

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7036697号

(P7036697)

(45)発行日 令和4年3月15日(2022.3.15)

(24)登録日 令和4年3月7日(2022.3.7)

(51)国際特許分類

G 0 5 B 23/02 (2006.01)

F I

G 0 5 B 23/02 3 0 2 V

G 0 5 B 23/02 V

請求項の数 11 (全28頁)

(21)出願番号	特願2018-181281(P2018-181281)	(73)特許権者	000005108
(22)出願日	平成30年9月27日(2018.9.27)		株式会社日立製作所
(65)公開番号	特開2020-52714(P2020-52714A)		東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
(43)公開日	令和2年4月2日(2020.4.2)	(74)代理人	110001678
審査請求日	令和3年2月26日(2021.2.26)		特許業務法人藤央特許事務所
		(72)発明者	王 偉
			東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
			株式会社日立製作所内
		(72)発明者	矢野 浩仁
			東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
			株式会社日立製作所内
		(72)発明者	鈴木 哲司
			東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
			株式会社日立製作所内
		(72)発明者	岡田 健一郎

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 監視システム及び監視方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

監視対象システムを監視する監視システムであって、

プログラムを格納する1以上の記憶装置と、前記プログラムに従って動作する1以上のプロセッサと、を含み、前記1以上のプロセッサは、

前記監視対象システムの検査データに含まれる測定データと前記監視対象システムの第1

因果構造モデルとに基づき、前記監視対象システムの監視対象目的変数の推定値を決定し、

前記検査データに含まれる前記監視対象目的変数の測定値と前記推定値との比較結果に基

づき、前記監視対象システムにおいて異常が発生しているか判定し、

前記1以上の記憶装置は、異なる複数の運用状態の因果構造モデルを格納し、前記1以上のプロセッサは、前記検査データが示す前記監視対象システムの運用状態と、前記複数の運用状態との間の類似度に基づいて、前記複数の運用状態の因果構造モデルから、前記第1因果構造モデルを選択し、前記第1因果構造モデルは、前記測定データに対応する下層ノードと、前記下層ノードより上層における前記監視対象目的変数に対応する監視対象目的変数ノードと、前記下層ノードと前記監視対象目的変数ノードとの間の中間ノードと、を含み、前記1以上のプロセッサは、前記下層ノードに前記測定データを入力して得られる前記監視対象目的変数ノードの値

を、前記推定値と決定し、

前記第 1 因果構造モデルにおいて、前記監視対象目的変数のノードからエッジに沿って異常原因ノード候補の探索を行い、

前記探索において、異常原因ノード候補と判定されたノードを目的変数ノードとする説明変数ノードそれぞれが、異常原因ノード候補であるか判定する、監視システム。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の監視システムであって、

前記 1 以上のプロセッサは、前記監視対象システムの測定データを含む学習データに基づき前記因果構造モデルを推定する、監視システム。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の監視システムであって、

前記 1 以上のプロセッサは、前記推定値を決定するための前記検査データに含まれる前記中間ノードの測定値と、前記中間ノードの過去の測定値から得られる値との間の乖離に基づき、前記中間ノードが異常原因ノード候補であるか判定する、監視システム。

【請求項 4】

請求項 1 に記載の監視システムであって、

前記 1 以上のプロセッサは、前記推定値を決定するための前記検査データに含まれる前記中間ノードの測定値と、前記測定データを前記下層ノードに入力して得られる前記中間ノードの推定値との間の乖離に基づき、前記中間ノードが異常原因ノード候補であるか判定する、監視システム。

【請求項 5】

請求項 3 又は 4 に記載の監視システムであって、

前記 1 以上のプロセッサは、前記推定値を決定するための前記検査データに含まれる前記下層ノードの測定値と、前記下層ノードの過去の測定値から得られる値との間の乖離に基づき、前記下層ノードが異常原因ノード候補であるか判定する、監視システム。

【請求項 6】

請求項 3 又は 4 に記載の監視システムであって、

前記 1 以上のプロセッサは、前記乖離が最も大きいノードを異常原因ノード候補と判定する、監視システム。

【請求項 7】

請求項 2 に記載の監視システムであって、

前記 1 以上のプロセッサは、

前記監視対象システムと異なる第 2 システムの第 2 因果構造モデルの学習期間を、前記第 2 因果構造モデルの成長度に基づき決定し、

前記学習期間に基づき、前記監視対象システムの前記第 1 因果構造モデルを推定するために使用する学習データを選択する、監視システム。

【請求項 8】

請求項 1 に記載の監視システムであって、

前記 1 以上のプロセッサは、

前記監視対象目的変数の測定値と前記推定値との間の乖離と閾値との比較結果に基づき、前記監視対象システムにおいて異常が発生しているか判定し、

前記乖離が前記閾値より大きく、前記監視システムの保守が実行されない場合、前記閾値を前記乖離に基づき変更する、監視システム。

【請求項 9】

請求項 1 に記載の監視システムであって、

前記 1 以上のプロセッサは、第 2 因果構造モデルによって、未来における特定時刻における前記監視対象目的変数の予測値を決定し、

前記第 2 因果構造モデルは、時間の関数で表わされる時間関数ノードと、前記時間関数ノードより上層における前記監視対象目的変数に対応する第 2 監視対象目的変数ノードと、前記時間関数ノードと前記第 2 監視対象目的変数ノードとの間の第 2 中間ノードと、を

10

20

30

40

50

含み、

前記 1 以上のプロセッサは、前記時間関数ノードに前記特定時刻を入力して得られる前記第 2 監視対象目的変数ノードの値を前記予測値と決定する、監視システム。

【請求項 10】

請求項 1 に記載の監視システムであって、

監視画像を表示する表示デバイスをさらに含み、

前記表示デバイスにおいて、前記監視対象目的変数の測定値の履歴及び推定値の履歴、

並びに、前記第 1 因果構造モデルにおける異常原因ノード候補を表示する、監視システム。

【請求項 11】

監視システムが監視対象システムを監視する方法であって、

前記監視システムは、異なる複数の運用状態の因果構造モデルを格納し、

前記方法は、

前記監視システムが、前記監視対象システムの検査データに含まれる測定データと前記監視対象システムの第 1 因果構造モデルとに基づき、前記監視対象システムの監視対象目的変数の推定値を決定し、

前記監視システムが、前記検査データに含まれる前記監視対象目的変数の測定値と前記推定値との比較結果に基づき、前記監視対象システムにおいて異常が発生しているか判定し、

前記検査データが示す前記監視対象システムの運用状態と、前記複数の運用状態との間の類似度に基づいて、前記複数の運用状態の因果構造モデルから、前記第 1 因果構造モデルを選択し、

前記第 1 因果構造モデルは、前記測定データに対応する下層ノードと、前記下層ノードより上層における前記監視対象目的変数に対応する監視対象目的変数ノードと、前記下層ノードと前記監視対象目的変数ノードとの間の中間ノードと、を含み、

前記監視システムが、前記下層ノードに前記測定データを入力して得られる前記監視対象目的変数ノードの値を、前記推定値と決定し、

前記監視システムが、前記第 1 因果構造モデルにおいて、前記監視対象目的変数のノードからエッジに沿って異常原因ノード候補の探索を行い、

前記監視システムが、前記探索において、異常原因ノード候補と判定されたノードを目的変数ノードとする説明変数ノードそれぞれが、異常原因ノード候補であるか判定する、ことを含む方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、監視システム及び監視方法に関する。

