(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第4540955号
(P4540955)

(45)発行日　平成22年9月8日(2010.9.8)　(24)登録日　平成22年7月2日(2010.7.2)

(51)Int.Cl.		F I		
F02C 9/28	(2006.01)	F02C	9/28	A
F02C 9/00	(2006.01)	F02C	9/28	C
G05B 13/04	(2006.01)	F02C	9/28	Z
		F02C	9/00	A
		G05B	13/04	

請求項の数 10　(全 20 頁)

(21)出願番号　特願2003-320682(P2003-320682)
(22)出願日　平成15年9月12日(2003.9.12)
(65)公開番号　特開2004-162698(P2004-162698A)
(43)公開日　平成16年6月10日(2004.6.10)
審査請求日　平成18年9月12日(2006.9.12)
(31)優先権主張番号　10/293,078
(32)優先日　平成14年11月13日(2002.11.13)
(33)優先権主張国　米国(US)

(73)特許権者　390041542
ゼネラル・エレクトリック・カンパニイ
ＧＥＮＥＲＡＬ　ＥＬＥＣＴＲＩＣ　ＣＯＭＰＡＮＹ
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、スケネクタデイ、リバーロード、１番
(74)代理人　100137545
弁理士　荒川　聡志
(74)代理人　100105588
弁理士　小倉　博
(74)代理人　100106541
弁理士　伊藤　信和

最終頁に続く

(54)【発明の名称】ガスタービンを制御するためのモデル・ベースの適応制御システム

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
ガスタービン・エンジン（５１）を制御して、前記エンジン（５１）の性能を最適化するためのモデル・ベースの適応制御方法であって、前記方法が、
ａ）前記エンジン（５１）の現在の状態についての情報を獲得し、
ｂ）モデル・ベースの適応制御システムにおけるモデル（５２）の前記エンジン（５１）についてのモデル・データ情報を更新して、該エンジン（５１）の前記現在の状態を反映させ、
ｃ）前記エンジン（５１）の前記現在の状態についての前記情報を、前記モデル（５２）の該エンジン（５１）についての前記モデル・データ情報と比較し、
ｄ）センサ、アクチュエータ、エンジン、及びサブシステムの情報を診断し、あらゆる更新された情報をマスター・モード・セレクタ及び再構成可能な制御装置に送り、
ｅ）前記モデル（５２）、制約条件、目的関数、及び制御パラメータの正しい形態を再構成し、
ｆ）前記エンジン（５１）の前記現在の状態、前記目的関数、及び該エンジン（５１）の前記制約条件が与えられた場合に、取るべき最適な修正制御動作を判断し、
ｇ）前記最適な修正制御動作を実行するために制御コマンドを出力し、
ｈ）前記エンジン（５１）の前記目的関数を常に最適化することを保証するように、必要に応じて（ａ）から（ｇ）までの段階を繰り返す、
段階を含むことを特徴とする方法。

【請求項２】
前記再構成段階が、前記エンジン（５１）の前記現在の状態について獲得された情報を用いて、前記モデル（５２）、制約条件、目的関数、及び制御パラメータを修正する段階を含むことを特徴とする請求項１に記載の方法。
【請求項３】
前記判断段階が、オプティマイザを利用して、前記エンジン（５１）の前記現在の状態、前記目的関数、及び該エンジン（５１）の前記制約条件が与えられた場合に、取るべき前記最適な修正制御動作を判断する段階を含むことを特徴とする請求項１に記載の方法。
【請求項４】
ガスタービン・エンジン（５１）を制御して、前記エンジン（５１）の性能を最適化するためのモデル・ベースの適応制御システムであって、前記システムが、
ａ）前記エンジン（５１）の現在の状態についての情報を獲得するための手段と、
ｂ）モデル・ベースの適応制御システムにおけるモデル（５２）の前記エンジン（５１）についてのモデル・データ情報を更新して、該エンジン（５１）の前記現在の状態を反映させるための手段と、
ｃ）前記エンジン（５１）の前記現在の状態についての前記情報を、前記モデル（５２）の該エンジン（５１）についての前記モデル・データ情報と比較するための手段と、
ｄ）センサ、アクチュエータ、エンジン、及びサブシステムの情報を診断し、あらゆる更新された情報をマスター・モード・セレクタ及び再構成可能な制御装置に送るための手段と、
ｅ）前記モデル（５２）、制約条件、目的関数、及び制御パラメータの正しい形態を再構成するための手段と、
ｆ）前記エンジン（５１）の前記現在の状態、前記目的関数、及び該エンジン（５１）の前記制約条件が与えられた場合に、取るべき最適な修正制御動作を判断するための手段と、
ｇ）前記最適な修正制御動作を実行するために制御コマンドを出力するための手段と、
ｈ）前記エンジン（５１）の前記目的関数を常に最適化することを保証するように、必要に応じて（ａ）から（ｇ）までの段階を繰り返すための手段と、
を備えることを特徴とするシステム。
【請求項５】
前記モデル（５２）、制約条件、目的関数、及び制御パラメータの正しい形態を再構成するための前記手段が、前記エンジン（５１）の前記現在の状態について獲得された情報を用いて、該モデル（５２）、制約条件、目的関数、及び制御パラメータを修正することを含む請求項４に記載のシステム。
【請求項６】
前記取るべき最適な修正制御動作を判断するための前記手段が、オプティマイザを利用して、前記エンジン（５１）の前記現在の状態、前記目的関数、及び該エンジン（５１）の前記制約条件が与えられた場合に、取るべき該最適な修正制御動作を判断するための手段を含むことを特徴とする請求項４に記載のシステム。
【請求項７】
ガスタービン・エンジン（５１）を制御して、前記エンジン（５１）の作動性を最適化するためのモデル・ベースの適応制御方法であって、前記方法が、
ａ）前記エンジン（５１）の現在の状態についての情報を獲得し、
ｂ）モデル・ベースの適応制御システムにおけるモデル（５２）の前記エンジン（５１）についてのモデル・データ情報を更新して、該エンジン（５１）の前記現在の状態を反映させ、
ｃ）前記エンジン（５１）の前記現在の状態についての前記情報を、前記モデル（５２）の該エンジン（５１）についての前記モデル・データ情報と比較し、
ｄ）センサ、アクチュエータ、エンジン、及びサブシステムの情報を診断し、あらゆる更新された情報をマスター・モード・セレクタ及び再構成可能な制御装置に送り、

ｅ）前記モデル（５２）、制約条件、目的関数、及び制御パラメータの正しい形態を再構成し、
ｆ）前記エンジン（５１）の前記現在の状態、前記目的関数、及び該エンジン（５１）の前記制約条件が与えられた場合に、取るべき最適な修正制御動作を判断し、
ｇ）前記最適な修正制御動作を実行するために制御コマンドを出力し、
ｈ）前記エンジン（５１）の前記目的関数を常に最適化することを保証するように、必要に応じて（ａ）から（ｇ）までの段階を繰り返す、
段階を含むことを特徴とする方法。
【請求項８】
前記再構成段階が、前記エンジン（５１）の前記現在の状態について獲得された情報を用いて、前記モデル（５２）、制約条件、目的関数、及び制御パラメータを修正する段階を含むことを特徴とする請求項７に記載の方法。
【請求項９】
ガスタービン・エンジン（５１）を制御して、前記エンジン（５１）の作動性を最適化するためのモデル・ベースの適応制御システムであって、前記システムが、
ａ）前記エンジン（５１）の現在の状態についての情報を獲得するための手段と、
ｂ）モデル・ベースの適応制御システムにおけるモデル（５２）の前記エンジン（５１）についてのモデル・データ情報を更新して、該エンジン（５１）の前記現在の状態を反映させるための手段と、
ｃ）前記エンジン（５１）の前記現在の状態についての前記情報を、前記モデル（５２）の該エンジン（５１）についての前記モデル・データ情報と比較するための手段と、
ｄ）センサ、アクチュエータ、エンジン、及びサブシステムの情報を診断し、あらゆる更新された情報をマスター・モード・セレクタ及び再構成可能な制御装置に送るための手段と、
ｅ）前記モデル（５２）、制約条件、目的関数、及び制御パラメータの正しい形態を再構成するための手段と、
ｆ）前記エンジン（５１）の前記現在の状態、前記目的関数、及び該エンジン（５１）の前記制約条件が与えられた場合に、取るべき最適な修正制御動作を判断するための手段と、
ｇ）前記最適な修正制御動作を実行するために制御コマンドを出力するための手段と、
ｈ）前記エンジン（５１）の前記目的関数を常に最適化することを保証するように、必要に応じて（ａ）から（ｇ）までの段階を繰り返すための手段と、
を備えることを特徴とするシステム。
【請求項１０】
前記モデル（５２）、制約条件、目的関数、及び制御パラメータの正しい形態を再構成するための前記手段が、前記エンジン（５１）の前記現在の状態について獲得された情報を用いて、該モデル（５２）、制約条件、目的関数、及び制御パラメータを修正することを含む請求項９に記載のシステム。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、一般に、ガスタービン・エンジンを制御するためのシステム及び方法に関する。より具体的には、本発明は、エンジンの性能及び／又は作動性を最適化することができるように、１つ又はそれ以上のエンジン部品又はシステムの劣化、不良、故障又は損傷後の能力を最大にするモデル・ベースの適応制御システム及び方法に関する。
【背景技術】
【０００２】
機械及び電子部品及び／又はシステムは、劣化し、故障し、又は損傷を受ける可能性がある。エンジン部品、センサ、アクチュエータ、又は何らかのエンジン・サブシステムを含む、ガスタービン・システムにおける任意の部品は、劣化、故障、又は損傷を受けやす

