_1 （主インデックス）は、時系列に並べていくと、例えば図6に示すようにエンジン1の空気冷却器の冷却水

の流量が減り始めた時など、エンジン 1 に異常（何らかの変化）が起こった時に変化がみられる。

換言すると、図 7 に示すように因子負荷量行列 A に含まれている情報は推進システムの何らかの変化による異常を表すものである。更に、因子負荷量（行列 A の行）は誤差の要素としての推進システムパラメータ間の関係強度を表しており、異常原因の特徴を表す。従って、因子負荷量を機械学習アルゴリズム、例えば自己組織化マップ（SOM）等を使い機械学習をすることにより、推進システムの事故の原因分類に利用される。また、因子スコア D1 は異常の早期検知に利用される。

[0053] 図 3 に示すように本発明ではカルマンフィルタリング部 15 としてカルマンフィルタ観測器を用い、ここでは、計測状態量と推定状態量との残差を使い因子分析をする。すなわち本発明では、もう一つの方法として計測値（計測状態量）Y の代わりに計測状態量とエンジン状態推定部 13 による推定状態量とのカルマンフィルタリング部 15 で固有に計算される残差 E を用いて上記と同様の因子分析を行う。この残差 E は推定状態量からの乖離を意味するものであり、推定状態量が正常状態と考えると正常状態からの乖離を反映するものである。したがって、エンジン 1 に何らかの異常が発生したことを残差 E に基づいて検知できる。

カルマンフィルタ観測器は、デジタルツインのエンジンモデル 10 をベースとしている。カルマンフィルタ観測器においては、エンジン 1 の動的プロセスにより取得した計測状態量と、初期状態量に基づき数学的なエンジンモデル 10 のプロセスにより計算した推定状態量との残差 E を非線形カルマンフィルタに入力する。これによりカルマンゲインが得られる。カルマンゲインは、エンジンモデル 10 に適用され、数学的なエンジンモデル 10 のプロセス制御に用いられる。

このように、エンジン 1 のデジタルツインモデルとしてのエンジンモデル 10 を用いて、エンジン状態をモニタリングすることにより、早い段階でエンジン 1 の故障を検知し、原因を診断することができる。

[0054] 図8はエンジンの数学モデルの例を示す図である。

図8中の矢印の左側は、実際のエンジン1における燃料供給系（燃料ポンプラック位置（ h_p ））とエンジン1の回転数（ n_e ）等の計測系の関係図であり、エンジン1における計測点と計測値を示している。図8中の右側は、エンジン1の数学モデルであるエンジンモデル10を示している。

また、図8においては状態量計測手段3を○囲みの英文字で示している。○で囲った「T」は温度計、○で囲った「P」は圧力計、○で囲った「n」は回転数計、○で囲った「Q」は軸馬力計である。負荷変動は軸馬力計で計測する。

計測値は毎ステップ（ $k, k+1, k+2, \dots$ ）計測し、エンジンモデル10で毎ステップ計算（推定）する。エンジンモデル10の推定精度を上げるために、もっとも確実に高い精度で計測できるエンジン1の回転数（ n_e ）を取得してカルマンゲインを算出してエンジンモデル10を修正していく。これがカルマンフィルタリングである。

図8に示すエンジン1の数学モデルにおいて、通常状態における挙動は非線形の状態空間モデルで表すことができる。非線形の状態空間モデルは、状態方程式 X で表される方程式、状態量 x で表される各パラメータ、入力量 u で表される入力で構成される。状態方程式 X の右辺は、右側の真ん中のブロックに示される各関数で表現され、状態量 $n_e, n_{tc}, P_s, T_e, P_e, G_f$ と入力量 h_p, Q_p との関係が5つの式で表現される。

例えば、入力として燃料ポンプラック位置（ h_p ）とエンジンの負荷（ Q_p ）をとり、状態（ x ）と出力（ y ）として、エンジン1の回転数（ n_e ）、過給機回転数（ n_{tc} ）、掃気圧（ P_s ）、排気ガス圧（ P_e ）、排気ガス温度（ T_e ）、燃料流量（ G_f ）をとり、それぞれのシステム関数 F と観測方程式 $y(t)$ の出力関数 H を表す。

図8の例では出力される観測値 y は状態量 x と等しい。

[0055] 図9はエンジンモデルのパラメータを示す図である。

モデルパラメータとしては、プロペラトルク等のエンジンの負荷（ Q_p ）、

エンジントルク (Q_e)、慣性モーメント (I_e, I_{tc})、燃料ポンプラック位置 (h_p)、エンジンの回転数 (n_e)、過給機回転数 (n_{tc})、大気圧 (P_a)、大気温度 (T_a)、掃気圧 (P_s)、掃気温度 (T_s)、シリンダ内最大圧縮圧 (P_c)、シリンダ内最大燃焼圧 (P_z)、シリンダ内平均有効圧 (P_i)、掃気レシーバー体積 ($V_{a,r}$)、排気レシーバー体積 ($V_{e,r}$)、熱力学定数 ($R_a, R_e, k_e, C_{pe}, C_{pa}$)、冷却水温度 (T_w)、コンプレッサー出口温度 (T_c)、排気ガス圧 (P_e)、排気ガス温度 (T_e)、タービン出口温度 (T_{out})、タービン出口圧 (P_{out})、燃料流量 (G_f)、掃気流量 (G_a)、コンプレッサー空気流量 (G_c)、排気ガス流量 (G_e) が挙げられる。

[0056] 図10はカルマンフィルタの予測（推定）ステップ（カルマンフィルタリングステップS6）と更新（修正）ステップ（モデル更新ステップS8）の概念と計算式を示す図である。

エンジンモデル10の実体との違いと、状態量計測手段3による計測の不確かさを考慮すると、エンジンモデル10による推定状態量と計測状態量との間に誤差（残差）が生じる。この誤差を計算し、計測状態量で修正しながら、推定状態量をできるだけ正しい値に近づけるのが非線形カルマンフィルタであるアンセンテッドカルマンフィルタである。図10にアンセンテッドカルマンフィルタの基礎を示す。

カルマンフィルタを適用することで、離散的な各サンプリング時間kにおいて、計測とモデリングの不確かさを考慮に入れながら、推進システムの挙動を計算された誤差で繰り返し表される（下式2）。

[数2]

$$e_k = y_k - \hat{y}_{k|k-1} \quad \dots(2)$$

通常状態の運転では、誤差の分布は0平均の正規分布とみなされる。異常状態を検知するために、カルマンフィルタで生成された誤差を因子分析に供する。

[0057] 図11はカルマンフィルタと因子分析との関係を示す図である。

因子分析モデル ($Y = AF + U$) のパラメータ A は、相関行列 (共分散行列) から推定される。上述のように、カルマンフィルタ観測器は、デジタルツインのエンジンモデル 10 をベースとし、共分散推定が毎行われ、カルマンゲインはどの状態量を修正すべきかのインジケータとして使われる。

[0058] 図 12 は因子スコアによる異常検知の例を示す図である。

図 12 は、実エンジン 1 の過給機吸い込みフィルターの閉塞模擬実験を行い、エンジンの異常診断システムで異常を迅速に検知した例である。なお、グラフの横軸はサンプルの回数であり 1 回数は 0.1 秒である。過給機吸い込みフィルターが徐々に閉塞し圧損が増えていくが、圧損が増え始める初期に因子スコア F_1 が急上昇するため異常を検知できる。