【背景技術】

【0002】

鉄道、上下水道、都市交通といった社会インフラの業務管理システムは、複数のサブシステムで構成される。例えば、鉄道の業務管理システムは 100 以上のサブシステムで構成されている。こうした社会インフラには、継続的な業務改善が求められる。例えば、鉄道の保守に着目すると、設備の老朽化に伴って保守費用が増加傾向にある一方で、人口減少による輸送収入の減少が予想されている。そのため、輸送の安全性を損なうことなく保守費用を低減する、業務改善の施策立案が求められている。

【0003】

保守費用を削減するために、予測保守が最善の解決策の 1 つである。予測保守の最も重要な機能は、エラーのどのような原因がどこで起き、問題の発生を防ぐために可能な解決策は何か、を推定することである。

【0004】

システムの因果関係を推定する 1 つの方法が、例えば、特許文献 1 に開示されている。あるいは、エラーと実行中のログの因果関係を推定するためのもう 1 つの解決策は、特許文

10

20

30

40

50

献 2 に開示されている。また、深層学習により潜在的な問題を予測する手法が、特許文献 3 に開示されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【文献】国際公開 2010/082322 号

特開 2016-045556 号公報

特開平 9-269217 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

システムの異常に対して適切かつ迅速に対応するためには、その原因を迅速かつ高い確度で推定することが重要である。しかし、従来の統計及び機械学習技術は、原因を迅速かつ的確に突き止めるのが困難である。

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の一態様は、監視対象システムを監視する監視システムであって、前記監視対象システムの検査データに含まれる測定データと前記監視対象システムの因果構造モデルとに基づき、前記監視対象システムの監視対象目的変数の推定値を決定する、目的変数値推定部と、前記検査データに含まれる前記監視対象目的変数の測定値と前記推定値との比較結果に基づき、前記監視対象システムにおいて異常が発生しているか判定する、判定部と、を含む。

【発明の効果】

【0008】

本発明の一態様は、システムの異常の原因を迅速かつ高い確度で推定することができる。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図 1】本開示の遠隔監視システムによる処理の概要を模式的に示す。

【図 2】遠隔監視システムの構成例を示す。

【図 3】計算機のハードウェア構成例を模式的に示す。

【図 4】因果構造モデル推定装置のソフトウェア構成例を示す。

【図 5】モデル管理装置のソフトウェア構成例を示す。

【図 6】検査データ乖離判定装置のソフトウェア構成例を示す。

【図 7】検査データデータベースの構成例を示す。

【図 8】目的変数値推定プログラムによる処理のフローチャートである。

【図 9】乖離判定プログラムによる処理のフローチャートである。

【図 10】監視対象の監視画像の例を示す。

【図 11】監視画像においてモデルチェックボタンがユーザにより選択された場合の画像例を示す。

【図 12】監視画像においてボタンがユーザにより選択された場合の画像例を示す。

【図 13】異常の原因のノードを推定する方法例を模式的に示す。

【図 14】異常原因ノード推定方法のフローチャートである。

【図 15】異常の原因のノードを推定する方法例を模式的に示す。

【図 16】異常原因ノード推定方法のフローチャートである。

【図 17】因果構造モデル推定プログラムによる因果構造モデルの推定のフローチャートである。

【図 18】学習の進行に伴い、推定される因果構造モデルのノード数が増加する様子を示す。

【図 19】因果構造モデル推定プログラムが学習期間を決定する処理のフローチャートを示す。

10

20

30

40

50

【図 2 0】閾値設定方法の概要を説明するための、推定精度の時間変化と閾値との関係を示すグラフである。

【図 2 1】乖離判定プログラムによる初期閾値設定のフローチャートを示す。

【図 2 2】乖離判定プログラムによる閾値更新のフローチャートを示す。

【図 2 3】監視対象システムの運用状態毎の因果構造モデルの推定を説明する図である。

【図 2 4】学習データデータベースの構成例を示す。

【図 2 5】運用状態の学習データを示す。

【図 2 6】運用状態変化と推定精度の関係を模式的に示す。

【図 2 7】監視対象の目的変数の時間変化を予測可能な因果構造モデルを推定するための学習データを格納する学習データデータベースの構成例を示す。

【図 2 8】監視対象の目的変数の時間変化を予測可能な因果構造モデルの例を示す。

【図 2 9】因果構造モデルによる目的変数の予測値の表示例を示す。

【図 3 0】監視画像例を示す。

【図 3 1】警告メッセージの例を示す。

【図 3 2】保守記録の入力画像を示す。

【発明を実施するための形態】

【0010】

以下、添付図面を参照して本発明の実施例について説明する。添付図面では、機能的に同じ要素は同じ番号で表示されている。なお、添付図面は本発明の原理に則った具体的な実施例を示しているが、これらは本発明の理解のためのものであり、決して本発明を限定的に解釈するために用いられるものではない。

【0011】

[実施形態の概要]

図 1 は本開示の遠隔監視システムによる処理の概要を模式的に示す。遠隔監視システムは、学習データ 150 から因果構造モデル 215 を推定する (S11)。因果構造モデル 215 は、監視対象システムについてのデータ間の因果関係を示す有指向グラフ構造を有するモデルである。因果構造モデル 215 は、因果図 (Causal Loop Diagram: CLD) で表わすことができる。因果構造モデル 215 を CLD モデルとも呼ぶ。

【0012】

因果構造モデル 215 において、エッジの指向元ノードが原因ノード (説明変数ノード) であり、エッジの指向先ノードが結果ノード (目的変数ノード) である。結果ノードは目的変数を表し、原因ノードは説明変数を表す。結果ノードの変数は、原因ノードの変数の回帰式で表わされる。回帰式の各項は、線形 (1 次) 又は非線形 (1 次より大きい) である。説明変数が X_1 、 X_2 、 X_3 である場合、目的変数 Y は、例えば、 $aX_1 * X_2 + bX_1 * X_3 + cX_2 * X_3$ 、または、 $aX_1 + bX_2 + cX_3^2$ 等の式で表わされる。 a 、 b 、 c は係数である。

【0013】

因果構造モデル 215 は階層構造を有している。上層の結果ノード (目的変数) の原因ノード (説明変数) は、さらに下層の原因ノード (説明変数) の結果ノード (目的変数) である。因果構造モデル 215 において、有指向エッジに従ってノードを辿ったトップノード 216 は、監視対象目的変数を示す。

【0014】

遠隔監視システムは、監視対象システムの検査データ 170 を、推定 (生成した) 因果構造モデル 215 に入力し、監視対象目的変数の推定値を取得する (S12)。検査データ 170 は例えばリアルタイムデータであり、監視対象システムの現在の状態及び状況を示すデータを含む。遠隔監視システムは、因果構造モデル 215 による監視対象目的変数の推定値と、検査データ 170 に含まれる監視対象目的変数の実測値とを比較し、それらの乖離度を決定する。遠隔監視システムは、計算された乖離度に基づいて監視対象システムにおいて異常が発生しているか判定する (S13)。