く、これにより、エンジンが公称条件から離れることになる。これらの不調がガスタービンの性能に関して有する影響は、影響がないもの（すなわち、マルチセンサ・システムにおける単一のセンサの故障によるもの）から、エンジン出力又は推力制御の全損（すなわち、アクチュエータの故障、又はエンジン部品の損傷の場合）に及ぶ。公称から性能が変化した場合に所望の性能レベルを回復するためにエンジンの状態管理に必要とされる技術段階は、検出（すなわち、変化の存在を判断すること）、分離（すなわち、変化の場所又は原因を求めること）、特定（すなわち、変化の規模を求めること）、及び対応（すなわち、利用可能な最適性能及び／又は作動性を達成するように制御を再構成し又は適応させること）を含む。劣化、故障、及び／又は損傷したガスタービンの全てのモードに対して最適な方法でこれらの段階の全てを実行することは非常に困難である。このため、モデル・ベース制御の故障及び損傷適応に基づいた手法は、エンジンの劣化、不良、故障、及び損傷の迅速な検出及び識別、及びこのような不調が存在する状態での適切な制御認識及び再構成に対して適切であると考えられ、その結果エンジンの性能及び／又は作動性を最適化することができる。

【０００３】

現在、ガスタービン・システムは、感知された使用可能なパラメータに関して、作動目標及び限界が設定及び制御されたセンサ・ベースの制御システムに依存している。典型的には、オンラインのエンジン状態管理は、センサの故障検出（すなわち、検出範囲及び検出率のチェック）、及びアクチュエータ位置のフィードバック・エラーや、更に、失速検出、ロータ過速度、及び他のこのような出力又は推力制御の損失を示すもののような幾つかの選択されたシステムの異常チェックに限定されている。エンジン部品又はシステムが故障するか、又は内部に不良が検出された場合には、部品／システムの不良／故障は、個別ベースで対処される（すなわち、各部品／システムが、その制御調整器又は発見的オープンループ論理によって制御される）。更に、既存の制御システムにおける不良への対応論理は、所定の不良又は故障を修正するために取ることができる、先験的に求められた一連の可能な修正制御動作をもたらすだけである。従って、特定の不良又は故障が、一連の可能な修正制御動作に予めプログラムされていなかった場合には、最適な解法が存在しないので、制御システムは、この不良／故障を修正する最適な解法を選択することができない。回転エンジン部品が損傷した場合のような損傷状況は、現在でさえも特に既存の制御システムによって対処されていない。

【特許文献１】米国特許３８５１１５７号明細書
【特許文献２】米国特許４４２３５９４号明細書
【特許文献３】米国特許４４９０７９１号明細書
【特許文献４】米国特許出願公開２００３／００９３２１１号明細書
【特許文献５】米国特許出願公開２００３／０１３１６０５号明細書

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【０００４】

現在のところ利用可能な、劣化、不良、故障、及び／又は損傷用のモデル・ベースの適応制御システム及び方法は存在しない。従って、このような制御システム及び方法への必要性がある。また、任意のエンジン部品又はシステムが公称から離れた時にはいつでも、制御システムにおけるモデル、最適化、目的関数、制約条件、及び／又はパラメータが、自らを修正し、更新し、及び／又は再構成して、その結果、できるだけ多くの性能及び／又は作動性を回復することができるような、システム及び方法への必要性もある。更に、制御システムが、リアルタイムで自らを更新するようなシステム及び方法への必要性もある。また、コンピュータを用いて自動化されるようなシステム及び方法への必要性もある。更に、検出された劣化、不良、故障、及び損傷についての情報を取得し、このような情報を制御システムにおける適切なモデル、最適化、目的関数、制約条件、及び／又はパラメータに組み入れて、現在のエンジン状態が与えられた場合に、該システムが最適化された動作を取ることを可能にするようなシステム及び方法への別の必要性もある。また、シ

ステム内に既にプログラムされた先験的な解法を有する劣化、不良、故障、又は損傷だけではなく、あらゆるレベルの劣化、不良、故障、又は損傷を対応させることが可能となるようなシステム及び方法への必要性もある。更に、航空機エンジン、発電所、船舶用推進力、又は産業用途におけるガスタービンのような、ガスタービン制御に使用することができるシステム及び方法への必要性がある。

【課題を解決するための手段】

【０００５】

従って、上で特定された既存のシステム及び方法の欠点は、モデル・ベースの適応制御システム及び方法に関する本発明の実施形態によって克服される。本発明の実施形態は、任意のエンジン部品又はシステムが公称から離れた時にはいつでも、制御システムにおけるモデル、最適化、目的関数、制約条件、及び／又はパラメータが、自らを修正し、更新し、及び／又は再構成して、その結果、できるだけ多くの性能及び／又は作動性を回復することができるような、システム及び方法を含む。幾つかの実施形態において、制御システムにおけるモデル、最適化、目的関数、制約条件、及び／又はパラメータが、リアルタイムで自らを更新し、幾つかの実施形態においては、コンピュータを用いてシステム及び方法が自動化される。本発明のシステム及び方法の実施形態は、検出された劣化、不良、故障、及び損傷についての情報を獲得し、こうした情報を、制御システム内のモデル、最適化、目的関数、制約条件、及び／又はパラメータに組み入れることができ、エンジンの現在の状態が与えられた場合に、該制御システムが最適化された動作を取ることが可能になる。本発明のシステム及び方法の実施形態は、システム内に既にプログラムされた先験的な解法を有する劣化、不良、故障、又は損傷だけでなく、あらゆるレベルの劣化、不良、故障、又は損傷を対応させることを可能にする。更に、本発明のシステム及び方法の実施形態は、航空機のエンジン、発電所、船舶用推進力、又は産業用途におけるガスタービンのようなガスタービン制御に用いることができる。

【０００６】

本発明は、モデルが制御しているエンジンを表すように適合された、モデル・ベースの適応制御システム及び方法を含む。モデルの適応により、エンジンが公称条件から遠ざかるように動いた時に制御を適応させ又は再構成する方法について、制御システムが、より多くの情報を得ること及び／又はより最適な判断を下すことが可能になる。この適応は、エンジン部品自体における、又はエンジンの制御システム又はその部品のいずれにおいても、エンジンごとのばらつき、劣化、不良、故障、及び／又は機械的損傷からの影響を含むものである。

【０００７】

これらのモデル・ベースの適応制御システムは、劣化、不良、故障、及び／又は損傷を検出し、次にこれらの情報を獲得し、該情報を該制御システムにおけるモデル、最適化、目的関数、制約条件、及び／又はパラメータ内に、好ましくはリアルタイムで組み入れることができる。この情報により、現在のエンジン状態が与えられた場合に、制御システムが最適化された動作を取ることが可能になる。これらの制御システムは、リアルタイムで更新され、適応されるので、該制御システムにおけるモデル内に既にプログラムされている先験的な解法を有する劣化、不良、故障、及び損傷だけでなく、あらゆるレベルの劣化、不良、故障、及び損傷にも対応することが可能になる。

【０００８】

これらのモデル・ベースの適応制御システム及び方法は、（１）監視制御が、所定のミッション又はイベントのために推進力、出力、及び／又は電気出力を管理することができるように、該監視制御に十分な情報を与え、（２）エンジン制御における自律性のレベルを上げ、（３）該監視制御によるエンジン制御の一体化を支援し、及び（４）エンジンに関連する意思決定能力を改善することによって、オペレータの作業負荷を軽減し、自律的なガスタービン作動を可能にするように設計される。

【０００９】

多くのモデル・ベースの適応制御システムは、制御されることになる各部品及び／又は

システムのモデルを設計することにより生成される。例えば、圧縮機、タービン、燃焼器などの各エンジン部品及びシステムのモデルを有することができる。各モデルは、ある時間にわたる部品又はシステムの動作についての特徴又は動力学特性（すなわち、加速度は加えられたトルクの積分値であるとするもの）を含む。システムは、モデルからのモデル化された情報に基づいて、出力データを制御し、推定し、修正又は特定することができる。例えば、アクチュエータが特定の位置において動かなくなったために推力又は出力が失われた場合には、システムは、入力の制約条件として固定された該アクチュエータに対する制御を保持し、次いで他のアクチュエータに出力される制御を適応させ、その結果、他の制約条件に違反せず、できるだけ多くの失われた推力又は出力を回復することができ、よってガスタービンは作動を続けることができる。