[0059] このように、計測状態量と計算した推定状態量との残差を利用して因子分析にかけることにより、計算した因子スコアに基づきエンジン 1 の異常を早期に検知することができる。また、因子負荷量を機械学習に適用しエンジン 1 の原因を診断することができる。また、コンピュータ 4 を利用して、エンジン 1 の異常の早期検知とその原因の診断を行った結果を含む異常情報を提供することができる。

なお、コンピュータ 4 の各構成要素及び周辺手段は、適宜、外付けすることや内蔵することが可能であり、コンピュータ 4 を複数のコンピュータで役割分担をしたり、一部をディスクリート回路とすることも可能である。

産業上の利用可能性

[0060] 本発明は、例えば就航船のエンジンの異常の早期検知と診断を行い、離れた場所においてもリアルタイムにエンジンの異常を含む診断結果を知ることができるため、安全かつ効率的な運航に寄与する。また、船舶以外のエンジンの異常の早期検知と異常診断にも利用することができる。

符号の説明

- [0061] 1 エンジン
2 条件入力手段
3 状態量計測手段

- 4 コンピュータ
- 5 情報提供手段（ヒューマンインターフェース手段）
- 6 異常時制御手段
- 7 送信手段
- 8 接続手段
- 10 エンジンモデル
- S2 初期状態量取得ステップ
- S3 エンジンモデル活用ステップ
- S4 エンジン状態推定ステップ
- S5 計測状態量取得ステップ
- S6 カルマンフィルタリングステップ
- S8 モデル更新ステップ
- S10 繰返ステップ
- S11 相関計算ステップ
- S12 因子分析ステップ
- S13 異常検知ステップ
- S16 機械学習適用ステップ
- S17 異常診断ステップ
- S18 出力ステップ

請求の範囲

[請求項1] エンジンの異常を、数学的なエンジンモデルを用いて異常診断する方法であって、
前記エンジンモデルの初期状態量を取得する初期状態量取得ステップと、
と、
前記エンジンモデルに前記初期状態量を適用し前記エンジンモデルを活用するエンジンモデル活用ステップと、
前記エンジンモデルで前記初期状態量に基づいて前記エンジンの状態を計算し推定状態量を得るエンジン状態推定ステップと、
前記エンジンの計測状態量を取得する計測状態量取得ステップと、
取得した前記計測状態量と計算した前記推定状態量との残差を非線形カルマンフィルタにかけるカルマンフィルタリングステップと、
前記非線形カルマンフィルタにかけて得られたカルマンゲインを前記エンジンモデルに適用し、前記エンジン状態推定ステップと、前記計測状態量取得ステップと、前記カルマンフィルタリングステップを繰り返す繰返ステップと、
前記非線形カルマンフィルタにかけたときの前記計測状態量、又は前記残差の相関を計算する相関計算ステップと、
前記計測状態量、又は前記残差の前記相関に対して因子分析し因子負荷量を求める因子分析ステップと、
前記因子負荷量から因子スコアを計算し前記異常を検知する異常検知ステップと、
前記因子負荷量を機械学習に適用する機械学習適用ステップと、
前記機械学習に基づいて前記異常を診断する異常診断ステップと、
前記エンジンの前記異常の診断結果を含む異常情報を入力する出力ステップと
を実行することを特徴とするエンジンの異常診断方法。

[請求項2] 前記カルマンフィルタリングステップで得られた結果、又は取得し

た前記計測状態量処理した結果を前記エンジンモデル活用ステップに適用して、前記エンジンモデルを更新するモデル更新ステップをさらに実行することを特徴とする請求項1に記載のエンジンの異常診断方法。

[請求項3] 前記相関計算ステップにおける前記計測状態量、又は前記残差の前記相関の計算は、相関行列に基づいて行うことを特徴とする請求項1又は請求項2に記載のエンジンの異常診断方法。

[請求項4] 前記因子分析ステップにおいて、前記相関行列としての共分散行列に基づいて特異値分解(SVD)をして前記因子負荷量を導出することを特徴とする請求項3に記載のエンジンの異常診断方法。

[請求項5] 前記機械学習は、自己組織化マップ(SOM)を用い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の異常診断方法。

[請求項6] 前記初期状態量取得ステップで取得する前記初期状態量は、前記エンジンの負荷(Q_p)と燃料ポンプラック位置(h_p)を含む燃料供給量であることを特徴とする請求項1から請求項5のいずれか1項に記載のエンジンの異常診断方法。

[請求項7] 前記計測状態量取得ステップで取得する前記計測状態量は、前記エンジンの回転数(n_e)である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の異常診断方法。

[請求項8] 前記エンジン状態推定ステップの前記推定状態量として、過給機回転数(n_{tc})、掃気圧(P_s)、掃気温度(T_s)、及び排気ガス温度(T_e)を得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の異常診断方法。

[請求項9] エンジンの異常を、数学的なエンジンモデルを用いて異常診断するプログラムであって、コンピュータに、請求項1から請求項8のいずれか1項に記載のエンジンの異常診断方法における前記初期状態量取得ステップ、前記エン

ジンモデル活用ステップ、前記エンジン状態推定ステップ、前記計測状態量取得ステップ、前記カルマンフィルタリングステップ、前記繰返ステップ、前記相関計算ステップ、前記因子分析ステップ、前記異常検知ステップ、前記機械学習適用ステップ、前記異常診断ステップ、及び前記出力ステップを実行させることを特徴とするエンジンの異常診断プログラム。

[請求項10]

エンジンと、
エンジンモデルの初期状態量を入力する条件入力手段と、
前記エンジンの状態を計測し計測状態量を得る状態量計測手段と、
請求項1から請求項8のいずれか1項に記載のエンジンの異常診断方法、又は請求項9に記載のエンジンの異常診断プログラムを実行するコンピュータと、
前記コンピュータより出力される前記エンジンの異常の診断結果を含む異常情報を提供する情報提供手段とを備えたことを特徴とするエンジンの異常診断システム。

[請求項11]

前記コンピュータで、前記エンジンモデルの更新を行うことを特徴とする請求項10に記載のエンジンの異常診断システム。

[請求項12]

前記状態量計測手段で、前記計測状態量として前記エンジンの回転数(n_e)を得ることを特徴とする請求項10又は請求項11に記載のエンジンの異常診断システム。

[請求項13]