【0015】

10

20

30

40

50

監視対象システムにおいて異常が発生していると判定された場合、検査データ 170 が入力された因果構造モデル 215 において、異常の原因とされるノードを探索する。因果構造モデル 215 は、原因と結果の関係を示す有指向グラフ構造を有しており、遠隔監視システムは、異常の潜在的な原因を効率的に高い確度で推定することができる。なお、因果構造モデル 215 が予め用意されている場合、因果構造モデルの推定を省略してよい。因果構造モデルを学習データにより推定することで、適切な因果構造モデルを予め用意しておくことが不要となる。

【0016】

[システム構成]

図 2 は、遠隔監視システムの構成例を模式的に示す。遠隔監視システムは、因果構造モデル推定装置 210、モデル管理装置 220、検査データ乖離判定装置 230、及びクライアント装置 240 を含み、これらはネットワークを介して互いに通信する。ネットワークは、例えば、ローカルエリアネットワーク (LAN) 又はワイドエリアネットワーク (WAN) である。

10

【0017】

因果構造モデル推定装置 210、モデル管理装置 220、検査データ乖離判定装置 230、及びクライアント装置 240 は、それぞれ、例えば、1 以上の計算機で構成ことができる。また、これらの内に複数の装置が一つの計算機により実現されてもよい。

【0018】

図 3 は、計算機のハードウェア構成例を模式的に示す。計算機は、プロセッサ 311、メモリ 312、補助記憶装置 313、ネットワークインタフェース 314、入出力インタフェース 315、入力デバイス 316、及び出力デバイス 317 を含む。これら構成要素は、バスによって互いに接続されている。メモリ 312、補助記憶装置 313 又はこれらの組み合わせは記憶装置であり、ソフトウェアを格納する記憶媒体を含む。

20

【0019】

メモリ 312 は、例えば半導体メモリから構成され、主にプログラムやデータを一時的に保持するために利用される。プロセッサ 311 は、メモリ 312 に格納されているプログラムに従って、様々な処理を実行する。プロセッサ 311 がプログラムに従って動作することで、様々な機能が実現される。補助記憶装置 313 は、例えばハードディスクドライブやソリッドステートドライブなどの大容量の記憶装置から構成され、プログラムやデータを長期間保持するために利用される。

30

【0020】

補助記憶装置 313 に格納されたプログラム及びデータが起動時又は必要時にメモリ 312 にロードされ、プログラムをプロセッサ 311 が実行することにより、遠隔監視システムの各種処理が実行される。したがって、以下においてプログラムにより実行される処理は、プロセッサ 311 又は当該プロセッサを含む装置による処理である。

【0021】

ネットワーク (NW) インタフェース 314 は、ネットワークとの接続のためのインタフェースであり、計算機は、ネットワークインタフェース 314 及びネットワークを介して他の装置と通信する。入力デバイス 316 及び出力デバイス 317 は、ユーザに情報を提示し、また、ユーザが必要な情報を入力するために使用される。入力デバイス 316 の例は、キーボード、マウス、及びタッチセンサであり、出力デバイスの例は、ディスプレイ、プリンタ及びスピーカである。入力デバイス 316 及び出力デバイス 317 は、入出力インタフェース 315 を介して、計算機の他の構成要素と通信する。

40

【0022】

例えば、補助記憶装置 313 は省略されていてもよい。入出力インタフェース 315、入力デバイス 316、及び出力デバイス 317 は、一部の装置において省略されていてもよい。全ての装置の機能が一つの計算機に実装される場合、ネットワークインタフェース 314 は省略されてもよい。各装置の少なくとも一部の機能は、プロセッサと異なるロジック回路により実現されてもよい。

50

【 0 0 2 3 】

図 4 は、因果構造モデル推定装置 2 1 0 のソフトウェア構成例を示す。因果構造モデル推定装置 2 1 0 は、因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 をメモリ 3 1 2 に格納し、学習データデータベース (D B) 2 1 2 を補助記憶装置 3 1 3 に格納している。学習データデータベース 2 1 2 は、因果構造モデルを推定 (生成) するための、学習データを格納している。

【 0 0 2 4 】

図 5 は、モデル管理装置 2 2 0 のソフトウェア構成例を示す。モデル管理装置 2 2 0 は、モデル管理プログラム 2 2 1 をメモリ 3 1 2 に格納し、モデルデータベース 2 2 2 を補助記憶装置 3 1 3 に格納している。モデルデータベース 2 2 2 は、因果構造モデル推定装置 2 1 0 により推定された因果構造モデルを格納している。後述するように、モデルデータベース 2 2 2 は、監視対象システムの異なる複数の運用状態の因果構造モデルを格納している。

【 0 0 2 5 】

図 6 は、検査データ乖離判定装置 2 3 0 のソフトウェア構成例を示す。検査データ乖離判定装置 2 3 0 は、目的変数値推定プログラム 2 3 1 及び乖離判定プログラム 2 3 2 をメモリ 3 1 2 に格納し、検査データデータベース 2 3 3 を補助記憶装置 3 1 3 に格納している。検査データデータベース 2 3 3 は、監視対象システムの異常判定のための検査データを格納している。

【 0 0 2 6 】

上述のように、プロセッサ 3 1 1 は、プログラムに従って機能部として動作する。例えば、プロセッサ 3 1 1 は、因果構造モデル推定装置 2 1 0 において因果構造モデル推定部として機能し、モデル管理装置 2 2 0 においてモデル管理部として機能する。また、プロセッサ 3 1 1 は、検査データ乖離判定装置 2 3 0 において、目的変数値推定部及び乖離判定部として機能する。

【 0 0 2 7 】

なお、図 4、5 及び 6 において、便宜上、プログラムがメモリ 3 1 2 に格納され、データベースが補助記憶装置 3 1 3 に格納されているが、一般に、計算機 of データ (プログラムを含む) は補助記憶装置 3 1 3 に格納され、プロセッサ 3 1 1 により処理されるデータが、補助記憶装置 3 1 3 からメモリ 3 1 2 にロードされる。また、メモリ 3 1 2 上で更新されたデータは、補助記憶装置 3 1 3 に格納される。なお、クライアント装置 2 4 0 においては、ユーザインタフェースプログラムが実行される。

【 0 0 2 8 】

[因果構造モデルを使用した正常 / 異常判定]

次に、検査データ乖離判定装置 2 3 0 の目的変数値推定プログラム 2 3 1 により実行される処理を説明する。目的変数値推定プログラム 2 3 1 は、因果構造モデルによって、検査データから、監視対象目的変数値を推定する。

【 0 0 2 9 】

図 7 は、検査データデータベース 2 3 3 の構成例を示す。図 7 は、検査データデータベース 2 3 3 における、一つの検査データレコード 1 7 1 を示す。遠隔監視システムは、監視対象システムをモニタリングしており、定期的に、検査データレコード 1 7 1 を検査データデータベース 2 3 3 に追加する。検査データレコード 1 7 1 は、監視対象システムの状態の情報、及び、センサにより測定されたデータから得られる値 (測定値) を含む。

【 0 0 3 0 】

検査データデータベース 2 3 3 は、時刻欄 1 7 2、監視対象システムの状態 (運用状態) を示す欄 1 7 3、及び、測定データの欄 1 7 4 を含む。例えば、監視対象システムがエアコンディショナであるとする。時刻欄 1 7 2 は、検査データレコードのデータを取得した時刻を示す。図 7 の例において、日付は省略されている。