【００１０】

本発明は、性能又は作動性のいずれかを最適化することを可能にするものである。性能最適化モードが選択された場合には、目標は、推力、出力、電気、特定の燃料消費、部品の耐用年数、応力、温度、圧力、圧力比、速度、アクチュエータ・コマンド、流量、金銭、費用などを最大又は最小にしようとすることを含む。このことにより、より長いエンジンの実行時間、燃料の節約、過渡性能の増強、部品の耐用年数の増大、及び／又はエンジンを作動するための費用の低下がもたらされる。作動性最適化モードが選択された場合には、目標は、失速余裕を管理し、作動性を増大させ、飛行中の事故を防止しようとする。このことにより、推力の損失又は出力制御イベントの喪失の減少、エンジンの残存力の増加、及び劣化、不良、故障、及び／又は損傷が存在する状態でのエンジンの作動時間の増加がもたらされる。

【００１１】

本発明は、システムモデル、推定器、モデル・ベースの診断、及びモデル・ベースの制御、又はモデル予測制御を備えるモデル・ベースの適応制御システム及び方法を含む。物理的ベースのモデル及び経験的モデルは、制御及び診断目的のために、感知されたエンジン・パラメータの分析的冗長性、及び測定されていないパラメータへのアクセスを提供する。これらのモデルはまた、システムの未来の動作も予測する。種々のモデルに関連した推定器は、モデルの状態を推定し、該モデルがエンジン及びサブシステム並びに部品を正確に表していることを保証する。モデル・ベースの診断は、モデル及び感知されたパラメータの両方に依存して、正確なエンジン状態の情報（すなわち、劣化、損傷、及びエンジン・システムの不良及び／又は故障）を提供する。モデル予測制御は、モデルの予測能力及びモデル・ベースの診断からの情報を用いて、部品及び／又はシステムの劣化、不良、損傷、及び／又は損傷、及びミッション区分に特有の作動目標がある状態で、堅牢（ロバスト）で高性能なエンジンの制御を維持する。エンジン全体の状態管理は、オンボード診断、故障許容制御（Fault－tolerant control）、及びモデル・ベースコントローラの適応の集合からもたらされる。

【００１２】

本発明の更なる特徴、態様、及び利点は、図面全体を通して同じ参照番号が同じ部品を示す、本発明の幾つかの好ましい形態を示す添付図面を参照して、以下の説明の過程において当業者には容易に明らかになるであろう。

【発明を実施するための最良の形態】

【００１３】

本発明のシステム及び方法は、種々の図面を参照して以下に説明される。

【００１４】

本発明の理解を深めるために、図１から図１３までに示されるように、特定の用語が同じものを説明するために用いられた、本発明の幾つかの好ましい実施形態について説明する。ここで用いられる用語は、説明のためのものであり、限定のためのものではない。ここに開示された特定の構造及び機能の詳細は、限定として解釈すべきではなく、単に本発明を様々に利用するため当業者に教示するための代表的な基礎として、特許請求の範囲についての基礎として解釈すべきである。本発明において、公知の回路、プログラミング、

方法論、構造、及び制御システムが用いられるが、本発明を分かりにくくしないように、ここでは詳細に説明しない。示されるモデル・ベースの適応制御システム及び方法における如何なる修正又は変形及び当業者が通常行うような、ここに示される本発明の原理の更なる用途は、本発明の範囲内にあると考えられる。

【００１５】

本発明は、モデル・ベースの適応制御システム及び方法を含む。これらのシステム及び方法は、劣化、不良、故障又はエンジンへの損傷を検出し、このような情報を制御システムにおける適切なモデル、最適化、目的関数、制約条件及び／又はパラメータの中に組み入れることができ、現在のエンジン状態が与えられた場合に、できる限り多くの性能及び／又は作動性を回復するように、該システムが迅速に最適化された動作を取ることを可能にする。

【００１６】

本発明の実施形態において、これらに限定されるわけではないが、エンジン自体、ガス経路及びガス経路の動力学、アクチュエータ、エフェクタ、又は何らかのエンジン動作を修正又は変更する他の制御デバイス、センサ、モニタ、又は感知システム、燃料計量システム、燃料供給システム、潤滑システム、及び／又は油圧システムを含む、あらゆる物理的システム、制御システム、或いはエンジン又はエンジン・サブシステムの特性をモデル化することができる。これらの部品及び／又はシステムのモデルは、物理学ベースのモデルとすることができる（それらの線形の近似を含む）。更に、又は代替的には、このモデルは、線形及び／又は非線形のシステム特定、ニューラル・ネットワーク、及び／又はこれらの全ての組み合わせに基づくことができる。

【００１７】

ガスタービンは、ブレイトン熱力学サイクルに基づいて仕事又はエネルギーを生成する空気吸入エンジンである。ガスタービンの幾つかの例には、これに限定されないが、航空機エンジン、電力システム、船舶用途のための推進機関、ポンプとして用いられるタービン、複合サイクルの発電所で用いられるタービン、及び他の産業用途に用いられるタービンが含まれる。ガスタービンにおいて、熱エネルギーは、燃料と空気との燃焼、燃料と酸化剤との燃焼、化学反応、及び／又は熱源との熱交換から取り出される。次に、熱エネルギーは、有用な仕事に変換される。この仕事を、推力、軸動力、又は電気の形態で出力することができる。これらのエンジンの性能又は作動は、アクチュエータの使用により制御される。ガスタービンにおけるアクチュエータの幾つかの例には、これに限定されないが、燃料計量弁、入口案内羽根、可変ステータ羽根、可変の幾何学的形状、抽気弁、始動混合気弁、間隙制御弁、入口抽気熱、可変排気ノズルなどが含まれる。感知されるエンジンの値の幾つかの例には、これに限定されないが、温度、圧力、ロータ速度、アクチュエータの位置、及び／又は流量が含まれる。アフターバーナ式ガスタービン・エンジンのレイアウト１０、及びステーションの表示１２、センサ１４、及びアクチュエータ１６の１つの例示的な概略図が図１に示される。

ここでは、アクチュエータが、

【００１８】

【表１】

ＩＧＶ	入口案内羽根
ＶＳＶ	可変ステータ羽根
ＭＦＭＶ	主燃料計量弁
ＡＦＭＶ	アフターバーナ燃料計量弁
Ａ８	可変排気ノズル

【００１９】

を含み、

センサが、

【００２０】
【表２】

Ｔ２	ファン入口温度
Ｎ２	ファン速度
ＰＳ１４	ファン出口静圧
Ｐ２５	圧縮機入口圧力
Ｎ２５	コア速度
ＰＳ３	圧縮機吐出静圧
Ｔ４Ｂ	高圧タービン出口温度

【００２１】
を含む。
【００２２】
本発明は、エンジン・システム及び該エンジン・システムの部品における変化に対処するために体系的な手法を用いる。これは、あらゆる検出された変化を用いて、モデル・ベースの制御システムにおけるモデルを更新することによって達成される。これらの変化は、エンジン又はエンジン部品のいずれかに対して、エンジンごとのばらつき、劣化、機械的、電気的、又は化学的な不良、故障、損傷や、或いは制御システム及び／又は該システムの部品に対して、機械的、電気的、又は化学的な不良、故障、損傷を含むことができる。フィルタ、トラッキング・フィルタ、論理又は他の適切な方法を用いることによって、制御システム内のモデルを適応させ、該モデルの状態、変数、品質パラメータ、スカラー、加算器、制約条件、制限、又は他の適応可能なパラメータを修正することができ、パラメータが変更された後、該モデルの性能及び限界をエンジンのものと合致させるようにする。更新されたモデルと共に検出されたあらゆる変化についての情報を用いて、モデル・ベースの制御システムは、エンジンの現在の状態を評価して、モデルが更新されなかった場合、及びこのような情報が該制御システムに伝達されなかった場合よりも、より最適化された制御動作を取ることができる。これらのシステム及び方法の１つの利点は、これらのシステム及び方法をリアルタイムで更新することができるので、制御システムのモデル内に既にプログラムされている先験的な解法を有する劣化、不良、故障、及び損傷だけでなく、あらゆるレベルの劣化、不良、故障、及び損傷にも対応することが可能となることである。
【００２３】
ガスタービンの性能及び／又は作動性を制御するには、所望の出力を生成するのに必要とされる適切な制御値を求めるために多数の変数を分析する必要がある。この多数の変数は、非線形の形で互いに影響することがあり、従って、これに応じて該変数を作動させる必要がある。高性能の航空機及び／又は現在の電力システムなどのように、正確さ及び反応速度が重要である場合には、特定のシステム内で多数の変数が互いに持つ様々な影響を表すモデルを形成することは困難である。こうしたモデルにおいては、あらゆる事態を簡単には網羅することはできないことから、このようなモデルが、エンジン・センサのデータに基づいて予測又は修正を行うために再構成し、適応し、学習することが望ましい。本発明において、標準状態又は劣化状態についてのこうした適応性は、モデルの入力、出力又は内部パラメータを修正する推定器又はトラッキング・フィルタを用いることによりもたらされる。不良、故障、又は損傷状態についてのこのような適応性は、異なるモデル間で選択することができ、又モデルの入力、出力又は内部パラメータを修正することができ、或いは最適化、目的関数、制約条件、及び／又は制御におけるパラメータを修正することができる診断を用いることによりもたらされる。次に、修正されたモデル、最適化、目的関数、制約条件、及び／又はパラメータが与えられた場合には、オプティマイザを用いて最適な性能及び／又は作動性を得ることができる。
【００２４】