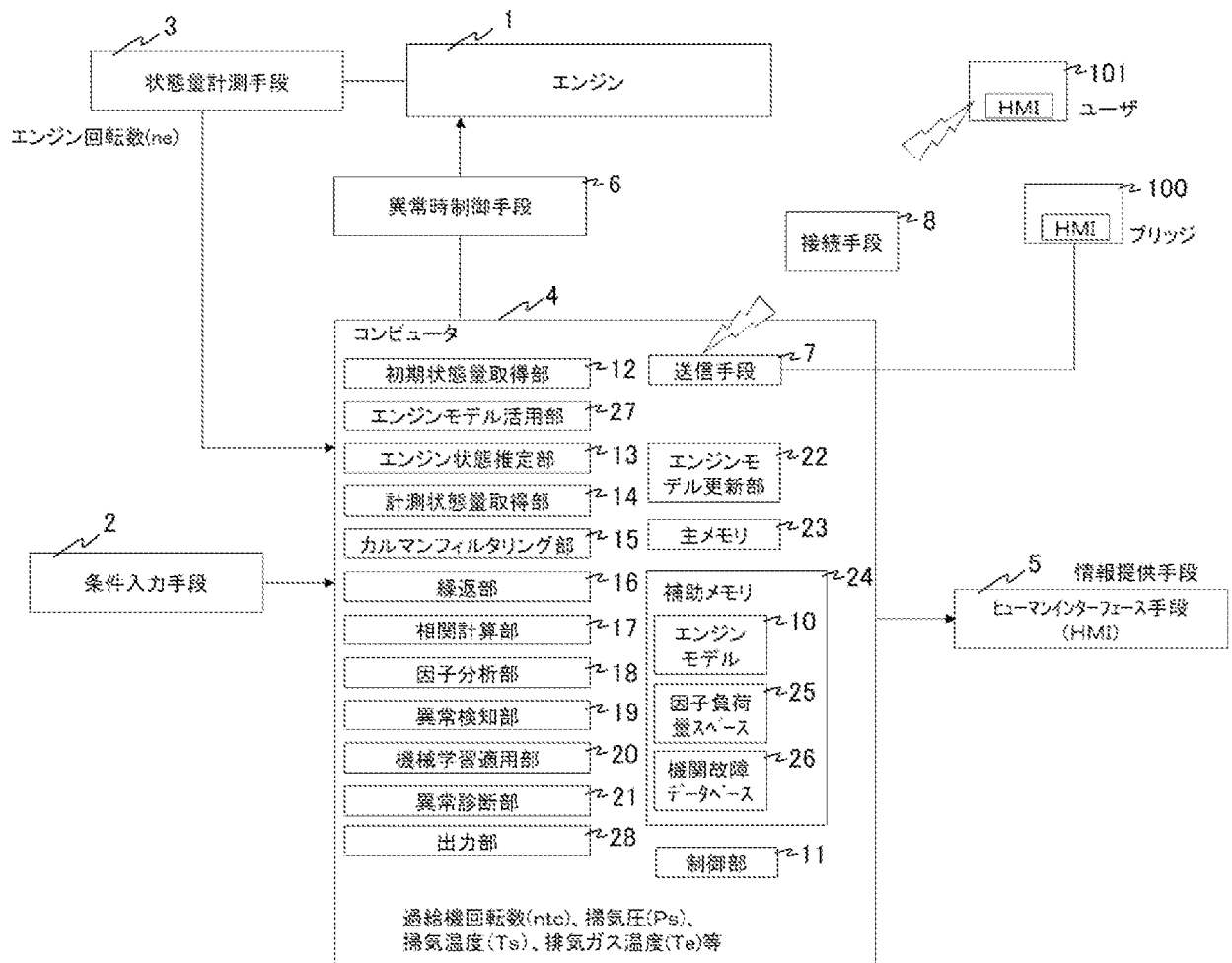
前記情報提供手段で、前記異常の診断結果として、前記エンジンの過給機回転数($n_{t.c}$)、掃気圧(P_s)、掃気温度(T_s)、及び排気ガス温度(T_e)の少なくとも1つの結果を提供することを特徴とする請求項10から請求項12のいずれか1項に記載のエンジンの異常診断システム。

[請求項14]

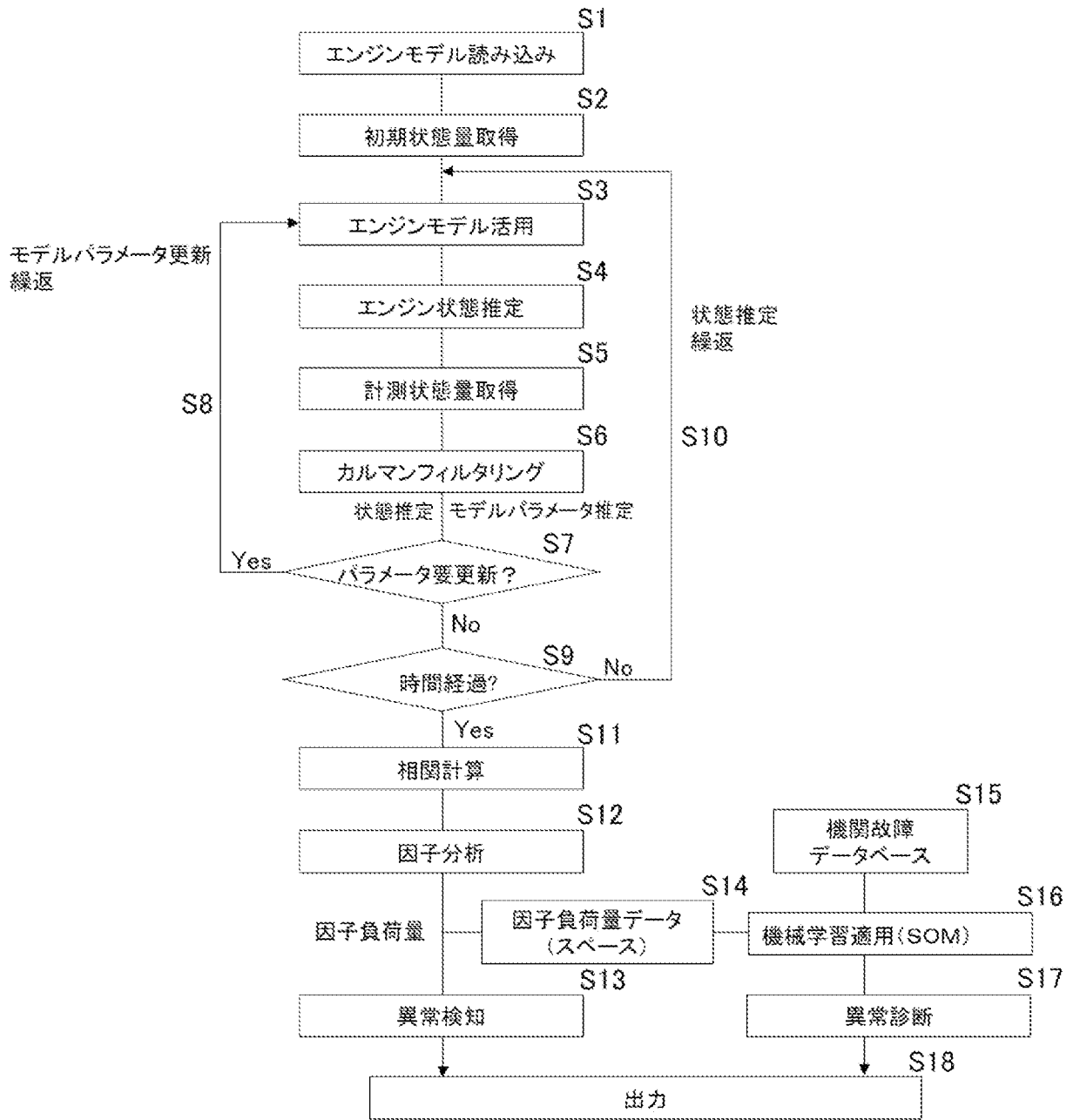
前記異常情報の前記出力に基づいて、異常時に前記エンジンを制御する異常時制御手段を備えたことを特徴とする請求項10から請求項13のいずれか1項に記載のエンジンの異常診断システム。

- [請求項15] 前記情報提供手段として、ヒューマンインターフェース手段を用いて前記異常情報を提供することを特徴とする請求項10から請求項14のいずれか1項に記載のエンジンの異常診断システム。
- [請求項16] 前記情報提供手段で提供される前記異常情報を、他の箇所に送信する送信手段を備えたことを特徴とする請求項10から請求項15のいずれか1項に記載のエンジンの異常診断システム。
- [請求項17] 前記状態量計測手段と、前記コンピュータと、前記情報提供手段とをオンラインで接続する接続手段を備えたことを特徴とする請求項10から請求項16のいずれか1項に記載のエンジンの異常診断システム。