【 0 0 3 1 】

運用状態を示す欄 1 7 3 は、それぞれ、エアコンディショナの設定の要素を示す。例え

10

20

30

40

50

ば、運用状態を示す欄 173 は、電源の ON/OFF の欄、冷房や暖房などの動作モードの欄、風速の欄、上下の風向きの欄等を含む。測定データの欄 174 は、例えば、エアコンディショナが設置されている部屋の室温の欄、エアコンディショナに吸入される空気の温度の欄、エアコンディショナから排出される空気の温度の欄等を含む。

【0032】

後述するように、学習データデータベース 212 の欄は、検査データデータベース 233 の全ての欄を含む。因果構造モデルのノードは、それぞれ、監視対象システムについて測定データの値を示す。因果構造モデル 215 は、監視対象システムについての測定データ間の因果関係を示す。

【0033】

図 8 は、目的変数値推定プログラム 231 による処理のフローチャートである。目的変数値推定プログラム 231 は、検査データレコード 171 から、因果構造モデル 215 によって、監視対象目的変数の推定値を計算する。エアコンディショナの例において、その目的変数、つまり、因果構造モデル 215 のトップノード 216 は、例えば、エアコンディショナが設置されている部屋の室温である。

【0034】

目的変数値推定プログラム 231 は、検査データデータベース 233 から、検査データレコード 171 を取得する (S101)。目的変数値推定プログラム 231 は、例えば、新たな検査データレコード 171 が検査データデータベース 233 に追加されると、本処理を開始する。その場合、目的変数値推定プログラム 231 は、追加された検査データレコード 171 を検査データデータベース 233 から取得する。

【0035】

目的変数値推定プログラム 231 は、検査データレコード 171 の運用状態を特定する (S102)。具体的には、目的変数値推定プログラム 231 は、検査データレコード 171 の運用状態を示す欄 173 の値を取得する。監視対象システムの運用状態は、運用状態を示す欄 173 の値の組 (ベクトル) で表わされる。運用状態を示す欄 173 における一つの欄の値でも異なる場合、運用状態は異なる。

【0036】

目的変数値推定プログラム 231 は、モデルデータベース 222 において、検査レコードの運用状態とマッチする因果構造モデルを検索する (S103)。具体的には、目的変数値推定プログラム 231 は、運用状態を指定して、因果構造モデルの検索をモデル管理装置 220 に依頼する。モデル管理プログラム 221 は、指定された運用状態と同一の運用状態の因果構造モデルを、モデルデータベース 222 において検索する。後述するように、モデルデータベース 222 は、異なる複数の運用状態に対応する因果構造モデルを格納している。運用状態それぞれに対応した因果構造モデルを用意することで、より適切な正常/異常判定及び異常原因の推定が可能となる。

【0037】

モデル管理プログラム 221 は、指定された運用状態と一致する因果構造モデルが存在しない場合、それを示す返答を因果構造モデル推定装置 210 に送信する。指定された運用状態と一致する因果構造モデルが存在する場合、モデル管理プログラム 221 は、その因果構造モデルを因果構造モデル推定装置 210 に送信する。

【0038】

検査データレコード 171 とマッチする因果構造モデルが存在しない場合 (S104: NO)、目的変数値推定プログラム 231 は、検査データレコードに対応する因果構造モデルが存在しないことを示す警告を、クライアント装置 240 において表示する (S105)。具体的には、目的変数値推定プログラム 231 は、上記表示の画像データをクライアント装置 240 に送信する。クライアント装置 240 は、その表示デバイスにおいて、上記画像を表示する。

【0039】

なお、検査データレコード 171 とマッチする因果構造モデルとは、それらの運用状態ベ

10

20

30

40

50

クトルが完全一致でなくともよい。例えば、運用状態の類似度が所定値より高く、最も類似度が高い因果構造モデルを、検査データレコードにマッチする因果構造モデルと決定してもよい。類似度の計算方法は任意であり、例えば、コサイン類似度を使用できる。

【 0 0 4 0 】

検査データレコード 1 7 1 とマッチする因果構造モデルが存在する場合 (S 1 0 4 : Y E S)、目的変数値推定プログラム 2 3 1 は、当該因果構造モデルを取得し、当該因果構造モデルを使用して、検査データレコード 1 7 1 から、監視対象目的変数の推定値を計算する (S 1 0 6)。検査データレコード 1 7 1 とマッチする因果構造モデルを使用することで、正確に監視対象目的変数の値を推定することができる。

【 0 0 4 1 】

具体的には、目的変数値推定プログラム 2 3 1 は、検査データレコード 1 7 1 から、因果構造モデル 2 1 5 の最下層のノードに対応する値を抽出する。因果構造モデル 2 1 5 の各ノードの値は、検査データレコード 1 7 1 に含まれる。目的変数値推定プログラム 2 3 1 は、因果構造モデル 2 1 5 に従って、最下層のノードの値から、トップのノードの値を計算する。トップのノードの値は、監視対象目的変数の推定値である。

【 0 0 4 2 】

目的変数値推定プログラム 2 3 1 は、計算した推定値を、メモリ 3 1 2 に出力する (S 1 0 7)。また、目的変数値推定プログラム 2 3 1 は、推定値をクライアント装置 2 4 0 に送信する。クライアント装置 2 4 0 は、その表示デバイスにおいて、推定値を表示する。

【 0 0 4 3 】

目的変数値推定プログラム 2 3 1 は、計算した推定値、並びに、推定値の計算に使用した検査データレコード 1 7 1 及び因果構造モデル 2 1 5 を特定する情報を、履歴情報として、補助記憶装置 3 1 3 に格納する。検査データレコード 1 7 1 及び因果構造モデル 2 1 5 の情報は、それらを特定する情報により、検査データデータベース 2 3 3 及びモデルデータベース 2 2 2 からそれぞれ取得できる。

【 0 0 4 4 】

図 9 は、乖離判定プログラム 2 3 2 による処理のフローチャートである。乖離判定プログラム 2 3 2 は、目的変数値推定プログラム 2 3 1 が計算した目的変数の推定値と、検査データレコード 1 7 1 に含まれる目的変数の実測値の乖離度を計算し、その乖離度に基づいて、監視対象システムにおける異常の有無を推定する。エアーコンディショナの例において、例えば、乖離判定プログラム 2 3 2 は、室内温度の推定値と実測値との間の乖離度を計算する。

【 0 0 4 5 】

図 9 を参照して、乖離判定プログラム 2 3 2 は、検査データレコード 1 7 1 から目的変数の実測値を取得する (S 1 3 1)。乖離判定プログラム 2 3 2 は、その実測値と、目的変数値推定プログラム 2 3 1 が計算した目的変数の推定値と、を比較し (S 1 3 2)、推定精度を計算する (S 1 3 3)。推定精度は乖離度の例であり、例えば、 $(1 - | \text{実測値} - \text{推定値} | / \text{実測値})$ で計算される。