ガスタービン・エンジンには、大きな範囲の作動条件及び作動中に経験する出力レベルに起因して、強い非線形性が存在する。また、機械的、空気力学的、熱的、及び流量の制限に起因して、タービンの作動が制限される。モデル予測制御は、特に、非線形性と、全てが単一の制御定式化内にある多くの変数の入力制約及び出力制約の双方とを処理することができるので、このような環境に理想的なものである。モデル予測制御は、システムへの入力及び最も新しいプロセス測定に基づいて、特定の瞬間までの出力を予測するためにプロセス／システム／部品のモデルを用いる全状態のフィードバック制御である。本発明の実施形態に用いられるようなモデル予測コントローラに従う基本的な段階を示すフローチャートが、図２に示される。モデル予測制御の主な考え方は、次の時間間隔にわたってモデル予測の性能を用いて、現在のシステム状態から開始し、制約された最適化を介して制御入力シーケンスを選択することである。一般的に言えば、モデル予測制御は、性能、安全性、及び／又は環境的制約条件を満足する必要のあるプロセスを制御するために用いられる制御パラグラムである。

【００２５】

本発明のモデル・ベース制御におけるモデルは、過渡状態の性能及び定常状態の性能の両方を再現するように設計される。これらのモデルは非線形の形態で用いることができ、或いは異なる作動条件に対して線形化するか又はパラメータ化することができる。モデル・ベースの制御の技術は、正常に感知されたパラメータに加えて、測定されていないエンジン・パラメータへのアクセスを得るために、モデルを利用するものである。これらの測定されていないパラメータは、例えば、推力、失速余裕、部品効率、及び／又は空気流量を含むことができる。制御ループの相互作用を明らかにするためにこれらの制御を多入力多出力（ＭＩＭＯ）とすることができ、モデル・ベースにすることができ、各々の限界についてコントローラの設計を排除するように、制御定式化及び最適化の一体部分として構築された限界又は制約条件を有することができる。本発明についての現在の方法は、コントローラを、有限視野に制限された最適化の一部として用いることができる目的関数及び制約条件に畳み込もうとすることを含む。

【００２６】

航空機３０についての現在の制御システムの概略が、図３に示される。本発明のモデル・ベースの適応制御システムは、現在の制御システムより優れており、１つ又はそれ以上のモデル、１つ又はそれ以上の推定器、１つ又はそれ以上の診断又は不良検出アルゴリズム、１つ又はそれ以上の再構成可能なモデル・ベースの制御、１つ又はそれ以上のオプティマイザ、及びマスター・モード・セレクタのような、幾つかの要素を含むことができる。

【００２７】

より小さな故障を検出し、より最適な制御決定をすることができるように、制御システムは、制御中のエンジン又はエンジン・サブシステムについてできる限り多くの情報を有することが好ましい。システムについてのこの情報を得るのに最も良い方法の１つは、制御内に動的モデルを用いることである。これを行うことにより、現在の周囲条件及びアクチュエータ・コマンド、システム内のパラメータ間の関係、測定されたパラメータと測定されていないパラメータとの関係、及びエンジンの状態を示すパラメータが与えられた場合に、異なるエンジン・パラメータがどのように応答すべきかについての情報が与えられる。モデルが動的である場合には、これらの情報の全ては定常状態及び過渡ベースの両方で見出される。また、モデルは、過去の測定のプロフィール又は現在の性能を分析するために用いることができ、或いは、エンジンが未来の時間視野にわたってどのように動作するかを予測するために用いることができる。モデルは、線形又は非線形、物理学ベース、及び／又はシステム識別ベースとすることができる。モデルは、例えば、入口、ファン、圧縮機、燃焼器、高圧タービン、低圧タービン、アフターバーナ、可変領域排気ノズル、及びアクチュエータや燃料システム及び潤滑システムなどを含む他の部品又はサブシステムを含む、システムレベルにおけるエンジンの主部品の各々を表すことができる。このモデルの実施形態において、公称エンジン又はサブシステムの定常状態及び過渡性能は、再

生成され、モデル・ベースの制御及び推定器内で用いられる。他の実施形態は、単一又は多数のモデル不良診断システムにおいて不良特性、故障特性、又は損傷特性を有するモデルを用いることができる。

【００２８】

各エンジンは様々であり、劣化し、また、不良又は損傷する可能性があるので、モデルは、こうした変化に従うように追従することができ、すなわち自己適応できなければならない。好ましくは、モデルは、所定の時間において特定のエンジンがどのように作動しているかについての現在情報を明らかにしなければならない。これにより、エンジンの未来の動作をより正確に予測することが可能になり、エンジンのより小さな不良又は損傷レベルを検出することが可能になる。エンジン・パラメータとエンジン状態は、エンジン・モデルを修正して現在のエンジンに合致させることができる該モデルの２つの領域である。パラメータ推定器を用いてエンジン・パラメータを求めることができ、状態推定器を用いてエンジン状態を求めることができる。

【００２９】

パラメータ推定器は、エンジンのセンサとモデルのセンサとの間の誤差を低減するように、エンジン・モデルにおけるパラメータを推定して修正する。これは、モデルのエンジンへの追従と呼ばれる。図４は、エンジンに追従するモデルの一実施例を示す。この図は、公称モデル・データが、エンジン・データからの大きな割合の偏差を有しており（４０）、追従後、エンジン・データとモデル・データとの間の誤差が著しく低減された（４２）ことを示す。この相違の低減は、劣化、不良、故障、又は損傷に対する感度を増大させることができ、より優れた予測能力を与える。修正されたパラメータは、通常、品質パラメータ（すなわち、部品効率、流量、入力スカラー、出力スカラー、及び／又は加算器）と呼ばれる部類に属する。部品効率のようなこれらの品質パラメータを、診断アルゴリズムへの入力として用いることができる。例えば、圧縮機効率が、定常状態での作動中に数ポイントだけ低下した場合には、品質パラメータは、圧縮機内に損傷が生じたことを示すことができる。実施形態において、パラメータ推定器は、過渡情報及び定常状態情報の両方についてリアルタイムで働くことができる。

【００３０】

モデルをエンジンに追従させるのを更に支援するために、状態推定器を用いることができる。また、各時間間隔でモデル・ベース制御５４を開始するために、状態情報を用いることもできる。モデル・ベース制御装置５４は、全状態のコントローラであるので、初期化して正確に機能するようにエンジンの現在状態の推定を使用することができる。状態推定器５０のアーキテクチャの例示的な一実施形態が、図５に示される。この図は、実際のエンジン５１とこの図の下側のエンジン・モデル５２との間の差を表すプロセスの偏差（ｗ）及びセンサ・ノイズ（Ｖ）を有する離散状態空間モデルとして実際のエンジン５１を示している。状態推定器５０の目標は、モデルの動力学及びｗとｖの共分散が与えられた場合、モデルとエンジンとの間の差を説明するために、最適利得Ｋ５３を求めることである。位置センサを有する単純なマス・バネ・ダンパ系に基づくこの種の技術を用いることによって獲得できる結果の実施例が、図６に示される。図の左側６０は、センサ６２だけを用いて、センサの測定値から実際の値を引いた結果を示し、右側６４は、状態推定器を用いた結果から実際の値６６を引いた結果を示す。この図は、エンジンの動力学及びセンサ・ノイズについての知識を有する状態推定器を使用することによって、実際の位置についてはるかに正確な値を求めることができることを示している。この同じ種類の結果を、エンジン・システムに対して定常状態中及び過渡エンジン作動中の両方にリアルタイムで適用することができる。

【００３１】

本発明における診断の役割は、ガスタービン・システムにおけるあらゆる劣化、不良、故障、又は損傷を、検出し、分離し、識別することである。幾つかの実施形態において、診断システムは、モデル・ベースの診断、又は多数モデル・ベースの診断に基づくことができ、ここで、モデル及びモデル構造、革新、パラメータ更新、状態、センサ値、センサ

推定などのような他の制御部品からの情報を用いて、エンジンの不調を診断する。こうした情報を用いて、該診断は、不調がある場合には、該不調の位置する場所及び規模を求めることができ、次にこの情報を、マスター・モード・セレクタ及びモデル・ベースコントローラに送ることができる。

【００３２】

再構成可能なモデル予測制御を用いることにより、システムモデル、推定器、マスター・モード・セレクタ、及び診断システムにより提供された全ての情報を制御システムが用いることが可能となる。モデル予測制御（ＭＰＣ）は、モデルと制御における現在状態の情報とを用いて、エンジン又はシステムの未来の動作を予測する。制御入力が進んだ場合には、未来の動作の予測を形成することができるので、何らかの作動上の制約条件（例えば、アクチュエータ、温度、速度、圧力、トルクなどについての制限）に依然として従いながら、どれが所望の基準（例えば、速度、圧力比、推力など）を追従することになるのかを見出すために、未来の視野にわたって多くの異なる制御運動を試験することができる。次に、所望の結果を与える制御シーケンスが求められると、次のサンプル期間において、該シーケンスの第１の制御動作を実行することができる。その後、このプロセスを繰り返すことができる。ここで用いられるアルゴリズムにより、コントローラが未来の時間視野にわたってエンジンがしようとしていることを見出すこと、及び同時にエンジンの作動制約条件を認識することが可能となる。次いで、制御は、制御目的を最適に満たしながら全ての制約に違反しないことを保証するために、全ての制御動作を修正することができる。このことは、制御が、ミッション要件に適応する最も可能性のある解法を開発することができることを意味する。