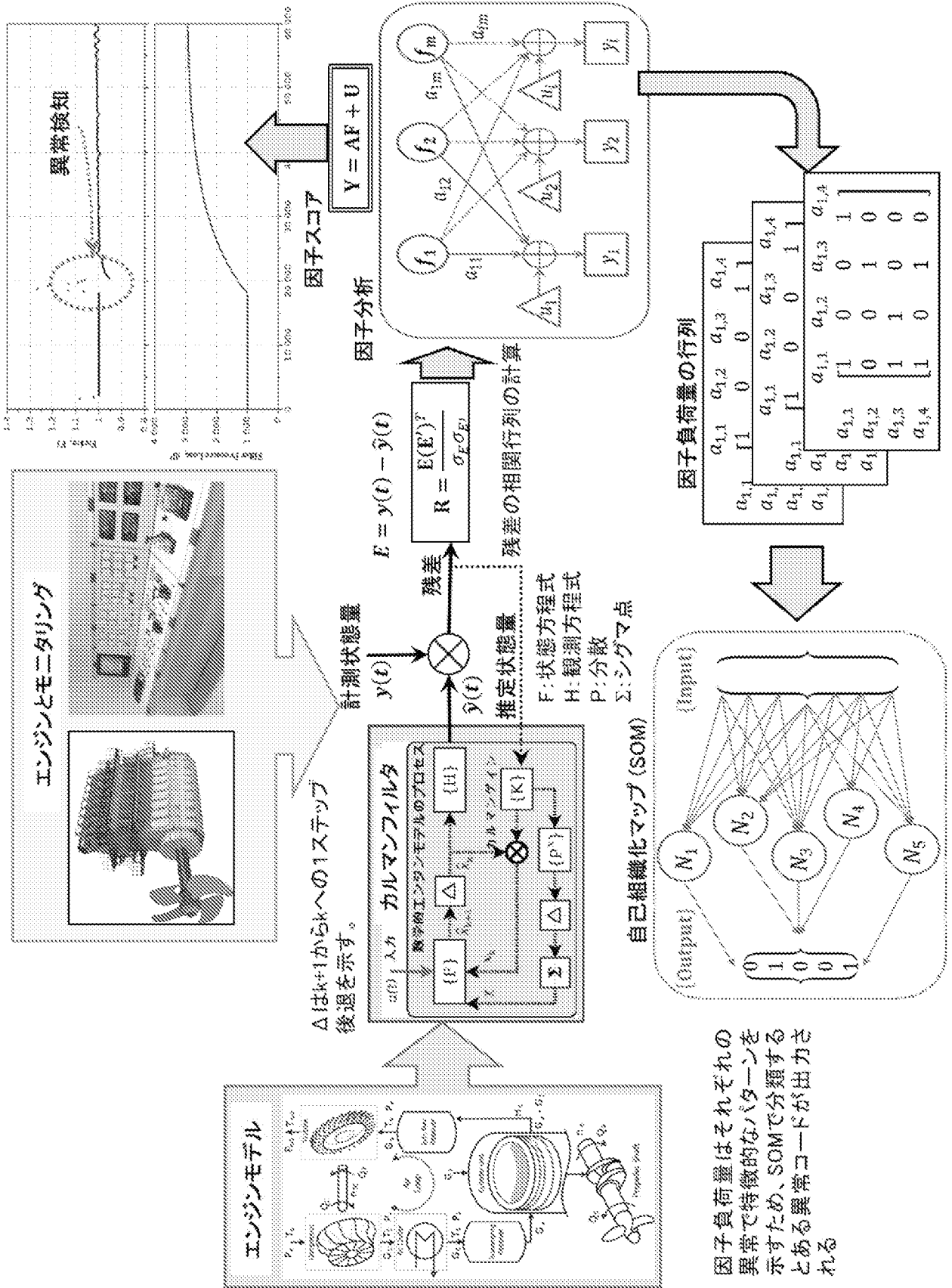
[図1]



[図2]



[図3]



[図4]

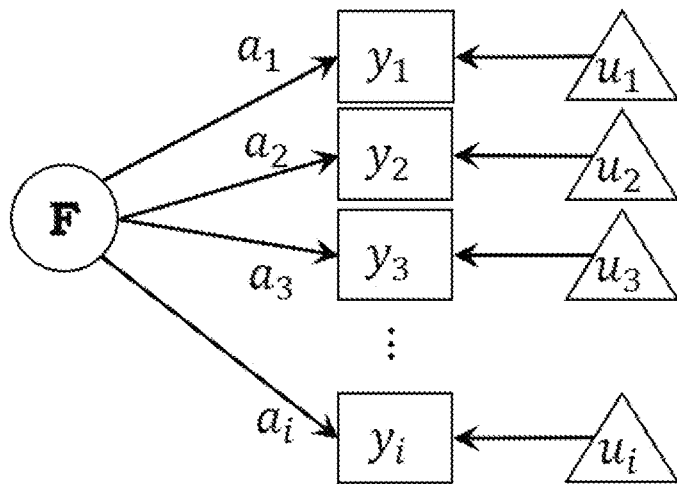


図5

ある区間の計測値の
 行列(標準化)
 各行は例えば1分毎
 の計測値で例えば10
 分まとめたもの

$$\begin{matrix} y_1 & & & & y_m \\ \begin{bmatrix} b_{0,1} \\ \vdots \\ b_{t,1} \end{bmatrix} & \dots & \dots & \dots & \begin{bmatrix} b_{0,m} \\ \vdots \\ b_{t,m} \end{bmatrix} \end{matrix} \quad (a)$$

相関行列の計算と続く
 特異値分解

生データ (各行は9個の計測値(推定値)で4区間まとめる)

Times, sec	y ₁	y ₂	y ₃	y ₄	y ₅	y ₆	y ₇	y ₈	y ₉
61	0.901	0.901	0.793	0.944	0.87	0.822	0.788	0.523	0.847
62	0.903	0.896	0.792	0.967	0.87	0.764	0.785	0.508	0.792
63	0.898	0.891	0.788	0.967	0.87	0.798	0.781	0.899	0.818
64	0.897	0.887	0.783	0.967	0.87	0.822	0.776	0.817	0.839
65	0.898	0.889	0.778	0.966	0.87	0.831	0.772	0.816	0.847
66	0.9	0.894	0.778	0.966	0.87	0.83	0.771	0.816	0.847
67	0.902	0.902	0.782	0.966	0.87	0.812	0.774	0.824	0.835

残差

$$E = y(t) - \hat{y}(t)$$

$$R = \frac{E(E)^T}{\sigma_E \sigma_{Rt}}$$

[残差の相関行列の計算]

相関行列

1.00	0.64	0.41	0.02	0.75	-0.38	0.62	-0.28
0.64	1.00	0.76	0.02	0.35	-0.50	0.99	-0.41
0.41	0.76	1.00	0.04	0.20	-0.41	0.76	-0.26
0.02	0.02	0.04	1.00	0.07	-0.01	0.03	-0.05
0.75	0.35	0.20	0.07	1.00	-0.49	0.34	0.01
-0.38	-0.50	-0.41	-0.01	-0.49	1.00	-0.50	-0.15
0.62	0.99	0.76	0.03	0.34	-0.50	1.00	-0.41
-0.28	-0.41	-0.26	-0.03	0.01	-0.15	-0.41	1.00

特異値 (SVD)

3.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	1.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.92	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.41	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

主因子負荷量の計算
 (因子は行ベクトルで表せる)