【 0 0 4 6 】

乖離判定プログラム 2 3 2 は、計算した推定精度と所定の閾値とを比較する (S 1 3 4)。推定精度が閾値以上である場合 (S 1 3 4 : N O)、乖離判定プログラム 2 3 2 は、検査データレコード 1 7 1 (監視対象システム) は正常であり、異常がないと判定する (S 1 3 5)。

【 0 0 4 7 】

推定精度が閾値より小さい場合 (S 1 3 4 : Y E S)、乖離判定プログラム 2 3 2 は、検査データレコード 1 7 1 (監視対象システム) において異常が存在すると判定し、検査データレコードが異常であることを警告する (S 1 3 6)。具体的には、乖離判定プログラム 2 3 2 は、監視対象システムに異常があることを示す警告をクライアント装置 2 4 0 に送信する。クライアント装置 2 4 0 は、その警告を表示デバイスにおいて表示する。

【 0 0 4 8 】

10

20

30

40

50

乖離判定プログラム 232 は、計算した推定精度、正常 / 異常判定結果、及び検査データレコード 171 を同定する情報を、履歴情報として補助記憶装置 313 に格納する。検査データレコード 171 は、それを同定する情報を使用して、検査データデータベース 233 から取得できる。

【0049】

検査データレコード 171 において異常があると判定された場合、乖離判定プログラム 232 は、因果構造モデル 215 において、異常の原因を推定（探索）する（S137）。異常原因の推定の詳細は後述する。

【0050】

上述のように、検査データ乖離判定装置 230 は、因果構造モデル 215 の最下層のノードに検査データレコードの測定値を入力し、上層の複数層のノード（中間ノード）の推定値を因果構造モデル 215 において順次計算する。検査データ乖離判定装置 230 は、最終的に得られるトップノードの値（目的変数の値）と検査データレコードの実測値との乖離に基づいて、異常が発生しているか判定する。

【0051】

階層構造を有する因果構造モデルにおいて、階層的にノードの値を推定することで、異常を迅速に発見することができる。具体的には、因果構造モデル 215 における階層的推定において、何れかのノードの異常は、上層に伝播する。したがって、因果構造モデル 215 において、複数層に渡って推定値の計算を行うことで、推定値の異常（実測値からの乖離）が増大する。これにより、より早く監視対象システムにおける異常を検出することが可能である。

【0052】

なお、検査データレコードの値は、因果構造モデル 215 における最下層と異なる層のノードに入力されてもよい。監視対象目的変数のノードと検査データを入力するノードとの間に 1 又は複数の中間ノードが存在する場合、異常の早期検出が可能となる。監視対象目的変数のノードは、モデルデータベース 222 に格納されている因果構造モデルにおける、中間ノードであってもよい。つまり、監視対象目的変数のノードから上層ノードに向かうエッジが存在してもよい。推定値の計算においては、監視対象目的変数のノードが、トップノードとして扱われる。

【0053】

図 10、11 及び 12 は、クライアント装置 240 が表示するグラフィカルユーザインタフェース（GUI）画像の例を示す。図 10 は、監視対象の監視画像 400 の例を示す。監視画像 400 は、検査データレコード 171 の検査結果を示す。具体的には、監視画像 400 は、検査データレコードの取得時刻 401、監視対象の目的変数の実測値 402、目的変数の推定値 403、及び正常 / 異常の判定結果 404 を含む。本例において、目的変数の値は、センサ A により測定される。判定結果 404 は乖離判定プログラム 232 から通知され、それ以外の情報は目的変数値推定プログラム 231 から送信される。

【0054】

監視画像 400 は、さらに、モデルチェックボタン 405、実測値及び推定値の履歴を表示するためのボタン 406、及び、他のセンサデータ（目的変数）の情報を表示させるためのボタン 407 を含む。監視画像 400 により、ユーザは、監視対象の正常 / 異常の情報を含む、監視情報を知ることができる。

【0055】

図 11 は、監視画像 400 においてモデルチェックボタン 405 がユーザにより選択された場合の画像例 410 を示す。モデルチェックボタン 405 が選択されると、目的変数の推定値の計算に使用された因果構造モデルが表示される。因果構造モデル推定装置 210（例えば目的変数値推定プログラム 231）は、クライアント装置 240 からの要求に回答して、推定値の計算に使用した因果構造モデルの情報をクライアント装置 240 に送信する。

【0056】

10

20

30

40

50

画像 4 1 0 において、因果構造モデルは、運用状態 1 の因果構造モデルである。画像 4 1 0 は、因果構造モデルのグラフ画像 4 1 1 及びノード間の関係を示す回帰式 4 1 2 を含む。ボタン 4 1 3 は、他の運用状態のモデルの表示を可能とする。画像 4 1 0 により、ユーザは、因果構造モデルをチェックできる。

【 0 0 5 7 】

図 1 2 は、監視画像 4 0 0 においてボタン 4 0 6 がユーザにより選択された場合の画像例 4 2 0 を示す。画像 4 2 0 は、監視対象の目的変数の実測値、推定値及び推定精度の履歴を示す。これらの情報は、検査データ乖離判定装置 2 3 0 から取得される。画像 4 2 0 は、実測値、推定値及び推定精度の履歴を示すテーブル 4 2 1、実測値の履歴（時間変化）を示すグラフ 4 2 2、及び、推定値の履歴（時間変化）を示すグラフ 4 2 3 を含む。画像 4 2 0 により、ユーザは、実測値、推定値及び推定精度の履歴をチェックできる。

10

【 0 0 5 8 】

次に、因果構造モデル 2 1 5 において、異常の原因を推定する処理（S 1 3 7）を説明する。図 1 3 は、異常の原因のノードを推定する方法例を模式的に示す。本例は、監視対象目的変数のノード 2 1 6 からエッジに沿って下層に向かって異常原因のノードを探索する。

【 0 0 5 9 】

具体的には、乖離判定プログラム 2 3 2 は、トップノード 2 1 6 の直下のノードである原因ノードそれぞれの実測値の（同一運用状態における）前回測定からの変化率（乖離の例）を計算する。乖離判定プログラム 2 3 2 は、トップノード 2 1 6 の原因ノードにおいて、前回測定からの変化率が閾値を超えるノードを、異常原因ノード候補と決定する。図 1 3 の例において、ノード 2 1 7 が異常原因ノード候補である。

20

【 0 0 6 0 】

乖離判定プログラム 2 3 2 は、異常原因ノード候補の原因ノードそれぞれの実測値の変化率を計算する。乖離判定プログラム 2 3 2 は、変化率が閾値を超えるノードを、異常原因ノード候補と決定する。図 1 3 の例において、ノード 2 1 8 が異常原因ノード候補である。

【 0 0 6 1 】

乖離判定プログラム 2 3 2 は、上記処理を、推定値の計算において検査データを入力した層（本例において最下層）まで繰り返す。途中の層において、全ての原因ノードの変化率が閾値以下である場合、新たな異常原因ノード候補の探索は、終了する。乖離判定プログラム 2 3 2 は、発見された全ての異常原因ノード候補を、ユーザに提示する。

30

【 0 0 6 2 】

乖離判定プログラム 2 3 2 は、異常原因ノード候補において、その直下のノードが異常原因ノードではないノードを選択して、異常原因ノード候補としてユーザに提示してもよい。乖離判定プログラム 2 3 2 は、変化率が最大のノードを選択して、異常原因ノード候補としてユーザに提示してもよい。