【００３３】

最適化アルゴリズムが解決できる形態に問題を変換することによって、最も優れた制御シーケンスを求めることができる。ＭＰＣは、有限視野の目的関数の有制約オープンループ最適化に基づいている。この最適化は、仮定された既知の初期状態から開始し、出力の進展について表す動的システムモデルを用いる。図７は、ＭＰＣの基盤となるレシーディング ホライズン制御（receding horizon control）７０の基本概念を示す。時間ｋ７１において、入力変数７２（ｕ（ｋ）、ｕ（ｋ＋１）、・・・ｕ（ｋ＋ｐ－１））は、予測視野７３（ｐ）にわたって性能基準を最適化するように選択される。計算された最適制御運動のうち、第１のサンプル（ｕ（ｋ））についての値だけが、実際に実行される。次の間隔７４、７４’、及び別のｐ入力値（すなわち、ｕ（ｋ＋１）、ｕ（ｋ＋２）、・・・ｕ（ｋ＋ｐ））の計算の前に、初期状態が、出力測定値から再推定される。これは、閉ループ制御を実際に実行するための表面上のオープンループストラテジーをもたらす。

【００３４】

目的関数は、制御システムの目標を定義する数学的手法である。この目的関数は、最適として定義されるものを求める。幾つかの一般的な目的関数は、燃料消費を最小にし、推力を最大にし、エンジンの耐用年数を最大にし、応力を最小にし、温度を最小にし、基準圧力に従い、基準圧力比に従い、基準推力又は出力に従い、基準速度に従い、アクチュエータ・コマンドを最小又は最大にし、基準流量に従い、金銭を最小にし、及び／又は費用を最小にするものである。図８は、詳細なエンジン及びフライト・シミュレータ８０について推力又はマッハ数を最大にするためにＭＰＣを用いる実施例を示す。この図は、この作動条件の場合に、航空機のマッハ数が、制御においてモデル・ベースの最適化を用いることによって、９％増加したことを示している。制御内部で使用される最適化アルゴリズムは、有制約又は無制約のものとすることができ、線形又は非線形とすることができる。

【００３５】

推定を有するＭＰＣは、エンジンごとのばらつき、劣化、スケジュールの概算、及びエンジン構成変更を明らかにすることによって、従来の制御にわたって、性能及び／又は作動性利得を得る。また、推定を有するＭＰＣは、（１）非線形及びＭＩＭＯであること（より速い加速、及び改善された操縦性をもたらす）から、（２）モデル・ベースであること（更新されたモデル・パラメータを含むことにより低い限界要件をもたらす）から、（

３）その予測性質（耐用期間を向上させる経路形状をもたらす）から、及び（４）その更新可能な制約条件（作動性を維持する）からも、性能及び／又は作動性利得を得る。

【００３６】

再構成可能なモデル予測制御（ＲＭＰＣ）は、従来のＭＰＣの特性の全てを有するが、付加的な能力も有する。ＲＭＰＣは、推定器の情報、診断情報、及びマスター・モード・セレクタからのコマンドに基づいて、モデル、制約条件、及び／又は目的関数を修正又は再構成することができる。実施形態において、再構成可能なモデル予測制御についての第１段階は、他のシステム部品からデータを収集することである（すなわち、どのモデル（正常又は故障したモデル）を用いるか、モデルの現在状態、状態推定の共分散、目的関数、制約条件、及び再構成情報）。モデルの再構成は、入力、出力、又は内部パラメータを修正する形態を取ることができ、或いは異なるモデル間で切り換えることを意味する場合もある。制約条件の再構成は、アクチュエータの位置又は速度制限の変更、状態の制約条件の変更、或いは出力の制約条件の変更の形態を取ることができる。目的関数の再構成は、従うべき基準の変更、該目的関数項目の加重値の変更、又は目標の変更の形態を取ることができる。再構成された制御要素の一部又は全てを用いると、実行される最良の制御動作を求めるように最適化を実行することができる。

【００３７】

マスター・モード・セレクタは、再構成可能なモデル予測制御によって使用されることになる目的関数、制約条件及びモデルを決定することができる。この論理関数は、診断関数及びオペレータ又は監視コントローラの両方から情報を受け取ることができる。次いで、この情報を処理して、目的関数、制約条件、及びモデルの正しい形態を求めることができる。この機能性は、意図を明確にするためにここでは分離しているが、再構成可能な制御又は診断の一部として位置付けることもできる。

【００３８】

本発明の制御システムは、多くの利点を提供する。この制御システムは、失速余裕、推力などのような対象変数を間接的に制御せずに、直接制御するものである。この制御システムは、複雑な追加論理を必要とすることなく制約条件を明確に処理する。また、この制御システムは、検出された問題のＭＩＭＯの内容を明確に処理する。更に、劣化、不良、故障、及び／又は損傷を自動的に検出し、識別することができ、このような劣化、不良、故障、及び／又は損傷を明らかにするように、モデル・ベースの制御システムを自動的に再構成（すなわち、更新）することができる。再構成された制御システムにより、エンジンの現在の状態が与えられた場合に、該エンジンが最良の性能及び／又は作動性を提供することが可能となる。

【００３９】

本発明においては、発見的な、知識ベース、モデル・ベースの検出アルゴリズム、及び／又は多モデル仮説検証のような、予測技術及び診断技術も用いられる。また、不良適応は、センサ、アクチュエータ、及びガス経路の不良検出及び分離によって、或いは最適手法で故障を適応させるためにモデル・ベースの制御を再構成することなどによって用いられる。

【００４０】

例えば、増大したガスタービンの可変排気領域が損傷した場合には、特定の事象が発生する可能性がある。図９は、再構成可能な制御がどのように働くかを示す実施例である。この図は、最初の５秒間は正常に出力が増加している推力９０、ファン失速余裕９１（ＳＭ２）、燃料流量９２、及び排気ノズル領域９２（Ａ８）を示す。５．０秒においてＡ８が損傷９４を受け、排気ノズルを予定されたよりも大きな値まで開き、この位置で固定したままにする。診断により、損傷の存在が検出され、排気ノズルに対して損傷が分離され、該損傷の範囲が求められ、Ａ８の位置又は有効な位置が求められる。診断は、アクチュエータが開位置において固定され、損傷のために動くことができないことを制御に伝えることができる。次に、この情報はマスター・モード・セレクタに行き、マスター・モード・セレクタは、どの目的関数を最適化すべきかを選択する。次いで、マスター・モード・

セレクタは、Ａ８アクチュエータ位置に関する新しい制約条件（すなわち、基本的にＡ８アクチュエータがもはや機能していないこと）について、更新された情報を制御に送ることができる。また、マスター・モード・セレクタは、失った推力を回復するために、目的関数に更新を送ることができる。次に、制御は、該制御を再最適化するように再構成９５することができ、従って、どのような作動制約条件にも違反することなく推力を元の所望レベルまで増大させる９６ようにすることができる。この実施例において、これは、燃料流量を増大させ、可変ステータ羽根を修正することによって実行される速度の増加により達成することができる。実施形態において、制御は、診断又はマスター・モード・セレクタから情報を得るときに変更することができ、該制御はエンジンの性能を再最適化して、該制御が絶対的に最良のものを実行し、モデル・ベースの制御が推力のような測定されていないパラメータに作用することができることを保証する。

【００４１】

増大されたガスタービンに関する本発明のモデル・ベースの制御システムを用いた別の検討が行われた。この検討では、圧縮機への損傷によって失速余裕の減少が生じた。制御システムが損傷を検出し、該損傷のレベルを推定した後、この情報は、マスター・モード・セレクタ及び再構成可能なモデル・ベースの制御装置に送られた。この実施形態においては、損傷の情報を用いてこのモデルを更新することができるか、或いは圧縮機の損傷を有するモデルを、制御内のモデルがガスタービンと同じ特性を有するように選択することができるかのいずれかである。次に、タービンの作動性を回復するか又は最大にするように目的関数を修正することができる。この研究において、これにより、制御は、失速余裕を回復するために、可変ステータ羽根のアクチュエータ位置を修正し、抽気弁を開けた。その後、制御システムは、他の如何なる作動制約条件にも違反することなく、圧縮機の損傷のために失った失速余裕を回復することができた。図１０は、本発明のこの実施形態におけるモデル・ベースの制御によって、この失った失速余裕をどのように取り戻したか１００を示している。

【００４２】

上述のように、本発明のモデル・ベースの適応制御システム及び方法により、劣化、不良、故障、及び／又は損傷を迅速に検出及び識別することが可能となり、その結果、可能な限り多くの性能及び／又は作動性を回復するように最適な正しい制御動作を取ることができる。有利には、これらのシステム及び方法は、既にシステム内にプログラムされている先験的な解法を有する劣化、不良、故障、又は損傷だけでなく、あらゆるレベルの劣化、不良、故障、又は損傷にも対応することができるように適応される。