0.635	0.056
0.988	0.045
0.595	0.062
0.003	0.000
0.352	0.396
0.387	0.254
0.872	0.052
0.146	0.505

$$R = USV^T \quad A = U_{1:m} \sqrt{S_{1:m}} \quad (c)$$

2主因子の分散

$$V_1 = 3.877, \quad V_2 = 1.37$$

$$V_j = \sum_{i=1}^n a_{ij}^2$$

因子スコア(総分散に対する各分散の割合)

$$D_1 = 0.739, \quad D_2 = 0.261$$

λ_{ij} 分散に対する因子負荷量の割合

0.121	0.011
0.169	0.009
0.113	0.012
0.001	0.000
0.067	0.075
0.074	0.048
0.166	0.010
0.028	0.096

$$\lambda_{ij} = \frac{a_{ij}^2}{V_j} \quad \lambda =$$

$$D_j = \frac{V_j}{\sum_{r=1}^R V_r} \quad (d)$$

2主因子に対する因子負荷量

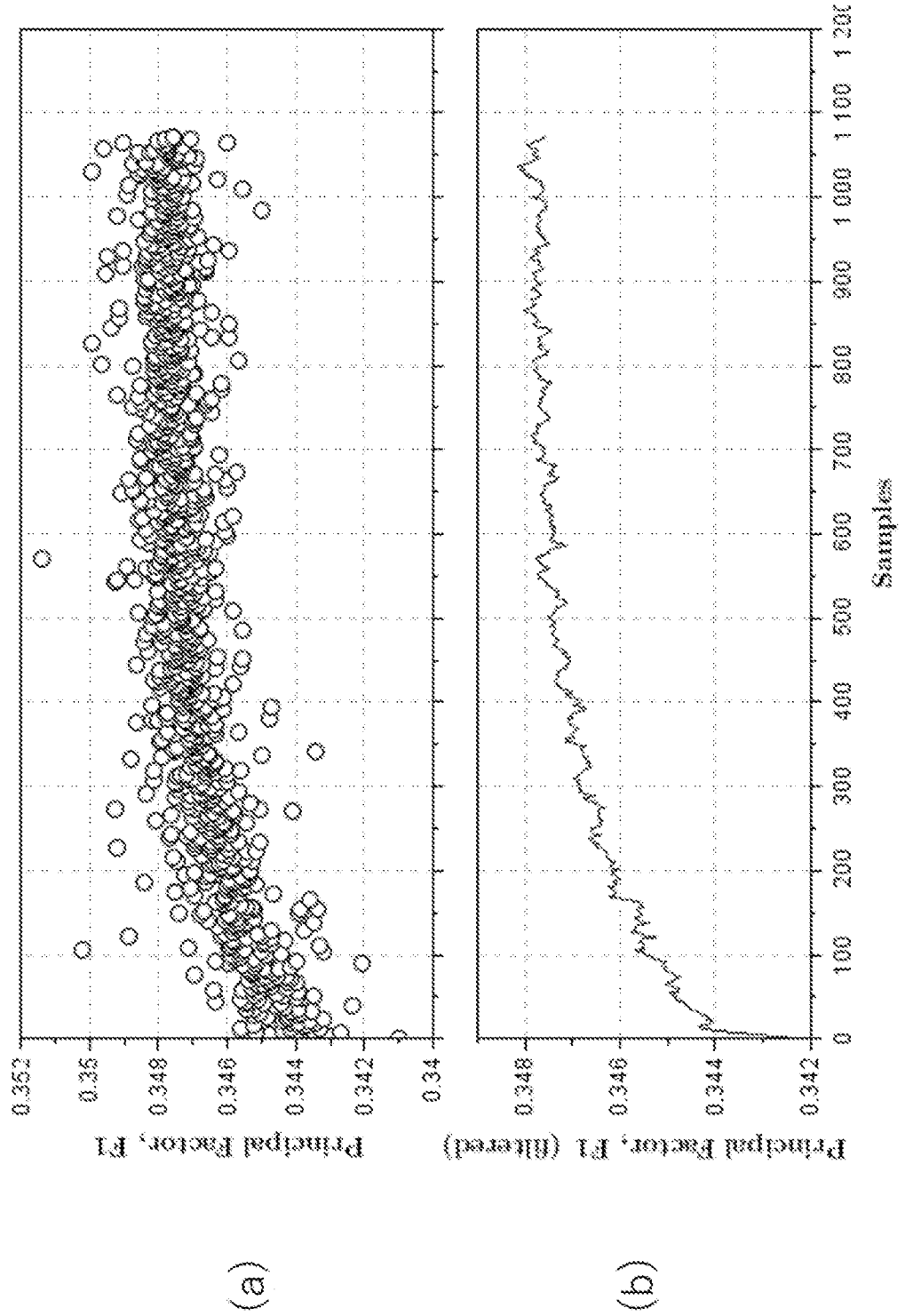
[図6]