【 0 0 6 3 】

図 1 4 は、図 1 3 を参照して説明した異常原因ノード推定方法のフローチャートである。乖離判定プログラム 2 3 2 は、因果構造モデル 2 1 5 の前回の検査データレコード（測定値）を、検査データデータベース 2 3 3 から取得する（S 1 5 1）。乖離判定プログラム 2 3 2 は、前回の検査データレコードにおける測定値と今回の検査データレコードの測定値とを比較して、結果ノードの全ての原因ノードの測定値の変化率を計算する（S 1 5 2）。最初を選択される結果ノードは、監視対象目的変数のノード 2 1 6 である。

40

【 0 0 6 4 】

乖離判定プログラム 2 3 2 は、変化率が閾値を超える全ての原因ノードを異常原因ノード候補として選択する（S 1 5 3）。閾値はノードに共通又はノード毎に設定されている。乖離判定プログラム 2 3 2 は、未選択の異常原因ノード候補を結果ノードとして選択し（S 1 5 4）、その原因ノードが存在するか判定する（S 1 5 5）。

【 0 0 6 5 】

原因ノードが存在する場合（S 1 5 5：YES）、乖離判定プログラム 2 3 2 は、選択している結果ノードについて、ステップ 1 5 2 及び 1 5 3 を実行する。原因ノードが存在し

50

ていない場合（S 1 5 5 : N O）、乖離判定プログラム 2 3 2 は、未選択の異常原因候補ノードが存在するか判定する（S 1 5 6）。

【0 0 6 6】

未選択の異常原因候補ノードが存在する場合（S 1 5 6 : Y E S）、乖離判定プログラム 2 3 2 は、新たに、未選択の異常原因候補ノードを選択する（S 1 5 4）。未選択の異常原因候補ノードが存在しない場合（S 1 5 6 : N O）、乖離判定プログラム 2 3 2 は、これまでに選択した異常原因候補ノードを出力する（S 1 5 7）。例えば、乖離判定プログラム 2 3 2 は異常原因候補ノードの情報をクライアント装置 2 4 0 に送信し、クライアント装置 2 4 0 はその情報を表示する。

【0 0 6 7】

異常の原因のノードを推定する他の方法例を説明する。図 1 5 は、異常の原因のノードを推定する方法例を模式的に示す。本例は、監視対象目的変数のノード 2 1 6 からエッジに沿って下層に向かって異常原因のノードを探索する。乖離判定プログラム 2 3 2 は、ノード 2 1 6 の原因ノードにおいて、前回測定からの変化率（乖離の例）が最大のノードを、異常原因ノード候補と決定する。図 1 5 の例において、ノード 2 1 7 が異常原因ノード候補である。

【0 0 6 8】

乖離判定プログラム 2 3 2 は、異常原因ノード候補 2 1 7 の原因ノードそれぞれの実測値の変化率を計算する。乖離判定プログラム 2 3 2 は、変化率が最大のノードを、異常原因ノード候補と決定する。図 1 5 の例において、ノード 2 1 8 が異常原因ノード候補である。

【0 0 6 9】

乖離判定プログラム 2 3 2 は、上記処理を、推定値の計算において検査データを入力した層（本例において最下層）まで繰り返す。乖離判定プログラム 2 3 2 は、発見された全ての異常原因ノード候補において、変化率が最大のノードを最も可能性が高い異常原因ノード候補として選択する。乖離判定プログラム 2 3 2 は、選択した異常原因ノード候補を、ユーザに提示する。図 1 5 の例において、ノード 2 1 7 が最も可能性が高い異常原因ノード候補である。なお、乖離判定プログラム 2 3 2 は、全ての異常原因ノード候補をユーザに提示してもよい。

【0 0 7 0】

図 1 6 は、図 1 5 を参照して説明した異常原因ノード推定方法のフローチャートである。乖離判定プログラム 2 3 2 は、因果構造モデル 2 1 5 の前回の検査データレコード（測定値）を、検査データデータベース 2 3 3 から取得する（S 1 7 1）。乖離判定プログラム 2 3 2 は、前回の検査データレコードにおける測定値と今回の検査データレコードの測定値とを比較して、結果ノードの全ての原因ノードの測定値の変化率を計算する（S 1 7 2）。最初に選択される結果ノードは、監視対象目的変数のノード 2 1 6 である。

【0 0 7 1】

乖離判定プログラム 2 3 2 は、変化率が最大の原因ノードを異常原因ノード候補として選択する（S 1 7 3）。乖離判定プログラム 2 3 2 は、異常原因ノード候補を結果ノードとして選択し（S 1 7 4）、その原因ノード（直下のノード）が存在するか判定する（S 1 7 5）。原因ノードが存在する場合（S 1 7 5 : Y E S）、乖離判定プログラム 2 3 2 は、ステップ S 1 7 2 に戻る。

【0 0 7 2】

原因ノードが存在しない場合（S 1 7 5 : N O）、乖離判定プログラム 2 3 2 は、異常原因ノード候補のうち、最も変化率が大きいノードを、最も可能性が高い、異常原因ノード候補と決定する（S 1 7 6）。さらに、乖離判定プログラム 2 3 2 は、例えば、最も可能性が高い、異常原因候補ノードの情報をクライアント装置 2 4 0 に送信し、クライアント装置 2 4 0 はその情報を表示する。

【0 0 7 3】

上述のように、因果構造モデルにおいて監視対象目的変数のノードからエッジに沿って異常原因ノード候補を探索することで、迅速かつ適切に異常原因ノード候補を特定すること

10

20

30

40

50

ができる。

【 0 0 7 4 】

図 1 3 及び 1 4 を参照して説明した方法において、異常原因ノード候補の決定のために、直前の値と現在の値との変化率に代えて、直前の複数の測定値の平均値（移動平均値）と現在の値の変化率を使用してもよい。他の例において、実測値の変化率に代わり、実測値と推定値の間の推定精度（乖離）を使用してもよい。乖離判定プログラム 2 3 2 は、各ノードの推定精度を計算し、推定精度が閾値より低いノードを異常原因ノード候補と決定する。最下層のノードは推定値が計算されないため、実測値の変化率を使用する。

【 0 0 7 5 】

図 1 5 及び 1 6 を参照して説明した方法において、異常原因ノード候補の決定のために、直前の値から現在の値への変化率に代えて、直前の複数の測定値の平均値（移動平均値）から現在の値への変化率を使用してもよい。他に例において、実測値の変化率に代わり、実測値と推定値の間の推定精度（乖離度）を使用してもよい。最下層のノードは推定値が計算されないため、実測値の変化率を使用する。最下層のノードと中間層のノードの比較のため、最下層のノードの実測値の変化率は補正される。

【 0 0 7 6 】

[因果構造モデルの推定]

次に、因果構造モデル推定装置 2 1 0 が因果構造モデルを推定（生成）する処理を説明する。因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、学習データデータベース 2 1 2 に格納されている学習データを分析し、因果構造モデルを推定（生成）する。因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、任意の方法で因果構造モデルを推定してよい。以下において、その一例を説明する。