【００４３】

本発明の一実施形態は、ガスタービン・エンジンの性能及び／又は作動性を制御し最適化するためのモデル・ベースの適応制御システム方法を含む。この方法は、（ａ）エンジンの現在の状態についての情報を獲得し、（ｂ）モデル・ベースの適応制御システムにおけるモデルのエンジンについてのモデル・データ情報を更新して、該エンジンの現在の状態を反映させ、（ｃ）エンジンの現在の状態についての情報を、モデルのエンジンについてのモデル・データ情報と比較し、（ｄ）センサ、アクチュエータ、エンジン、及びサブシステムの情報を診断し、あらゆる更新された情報をマスター・モード・セレクタ及び再構成可能な制御に送り、（ｅ）モデル、制約条件、目的関数、及び他の関連する制御パラメータの正しい形態を再構成し、（ｆ）エンジンの現在の状態、目的関数、及びエンジンの制約条件が与えられた場合に取るべき最適な修正制御動作を判断し、（ｇ）最適な修正制御動作を実行するために制御コマンドを出力し、（ｈ）エンジンの目的関数が常時最適化されていることを保証するように、必要に応じて、段階（ａ）から（ｇ）までを繰り返す、ことによって、エンジンの性能又は作動性のいずれかを最適化するように、ガスタービン・エンジンを制御するためのモデル・ベースの適応制御方法を含む。

【００４４】

本発明の別の実施形態は、ガスタービン・エンジンの性能及び／又は作動性を制御し最適化するためのモデル・ベースの適応制御システムを含む。このシステムは、（ａ）エン

ジンの現在の状態についての情報を獲得する手段と、（ｂ）モデル・ベースの適応制御システムにおけるモデルのエンジンについてのモデル・データ情報を更新して、該エンジンの現在の状態を反映させる手段と、（ｃ）エンジンの現在の状態についての情報を、モデルのエンジンについてのモデル・データ情報と比較する手段と、（ｄ）センサ、アクチュエータ、エンジン、及びサブシステムの情報を診断し、あらゆる更新された情報をマスター・モード・セレクタ及び再構成可能な制御に送る手段と、（ｅ）モデル、制約条件、目的関数、及び他の関連する制御パラメータの正しい形態を再構成する手段と、（ｆ）エンジンの現在の状態、目的関数、及びエンジンの制約条件が与えられた場合に、取るべき最適な修正制御動作を判断する手段と、（ｇ）最適な修正制御動作を実行するために制御コマンドを出力する手段と、（ｈ）エンジンの目的関数を常に最適化することを保証するように、必要に応じて、段階（ａ）から（ｇ）までを繰り返す手段とを備える、エンジンの性能又は作動性のいずれかを最適化するように、ガスタービン・エンジンを制御するためのモデル・ベースの適応制御システムを含む。

【００４５】

エンジンの現在の状態についての情報は、エンジン自体、エンジン部品、エンジン・システム、エンジン・システム部品・エンジン制御システム、エンジン制御システム部品、エンジンのガス経路、ガス経路の動力学、アクチュエータ、エフェクタ、エンジンの動作を修正する制御デバイス、センサ、モニタ、感知システム、燃料計量システム、燃料供給システム、潤滑システム、油圧システム、エンジンごとのばらつき、劣化、機械的不良、電気的不良、化学的不良、機械的故障、電気的故障、化学的故障、機械的損傷、電気的損傷、化学的損傷、システム不良、システムの故障、及び／又はシステムの損傷についての情報を含むことができる。これらのシステム及び方法におけるモデルは、物理学ベースのモデル、線形のシステム識別モデル、非線形のシステム識別モデル、ニューラル・ネットワーク・モデル、単一の簡易化パラメータ・モデル、多変数の簡易化パラメータ・モデル、１入力１出力モデル、多入力多出力モデル、及び／又はこれらのモデルの任意の組合せを含むことができる。更新は、状態、変数、パラメータ、品質パラメータ、スカラー、加算器、制約条件、目的関数、限界、及び／又は、定常状態及び／又は過渡作動中のモデル又は制御の任意の適応可能なパラメータを、更新すること、適応させること、又は再構成することを含むことができる。診断は、発見法、知識ベース、モデル・ベース手法、及び／又は多モデル仮説を用いて行われる。モデルは、線形の推定器、非線形の推定器、線形の状態推定器、非線形の状態推定器、線形のパラメータ推定器、非線形のパラメータ推定器、線形のフィルタ、非線形のフィルタ、線形のトラッキング・フィルタ、非線形のトラッキング・フィルタ、線形の論理、非線形の論理、線形の発見的論理、非線形の発見的論理、線形の知識ベース、及び非線形の知識ベース、又は他の適切な方法を用いることによって、更新／適応することができる。線形最適化、非線形最適化、線形プログラミング、二次計画法、スパース最適化、及び／又は最急降下法を含む、有制約最適化又は無制約最適化によって、制御コマンドを求めることができる。作動は、エンジンの性能及び／又は作動性のいずれかを最適化するように、コンピュータ又はコンピュータ・デバイスによって自動的に実行されることが好ましい。

【００４６】

本発明の別の実施形態は、ガスタービン・エンジンの性能及び／又は作動性を制御するためのモデル・ベースの適応制御システムを含む。このシステムは、少なくとも１つのモデルと、少なくとも１つの推定器と、少なくとも１つの診断又は不良検出アルゴリズムと、少なくとも１つの再構成可能な及び／又は更新可能なモデル・ベース制御と、少なくとも１つの最適化と、マスター・モード・セレクタ又は機能的等価物とを含む。図１１は、高レベルの本発明の実施形態のアーキテクチャの実施形態１１０を示す。図１２は、より詳細なアーキテクチャの一部を示す実施形態１２０を示す。図１３は、本発明の一実施形態の多層制御アーキテクチャ１３０を示す。

【００４７】

本発明の種々の実施形態を、本発明が対応する種々の必要性の実施において説明してき

た。これらの実施形態は、単に本発明の種々の実施形態の原理の例証であることを理解されたい。当業者には理解されるように、本発明の精神及び範囲から逸脱することなく、多くの変更及び適応を行うことができる。例えば、本発明は、ガスタービン・エンジンの制御システム及び方法について説明してきたが、他の多くの制御システム及び方法を、上述のようなモデル・ベースの適応制御の形態で実施することができる。なお、特許請求の範囲に記載された符号は、理解容易のためであってなんら発明の技術的範囲を実施例に限縮するものではない。

【図面の簡単な説明】

【００４８】

【図１】本発明の一実施形態により制御することができるエンジンのレイアウトを示す概略図。

【図２】本発明の一実施形態におけるモデル予測コントローラに続く基本的段階を示すフローチャート。

【図３】ガスタービン用の典型的な制御システムの構成を示す概略図。

【図４】パラメータ推定器によってエンジンに追従するモデルを示すグラフ表示。

【図５】本発明の一実施形態における状態推定器の構成を示す概略図。

【図６】状態推定器を用いることにより、マス・バネ・ダンパの実際の位置について、センサだけを用いるよりも大幅に正確な値をどのようにして求めることができるかを示すグラフ表示。