$$F1 = D1 = \frac{V_1}{\sum_{r=1}^J V_r}$$

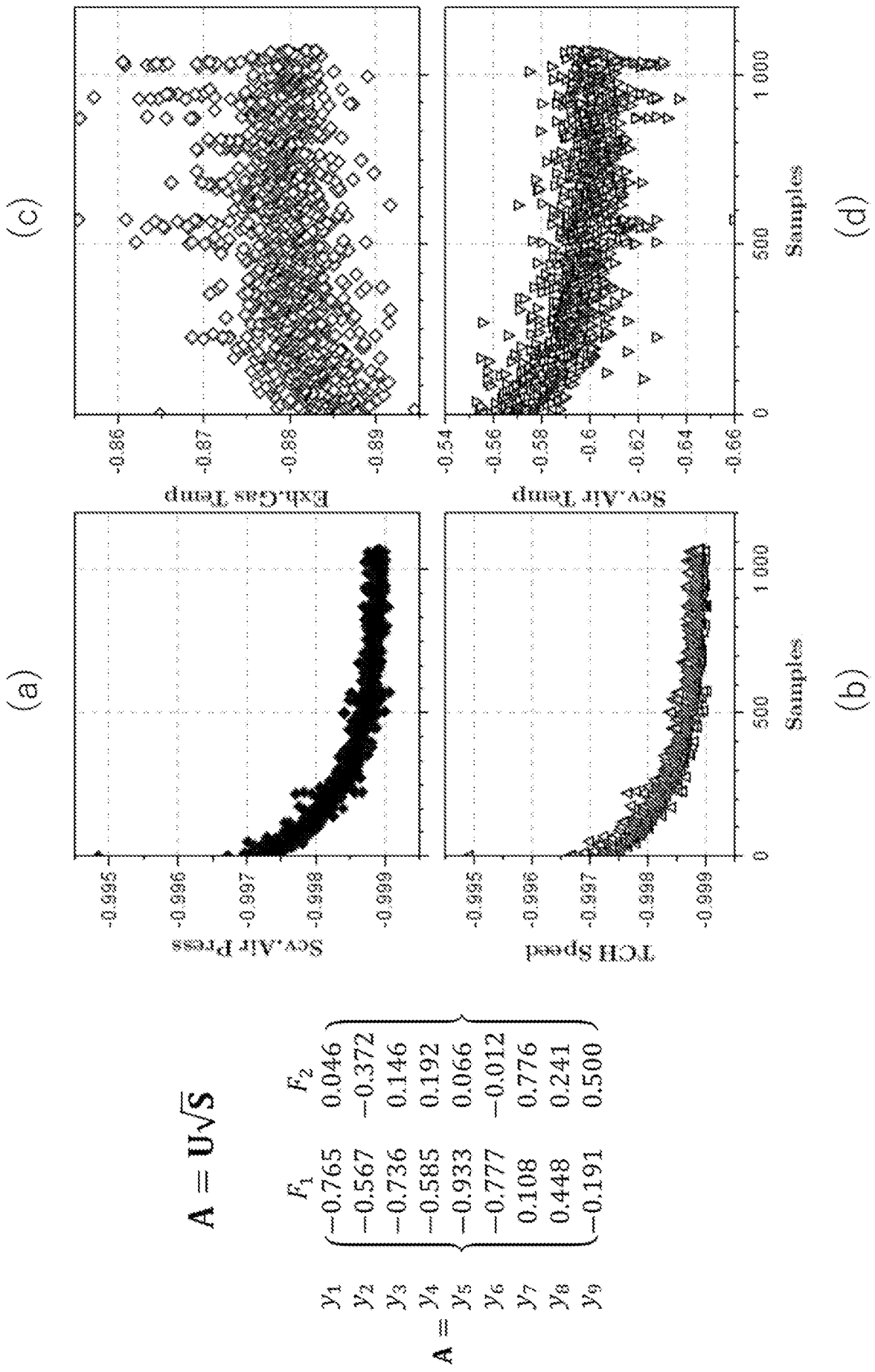
因子負荷量行列とそれに続く因子スコア

$$A = U\sqrt{S}$$

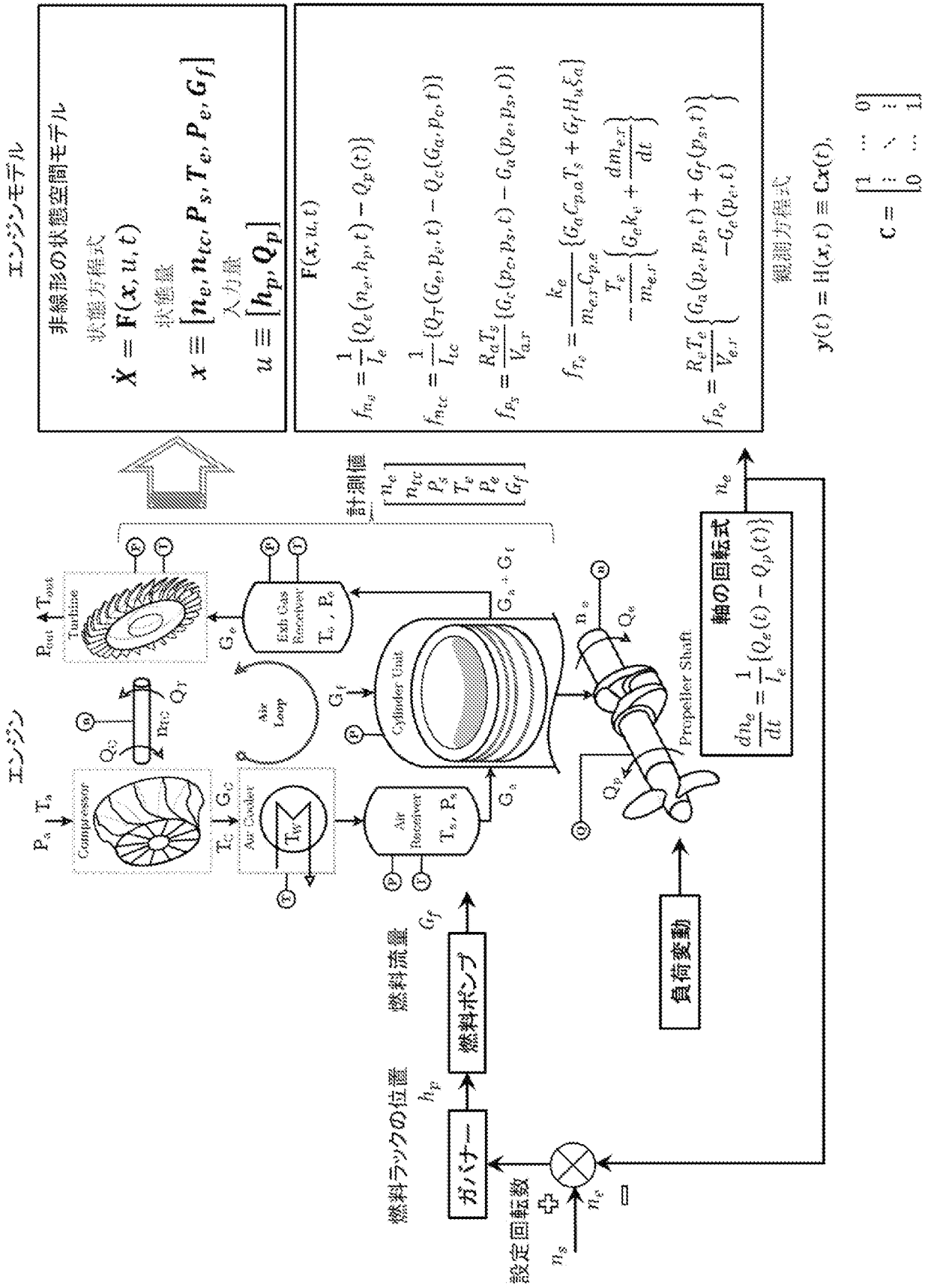
$$F1 = D1$$



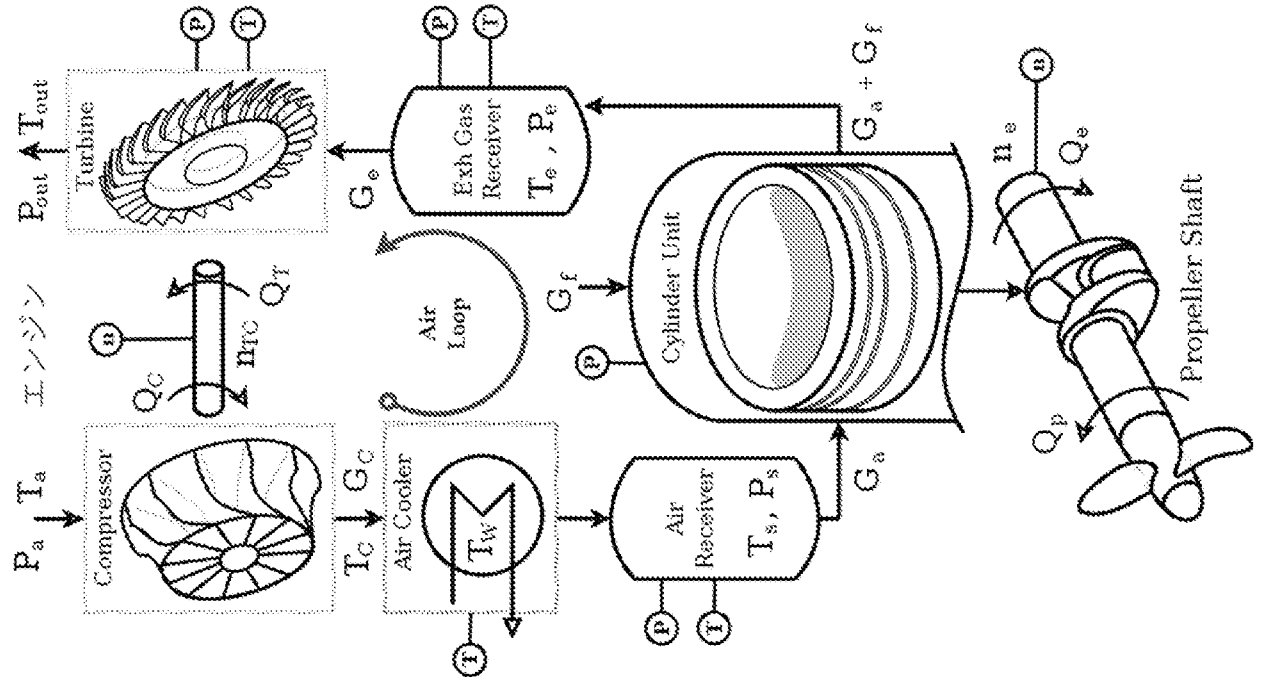
[図7]