【 0 0 7 7 】

図 1 7 は、因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 による因果構造モデルの推定のフローチャートである。因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、ユーザから、クライアント装置 2 4 0 を介して、学習データに含まれる複数の測定値（測定データ）における、監視対象目的変数（例えば室温）の指定を受け付ける（S 2 0 1）。

【 0 0 7 8 】

因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、指定された監視対象目的変数に関連する測定値を、学習データから、所定のアルゴリズムにより抽出する（S 2 0 2）。因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、関連する測定値から、非線形値を計算し、新たな関連測定値として追加する（S 2 0 3）。非線形値は、例えば、測定値の 2 乗や、異なる測定値の積である。

【 0 0 7 9 】

因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、関連測定値から、説明変数候補を選択する（S 2 0 5）。例えば、因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、関連測定値の間の単回帰分析を行い、相関係数が所定値より大きい関連値群が同一グループとなるように、関連測定値をグループ化する。さらに、グループ毎に 1 つの関連測定値を任意に選択し、説明変数候補と決定する。

【 0 0 8 0 】

因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、説明変数候補に関する重回帰分析（例えば変数増減法）を実行し（S 2 0 6）、目的変数の回帰式を算出する。この線形重回帰分析の結果、目的変数の回帰式は、説明変数の線形式で表わされる。因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、回帰式を非線形項で構成してもよい。

【 0 0 8 1 】

次に、因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、その回帰式が予め設定した完了条件を満たしているかを判定する（S 2 0 7）。完了条件は、例えば、ユーザが予め設定した関連測定値が説明変数として抽出されることや、使用している学習データにより新たなノードが生成されないことである。完了条件が満たされていない場合（S 2 0 7：NO）、因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、説明変数それぞれを新たな目的変数と決定し、未選

10

20

30

40

50

択の関連データから説明変数候補を選択する（S 2 0 4）。

【 0 0 8 2 】

因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、説明変数候補の線形重回帰分析により、目的変数それぞれの回帰式を決定する。重回帰分析を逐次的に繰り返すことで、K P I データに関する因果構造モデルの全体が自動推定される。

【 0 0 8 3 】

完了条件が満たされている場合（S 2 0 7：Y E S）、因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、作成した因果構造モデルをモデル管理装置 2 2 0 に送信し、モデルデータベース 2 2 2 に格納する。

【 0 0 8 4 】

[学習期間の設定]

次に、因果構造モデルを推定するために使用する学習データの期間を決定する方法を説明する。学習期間が短いと、その分得られるデータ点数が少ないため、滅多に起きない事象が捉えることができない。また、全ての事象が起こる期間を事前に特定することは困難である。したがって、適切な期間の学習データを使用することが重要である。図 1 8 に示すように、学習が進むと、推定される因果構造モデル 2 1 9 のノード数が増加する（成長する）。以下に説明する例は、因果関係の成長度合いを測定し、所定の成長の伸びが見られなくなった期間を適切な学習期間と決定する。

【 0 0 8 5 】

以下で説明する例においては、類似システムの因果構造モデルの成長度が閾値未満となる学習期間を、対象システムの学習期間と決定する。類似システムはユーザにより選択される。図 1 9 は、因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 が学習期間を決定する処理のフローチャートを示す。

【 0 0 8 6 】

因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、類似システムの因果構造モデルのための学習期間を [t _ 0、t _ 1] と設定する（S 2 2 1）。因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、期間 [t _ 0、t _ 1] の学習データを、学習データベース 2 1 2 から取得する（S 2 2 2）。因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、学習データを使用して、因果構造モデルを推定する（S 2 2 3）。因果構造モデルの推定は上述の通りである。

【 0 0 8 7 】

因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、推定した因果構造モデルの再現率が、閾値を超えるか判定する（S 2 2 4）。再現率が閾値を超える場合（S 2 2 4：Y E S）、因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、出力された因果構造モデルのノード数をカウントする（S 2 2 5）。

【 0 0 8 8 】

再現率が閾値以下である場合（S 2 2 4：N O）、追加された T 部分は異常値を含むので、因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、当該期間を学習期間から除く（S 2 2 6）。因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、因果構造モデルの成長度を計算する（S 2 2 7）。成長度は、（今回のノード数 - 前回のノード数）/ 今回のノード数で計算できる。因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、計算した成長度と閾値とを比較する（S 2 2 8）。

【 0 0 8 9 】

成長度が閾値以上である場合（S 2 2 8：N O）、因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、学習期間を延ばし（ $t_1 = t_1 + T$ ）（S 2 2 9）、ステップ S 2 0 2 に戻る。成長度が閾値未満である場合（S 2 2 8：Y E S）、因果構造モデル推定プログラム 2 1 1 は、期間 [t _ 0、t _ 1] に基づき、対象システムの因果構造モデルを推定するための学習期間を決定する。例えば、期間 [t _ 0、t _ 1] を対象システムの因果構造モデルを推定するための学習期間と決定する（S 2 3 0）。

【 0 0 9 0 】

[正常 / 異常判定の閾値の設定]

10

20

30

40

50

次に、因果構造モデルによる目的変数の推定値と実測値とを比較して正常 / 異常の判定を行うための閾値の設定方法を説明する。適切な閾値を設定することで、監視対象システムの異常を適切に発見することができる。

【 0 0 9 1 】

図 2 0 は、閾値設定方法の概要を説明するための、推定精度の時間変化と閾値との関係を示すグラフである。グラフにおいて示されている推定精度は、個々の運用状態に閾値が設定される場合にいずれかの運用状態の推定精度であり、閾値が全て運用状態に共通の場合に全ての運用状態における推定精度である。

【 0 0 9 2 】

閾値 3 0 1 は推定精度の底点 3 1 3 と一致し、閾値 3 0 2 は推定精度の底点 3 1 4 と一致している。底点 3 1 1 及び 3 1 2 は底点 3 1 4 より小さく、底点 3 1 4 は底点 3 1 3 より小さい。底点 3 1 1 及び 3 1 2 において、監視対象システムは実際の異常を示している。底点 3 1 3 及び 3 1 4 において、監視対象システムは正常である。

10

【 0 0 9 3 】

閾値 3 0 1 よりも低い値を示す底点 3 1 4 において、監視対象システムは正常である。一方、閾値 3 0 2 より低い全ての底点 3 1 1 及び 3 2 2 において、監視対象システムは実際の異常を示している。したがって、閾値 3 0 2 は閾値 3 0 1 よりも適切である。閾値を閾値 3 0 2 に設定する又は閾値 3 0 1 から閾値 3 0 2 に更新することで、より適切な判定が可能となる。

【 0 0 9 4 】

20

図 2 1 は、乖離判定プログラム 2 3 2 による初期閾値設定のフローチャートを示す。乖離判定プログラム 2 3 2 は、因果構造モデルによる学習データレコードそれぞれの推定精度を計算する (S 2 4 1)。乖離判定プログラム 2 3 2 は、最も低い推定精度の学習データレコードを選択する (S 2 4 2)。乖離判定プログラム 2 3 2 は、選択した学習データレコードが保守記録を含むか判定する (S 2 4 3)。