【図７】ＭＰＣの基盤となるレシーディング ホライズン制御の基本的概念を示す図。

【図８】詳細なエンジン及びフライト・シミュレータの推力又はマッハ数を最大にするためにＭＰＣを用いる実施例。

【図９】本発明の一実施形態において、どのように失った推力が回復されたかを示す概略図。

【図１０】本発明の一実施形態において、どのように失った失速余裕が回復されたかを示す図。

【図１１】本発明の一実施形態のトップレベルのアークテクチャを示す図。

【図１２】本発明の一実施形態のより詳細なアーキテクチャを示す図。

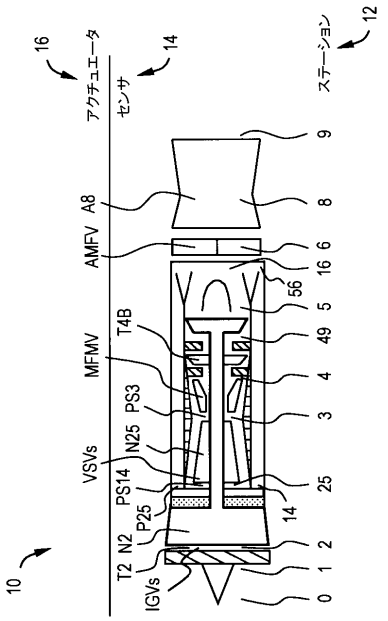
【図１３】本発明の一実施形態の多層制御のアーキテクチャを示す図。

【符号の説明】

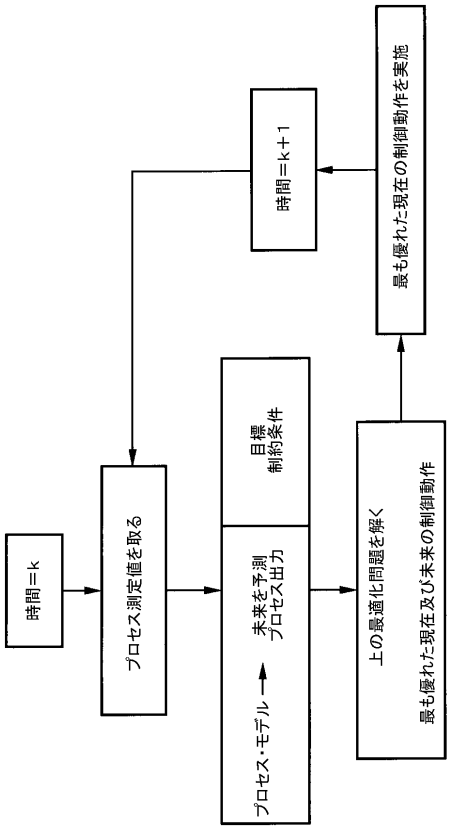
【００４９】

１４、６２　センサ
１６　アクチュエータ
３０　航空機
５０　推定器
５１　エンジン
５２　モデル
５４　制御

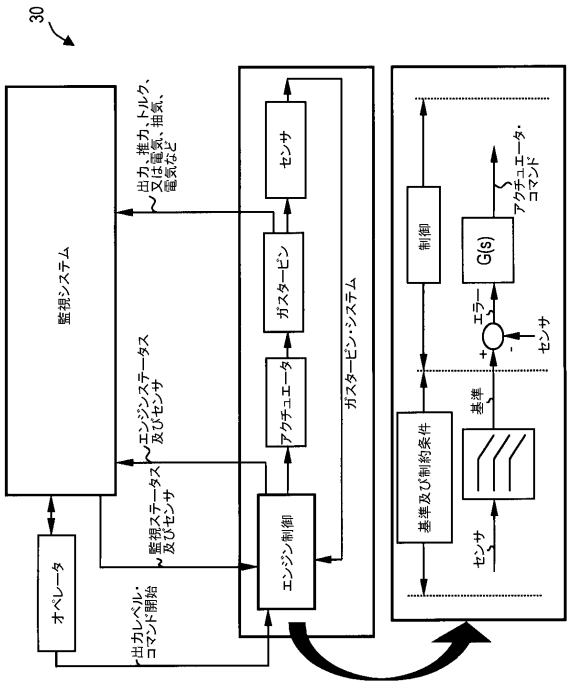
【図１】


10
16
アクチュエータ
14
センサ
12
ステーション
VSVs
MFMV
AMFV
A8
T4B
PS3
N25
PS14
P25
T2
N2
IGVs
0 1 2 14 25 3 4 49 5 16 6 56 8 9

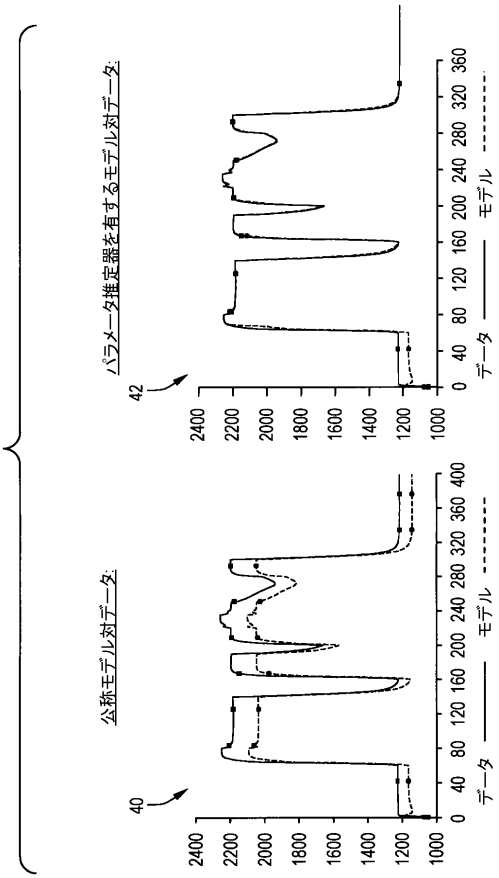
【図２】


時間＝k
プロセス測定値を取る
プロセス・モデル
未来を予測
プロセス出力
目標
制約条件
上の最適化問題を解く
最も優れた現在及び未来の制御動作
最も優れた現在の制御動作を実施
時間＝k＋1

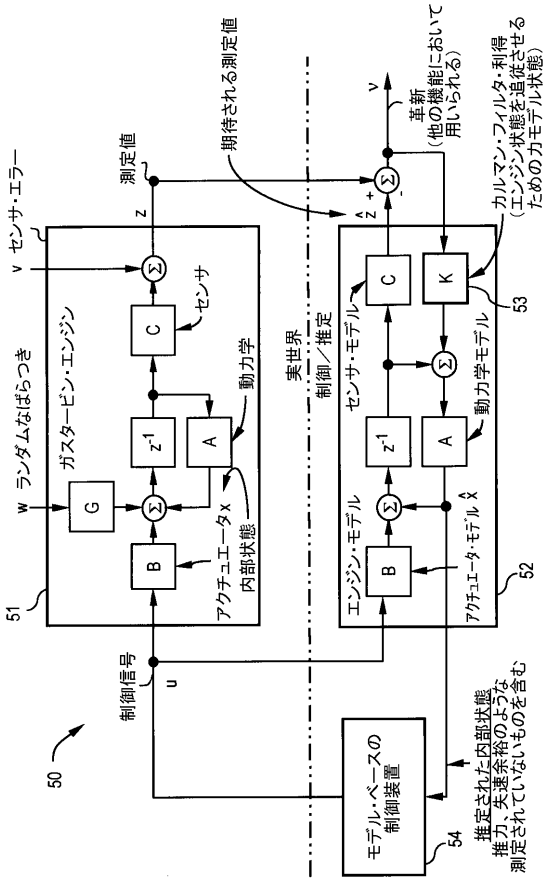
【図３】


30
監視システム
オペレータ
出力レベル・コマンド開始
出力、推力、トルク、又は電気、抽気、電気など
エンジンステータス及びセンサ
監視ステータス及びセンサ
エンジン制御
アクチュエータ
ガスタービン
センサ
ガスタービン・システム
基準及び制約条件
制御
センサ
基準
G(s)
エラー
アクチュエータ・コマンド
センサ

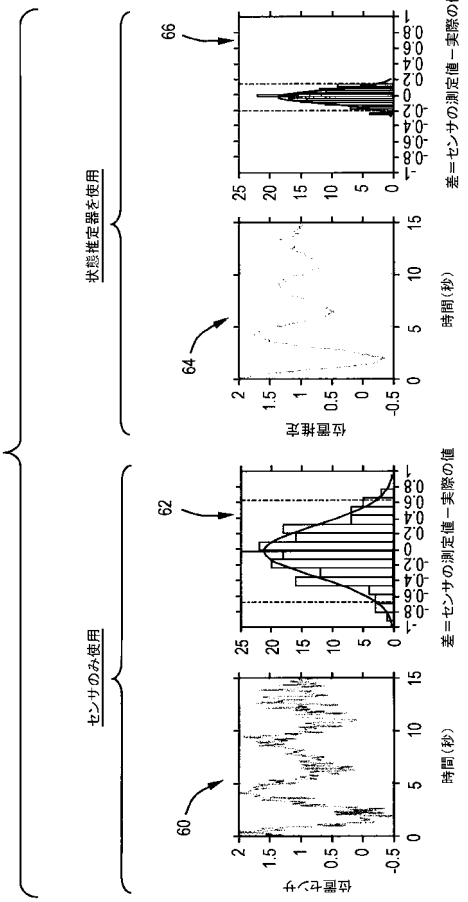
【図４】


パラメータ推定器を有するモデル対データ:
42
2400
2200
2000
1800
1600
1400
1200
1000
0 40 80 120 160 200 240 280 320 360
データ
モデル
公称モデル対データ:
40
2400
2200
2000
1800
1600
1400
1200
1000
0 40 80 120 160 200 240 280 320 360 400
データ
モデル

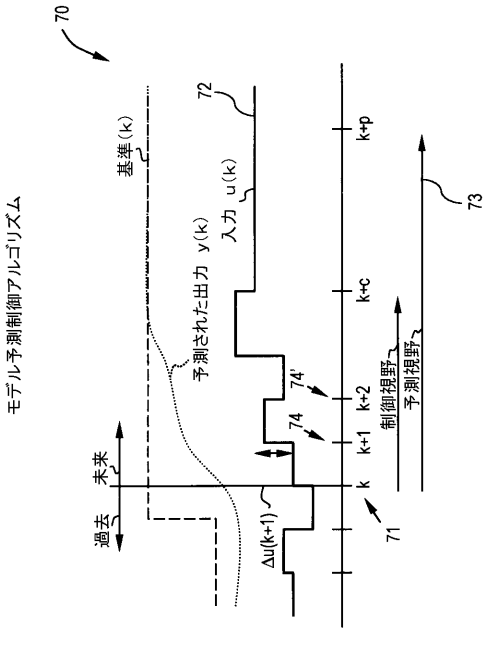
【図５】


ガスタービン・エンジン
センサ・エラー
ランダムなばらつき
センサ
動力学
アクチュエータx
内部状態
測定値
期待される測定値
実世界
制御／推定
センサ・モデル
エンジン・モデル
アクチュエータ・モデル
動力学モデル
革新
(他の機能において用いられる)
カルマン・フィルタ・利得
(エンジン状態を追従させるためのカモデル状態)
制御信号
モデル・ベースの制御装置
推定された内部状態
推力、失速余裕のような測定されていないものを含む