【図8】

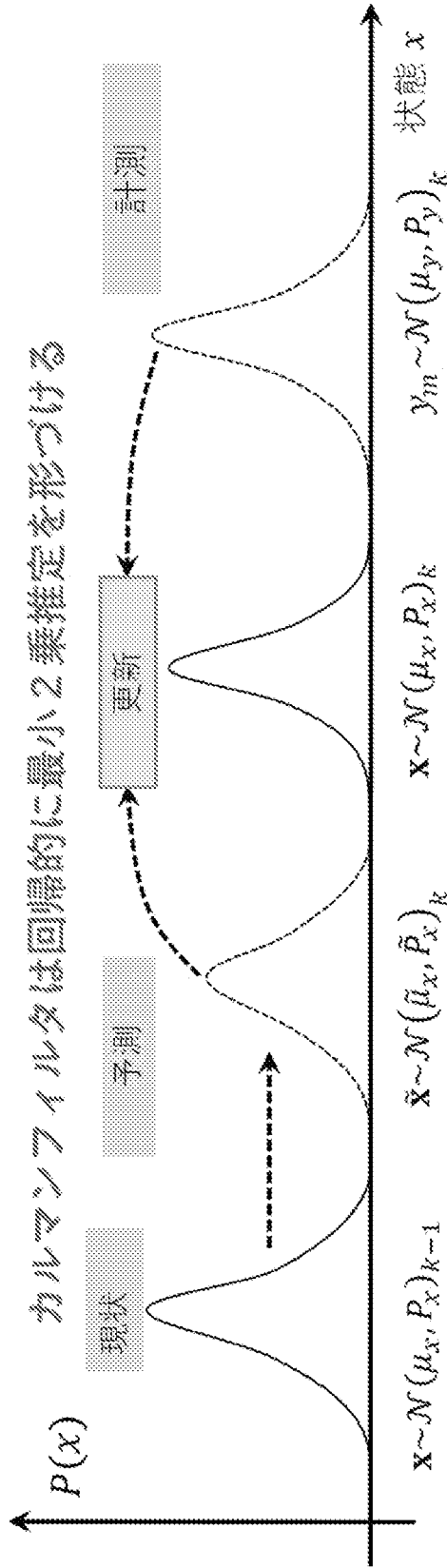


[図9]



- Q_p - プロペラトルク
- Q_e - エンジントルク
- I_e, I_{tc} - 慣性モメント
- h_p - 燃料ポンプラック位置
- n_e - エンジン回転数
- n_{tc} - 通給機回転数
- P_a - 大気圧
- T_a - 大気温度
- P_s - 掃気圧
- T_s - 掃気温度
- P_{c1} - シリンダー内最大圧縮圧
- P_{c2} - シリンダー内最大燃焼圧
- P_{c1} - シリンダー内平均有効圧
- V_{ar} - 掃気レシモバニ体積
- V_{er} - 排気レシモバニ体積
- $R_a, R_e, k_e, C_{pe}, C_{pa}$ - 熱力学的定数
- T_w - 冷却水温度
- T_c - コンプレッサニ出口温度
- P_e - 排気ガス圧
- T_e - 排気ガス温度
- T_{out} - タービン出口温度
- P_{out} - タービン出口圧
- G_f - 燃料流量
- G_g - 掃気流量
- G_c - コンプレッサニ空気流量
- G_e - 排気ガス流量

[図10]



アンセンテッドカルマンフィルタ: 予測ステップ

- 1) $2N+1$ 個のシグマポイントの計算:

$$\mathbf{x}_{k-1}^{(0)} = \mu_x$$

$$\mathbf{x}_{k-1}^{(i)} = \mu_x + \sqrt{(N+k)P_x}, \quad i = 1 \dots N$$

- 2) シグマポイントの展開

$$\mathbf{x}_k^{(i)} = f_{k-1}(\mathbf{x}_{k-1}^{(i)}, u_{k-1}), \quad i = 0 \dots 2N$$

- 3) 予測された状態の平均と共分散の計算

$$\mu_x = \sum_{i=0}^{2N} w^{(i)} \mathbf{x}_k^{(i)}$$

$$P_x = \sum_{i=0}^{2N} w^{(i)} (\mathbf{x}_k^{(i)} - \mu_x) (\mathbf{x}_k^{(i)} - \mu_x)^T + Q \text{ (展開ノイズの分散)}$$

- 1) 計測値の予測

$$\mathbf{y}_k^{(i)} = h_k(\mathbf{x}_k^{(i)}), \quad i = 0 \dots 2N$$

- 2) 平均値と共分散の推定

$$\mu_y = \sum_{i=0}^{2N} w^{(i)} \mathbf{y}_k^{(i)}$$

$$P_y = \sum_{i=0}^{2N} w^{(i)} (\mathbf{y}_k^{(i)} - \mu_y) (\mathbf{y}_k^{(i)} - \mu_y)^T + R \text{ (測定ノイズの分散)}$$

$$P_{xy} = \sum_{i=0}^{2N} w^{(i)} (\mathbf{x}_k^{(i)} - \mu_x) (\mathbf{y}_k^{(i)} - \mu_y)^T$$

- 3) カルマンゲインの計算

$$K_k = P_{xy} P_y^{-1}$$

- 4) 状態量と分散の更新

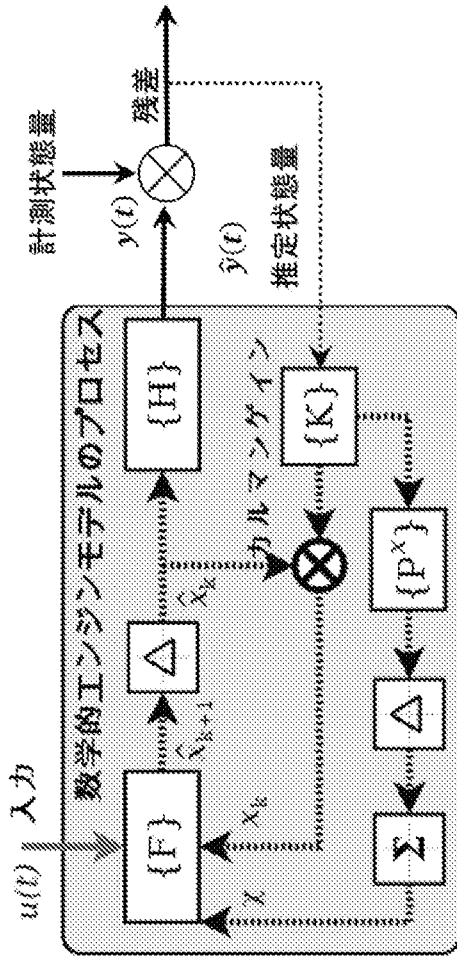
$$\mathbf{x}_k = \mu_x + K_k (y_m - \mu_y)$$

$$P_x = P_x - K_k P_y K_k^T$$

アンセンテッドカルマンフィルタ: 更新ステップ

[図 11]

➤ カルマンフィルタを用いた状態観測器



➤ 因子分析モデル

$$Y = AF + U$$

因子分析モデルのパラメータの推定は、相関行列(共分散行列)から推定される

$$R = \frac{E(E)^T}{S_F S_F}$$

{ Correlation }

1) 計測値を予測する

$$y_{k+1}^{(0)} = H(y_{k+1}^{(0)}), \quad i = 0, \dots, 2N$$

2) 平均と共分散を推定する

$$\mu_{k+1}^y = \sum_{i=0}^{2N} w^{(i)} y_{k+1}^{(i)}$$

$$P_{k+1}^y = \sum_{i=0}^{2N} w^{(i)} (y_{k+1}^{(i)} - \mu_{k+1}^y) (y_{k+1}^{(i)} - \mu_{k+1}^y)^T + \text{計測ノイズ分散}$$

$$P_{k+1}^{xy} = \sum_{i=0}^{2N} w^{(i)} (y_{k+1}^{(i)} - \mu_{k+1}^y) (y_{k+1}^{(i)} - \mu_{k+1}^y)^T$$

3) カルマンゲインの計算

$$K_{k+1} = P_{k+1}^{xy} (P_{k+1}^y)^{-1}$$

4) 更新された状態の推定値と共分散

$$x_{k+1} = \mu_{k+1}^x + K_{k+1} E, \quad \dots, E = (y_m - y_{k+1})$$

$$P_{k+2}^x = P_{k+1}^x - K_{k+1} P_{k+1}^y K_{k+1}^T$$

カルマンゲイン

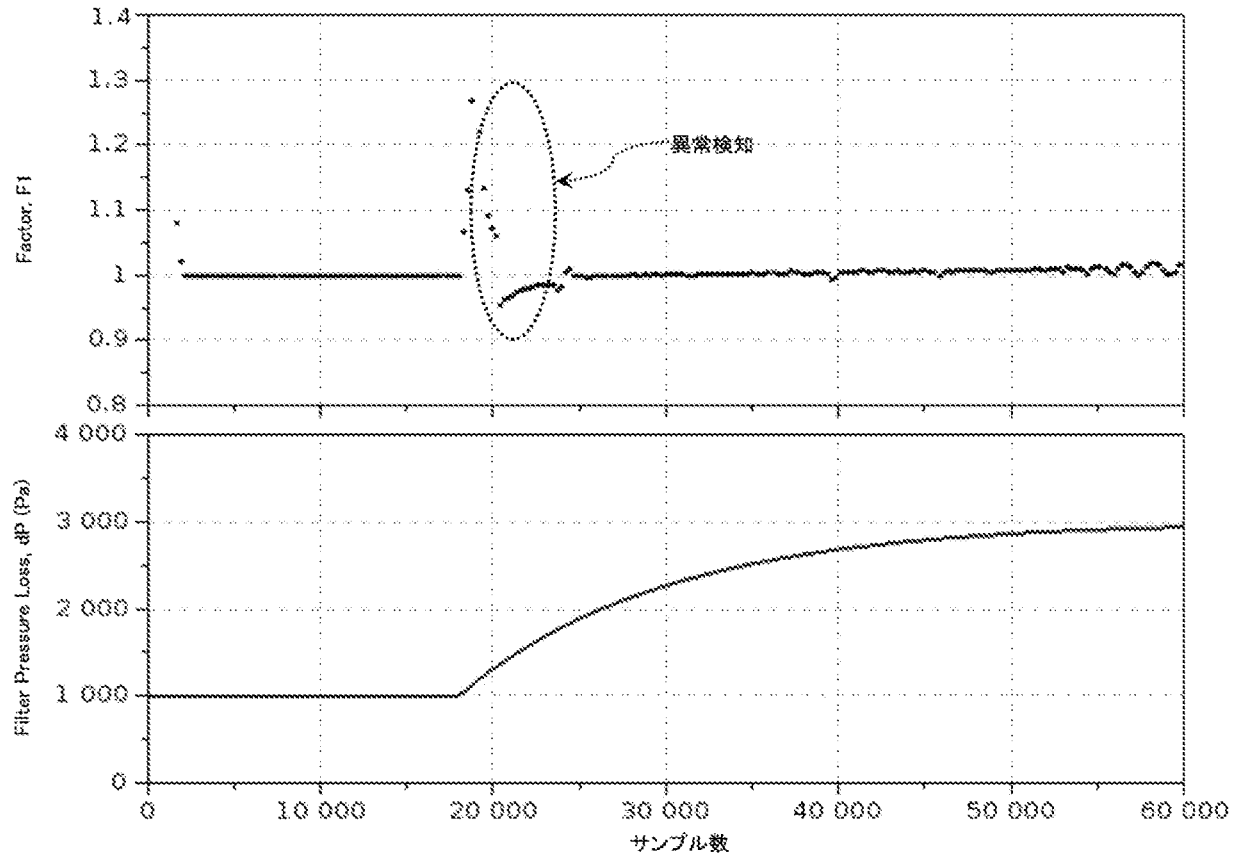
n_o - 計測値

h_p, Q_p - 入力

n_e - 推定値

- デジタルツインのエンジンモデルがカルマンフィルタ観測器のベースである。
- 共分散推定が毎回行われる。
- カルマンゲインはどの状態量を修正すべきかのインディケータとして使われる。

[図12]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2021/025526

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER		
<i>F02D 45/00</i> (2006.01)i FI: F02D45/00 345; F02D45/00 372		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
B. FIELDS SEARCHED		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) F02D45/00		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2021 Registered utility model specifications of Japan 1996-2021 Published registered utility model applications of Japan 1994-2021		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	WO 2019/175707 A1 (SEMICONDUCTOR ENERGY LABORATORY CO., LTD.) 19 September 2019 (2019-09-19) paragraphs [0040]-[0161], fig. 1-12	1-17
Y	JP 10-339664 A (BABCOCK-HITACHI KK) 22 December 1998 (1998-12-22) abstract, paragraphs [0005]-[0024], fig. 1-11	1-17
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "E" earlier application or patent but published on or after the international filing date "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified) "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed "T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art "&" document member of the same patent family		
Date of the actual completion of the international search 17 September 2021		Date of mailing of the international search report 28 September 2021
Name and mailing address of the ISA/JP Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan		Authorized officer Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/JP2021/025526

Patent document cited in search report	Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)	Publication date (day/month/year)
WO 2019/175707 A1	19 September 2019	US 2021/0055352 A1 paragraphs [0051]-[0164], fig. 1A-12D	
JP 10-339664 A	22 December 1998	(Family: none)	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） F02D 45/00(2006.01)i FI: F02D45/00 345; F02D45/00 372		
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC）） F02D45/00 最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1922 - 1996年 日本国公開実用新案公報 1971 - 2021年 日本国実用新案登録公報 1996 - 2021年 日本国登録実用新案公報 1994 - 2021年		
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	WO 2019/175707 A1 (株式会社半導体エネルギー研究所) 19.09.2019 (2019 - 09 - 19) 段落0040-0161, 図1-12	1-17
Y	JP 10-339664 A (パブコック日立株式会社) 22.12.1998 (1998 - 12 - 22) 要約, 段落0005-0024, 図1-11	1-17
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。		
* 引用文献のカテゴリー “A” 特に関連のある文献ではなく、一般的な技術水準を示すもの “E” 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの “L” 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） “O” 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 “P” 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願の日の後に公表された文献	“T” 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と抵触するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの “X” 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの “Y” 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの “&” 同一パテントファミリー文献	
国際調査を完了した日 17.09.2021	国際調査報告の発送日 28.09.2021	
名称及びあて先 日本国特許庁(ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 戸田 耕太郎 3G 9329 電話番号 03-3581-1101 内線 3355	

国際調査報告
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2021/025526

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO 2019/175707 A1	19.09.2019	US 2021/0055352 A1 段落0051-0164, 図1A-12D	
JP 10-339664 A	22.12.1998	(ファミリーなし)	