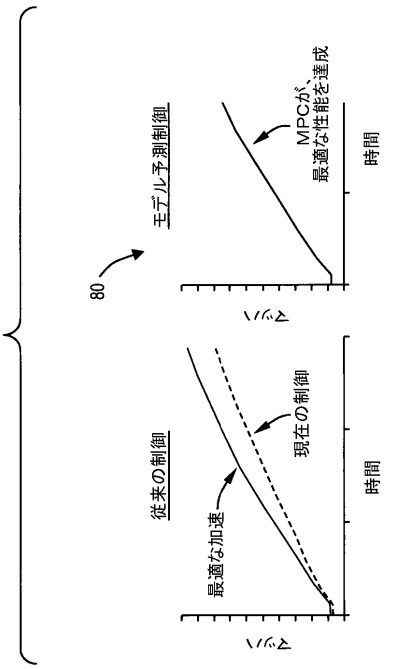
【図６】


状態推定器を使用
センサのみ使用
位置誤差
時間(秒)
差＝センサの測定値－実際の値

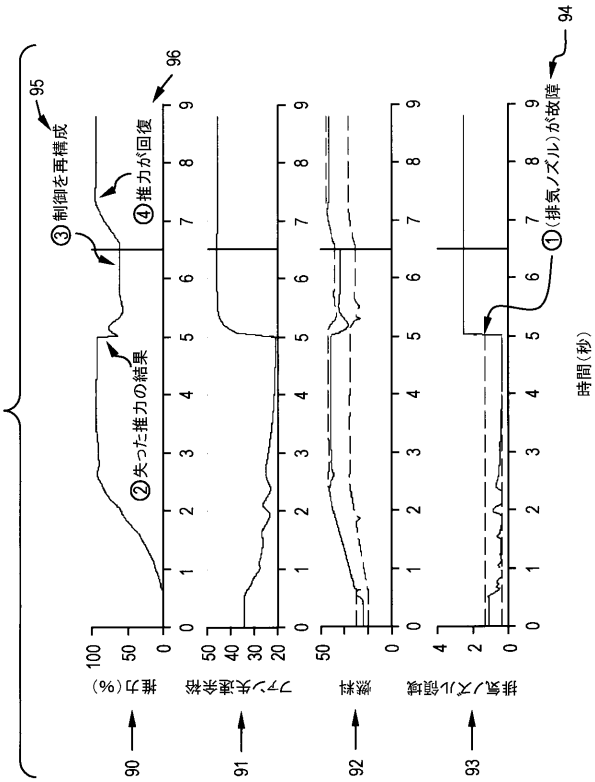
【図７】


モデル予測制御アルゴリズム
過去
未来
基準(k)
予測された出力 y(k)
入力 u(k)
Δu(k+1)
制御視野
予測視野

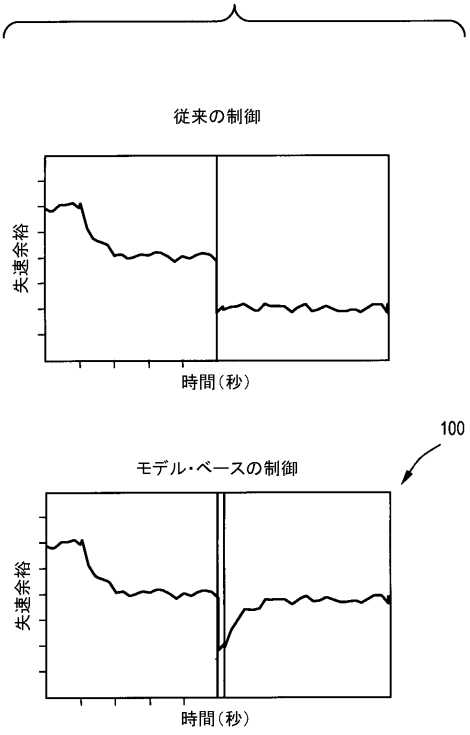
【図８】


モデル予測制御
MPCが、最適な性能を達成
時間
従来の制御
最適な加速
現在の制御
時間

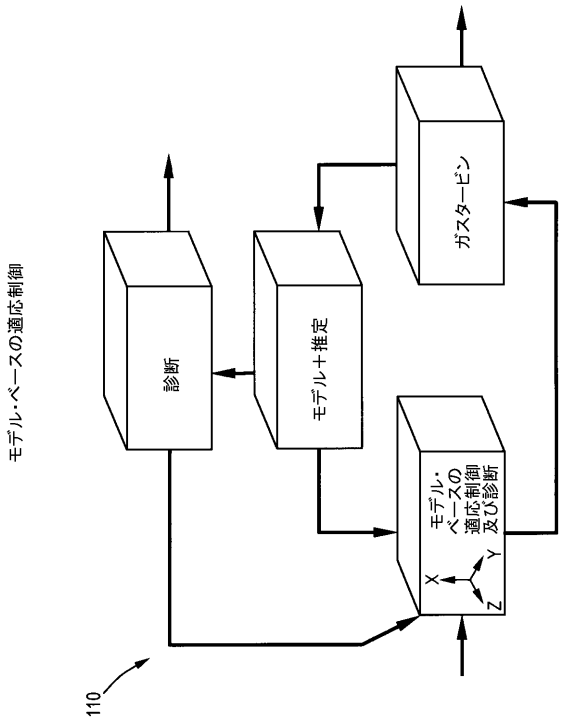
【図９】



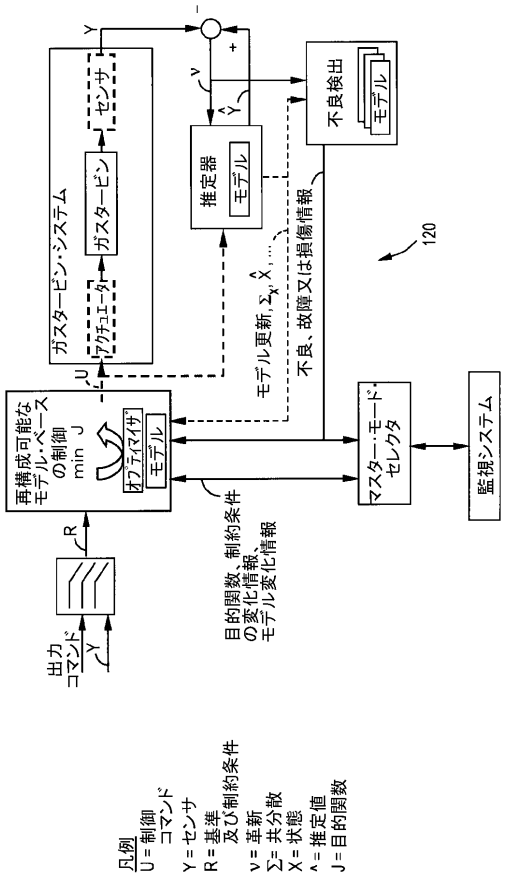
【図１０】



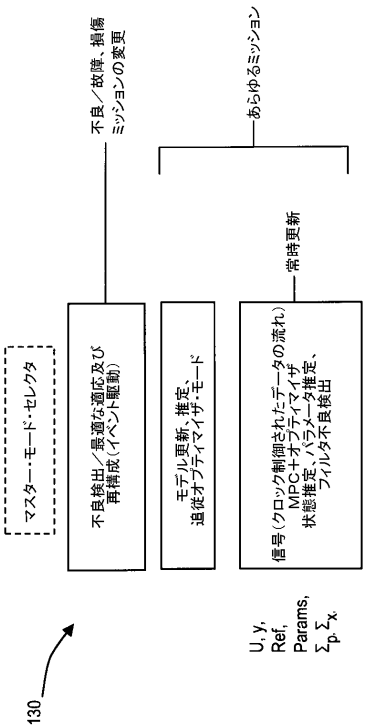
【図１１】



【図１２】



【図１３】


マスター・モード・セレクタ
不良検出／最適な適応及び
再構成（イベント駆動）
不良／故障、損傷
ミッションの変更
モデル更新、推定、
適応オプティマイザ・モード
あらゆるミッション
信号（クロック制御されたデータの流れ）
MPC＋オプティマイザ
状態推定、パラメータ推定、
フィルタ不良検出
常時更新
U, y,
Ref,
Params,
Σp, Σx,
130

フロントページの続き

(72)発明者　ブレント・ジェローム・ブルネル
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、クリフトン・パーク、エソパス・ドライブ、２２番
(72)発明者　ハリー・カーク・マシュース，ジュニア
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、クリフトン・パーク、ノッティンガム・ウェイ・ノース、３６番
(72)発明者　アディッヤ・クマー
アメリカ合衆国、ニューヨーク州、ニスカユナ、エーピーティー・４ビー４８、ヒルサイド・アベニュー、１１８７番

審査官　藤原　弘

(56)参考文献　特開２００２－０２１５８４（ＪＰ，Ａ）
米国特許第０５６３３８００（ＵＳ，Ａ）
特開２００２－１８０８５１（ＪＰ，Ａ）
国際公開第００／０７１８７６（WO，Ａ１）
特開２００１－０９０５５４（ＪＰ，Ａ）

(58)調査した分野(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｆ０２Ｃ　　９／００
Ｆ０２Ｃ　　９／２８
Ｇ０５Ｂ　１３／０４