【 0 0 9 5 】

選択した学習データレコードが保守記録を含まない場合 (S 2 4 3 : N O)、乖離判定プログラム 2 3 2 は、非選択の学習データレコードから最も低い推定精度の学習データレコードを選択し (S 2 4 4)、ステップ S 2 4 3 に戻る。選択した学習データレコードが保守記録を含む場合 (S 2 4 3 : Y E S)、乖離判定プログラム 2 3 2 は、選択した学習データレコードの推定精度を閾値に設定する (S 2 4 5)。学習データレコードが保守記録を含むことは、監視対象システムにおいて異常が発生したことを意味する。

30

【 0 0 9 6 】

図 2 2 は、乖離判定プログラム 2 3 2 による閾値更新のフローチャートを示す。乖離判定プログラム 2 3 2 は、検査データデータベース 2 3 3 から選択した検査データレコードの推定精度を計算する (S 2 6 1)。乖離判定プログラム 2 3 2 は、推定精度が閾値未満であるか判定する (S 2 6 2)。

【 0 0 9 7 】

推定精度が閾値未満である場合 (S 2 6 2 : Y E S)、乖離判定プログラム 2 3 2 は、当該検査データレコードは異常と判定する (S 2 6 3)。推定精度が閾値以上である場合 (S 2 6 2 : N O)、乖離判定プログラム 2 3 2 は、当該検査データレコードは正常と判定する (S 2 6 4)。

40

【 0 0 9 8 】

乖離判定プログラム 2 3 2 は、当該検査データレコードの保守記録をチェックする (S 2 6 5)。本例において、検査データレコードは、当該検査データレコードに対する保守記録を格納するフィールドを含む。乖離判定プログラム 2 3 2 は、推定精度に基づく正常 / 異常判定が正しいか、保守記録の有無に基づき判定する (S 2 6 6)。

【 0 0 9 9 】

具体的には、推定精度に基づく判定が異常である場合、保守記録が存在すればその判定は正しく、保守記録がない場合その判定は正しくない。判定が正しい場合 (S 2 6 6 : Y E

50

S)、乖離判定プログラム232は、現在の閾値を維持する(S268)。判定が正しくない場合(S266:NO)、乖離判定プログラム232は、当該検査データレコードの推定精度に基づき閾値を更新する。例えば、当該検査データレコードの推定精度が新たな閾値とされる(S267)。

【0100】

[運用状態に応じた因果構造モデルの推定]

次に、監視対象システムの運用状態それぞれに応じた因果構造モデルの推定を説明する。運用状態それぞれに応じた因果構造モデルにより、より適切な正常/異常判定が可能となる。

【0101】

図23は、監視対象システムの運用状態毎の因果構造モデルの推定を説明する図である。因果構造モデル推定プログラム211は、学習データデータベース212から、運用状態毎に学習データ331を取得し、運用状態それぞれの因果構造モデル215を推定する(S31)。

【0102】

図23において、運用状態1～運用状態Nの学習データが存在し、例として、運用状態1の学習データが符号331で指示されている。また、運用状態1～運用状態Nそれぞれの因果構造モデルが推定され、例として、運用状態1の因果構造モデルが符号215で指示されている。

【0103】

図24は、学習データデータベース212の構成例を示す。学習データデータベース212は複数の学習データレコード351を含む。図24においては、一つの学習レコードが例として符号351で指示されている。学習データレコード351は、監視対象システムの状態の情報、センサにより測定されたデータから得られる値、及び保守記録を含む。

【0104】

学習データデータベース212は、時刻欄352、監視対象システムの状態(運用状態)を示す欄353、測定データの欄354、及び保守記録の欄355を含む。図24の例において、日付は省略されている。時刻欄352、監視対象システムの状態(運用状態)を示す欄353及び測定データの欄354の内容は、図7を参照して説明した検査データデータベース233と同様である。

【0105】

図25は、運用状態1の学習データ331を示す。監視対象システムの運用状態は、複数種類の状態(状態A、状態B・・・)の値で定義される。いずれか一つの状態(欄)の値が異なると、運用状態は異なる。特定の運用状態の学習データ331は、因果構造モデルの推定時に学習データデータベース212から選択されてもよく、運用状態毎の学習データが、学習データデータベース212において、予め分類されていてもよい。

【0106】

[未来における目的変数値の予測]

次に、未来の時刻を入力すると、該当該時刻の目的変数の予測値を出力する因果構造モデルを説明する。これにより、監視対象のシステムにおける、将来の異常の発生を予測することができる。ユーザは、異常の発生を防止することができる。因果構造モデル推定プログラム211は、監視対象の目的変数の時間変化を予測可能な因果構造モデルを構築する。目的変数値推定プログラム231は、当該因果構造モデルと時刻情報に基づき、監視対象の目的変数の時間変化を予測する。

【0107】

図26は、運用状態変化と推定精度の関係を模式的に示す。目的変数値推定プログラム231は、過去の実績運用状態変化501のパターンに類似するパターンの運用状態変化を学習データデータベース212において探し、見つけた運用状態変化の後の運用状態変化を、予測運用状態変化502に適用する。運用状態変化は、ベクトルで表わすことができ、目的変数値推定プログラム231は、ベクトル間の類似度により、類似するパターンの

10

20

30

40

50

運用状態変化を選択できる。例えば、類似度が最も高いパターン又は閾値を超えるパターンの運用状態変化が選択される。

【0108】

目的変数値推定プログラム231は、予測運用状態変化502の運用状態それぞれに対応する因果構造モデルを選択し、監視対象の目的変数の予測値を計算する。推定精度の時間変化のグラフ505において、範囲503は過去の実績値を示し、範囲504は予測値を示す。範囲503及び範囲504は、それぞれ、実績運用状態変化501及び予測運用状態変化502に対応している。

【0109】

図27は、監視対象の目的変数の時間変化を予測可能な因果構造モデルを推定するための学習データを格納する学習データデータベース212の構成例を示す。学習データデータベース212は、測定データの欄354に、時刻の欄を含む。

10

【0110】

図28は、監視対象の目的変数の時間変化を予測可能な因果構造モデルの例215を示す。因果構造モデル215において、最下層のノード（原因ノードが存在しないノード）511は、時刻の関数で表わされる。図17を参照して説明した因果構造モデルの推定において、因果構造モデル推定プログラム211は、説明変数のノードの測定値が時刻である場合に、そのノードを最下層のノードと決定する。目的変数値推定プログラム231は、最下層ノード511に時刻を入力して、監視対象の目的変数のノード216の予測値を決定する。

20

【0111】

図29は、因果構造モデル215による目的変数の予測値の表示例を示す。クライアント装置240は、目的変数値推定プログラム231から、当該画像データを取得し、表示デバイス317において表示する。

【0112】

グラフ521において、横軸は時刻、縦軸は目的変数を示す。範囲522は、目的変数の実績値を示し、範囲523は目的変数の予測値を示す。範囲523において、目的変数の値は、各時刻を入力とする因果構造モデル215の出力値である。時刻t2の予測値は、閾値524に達している。目的変数値推定プログラム231は、予測値が閾値に達する時刻を異常発生予測時刻と決定し、ユーザに提示する。

30

【0113】

[監視画像]

次に、クライアント装置240において表示される監視画像例を説明する。図30は、監視画像例530を示す。監視画像530は、因果構造モデルによって異常検出された場合に異常発生個所を表示し、さらに、異常個所における推定値と実測値との間の乖離を表示する。監視画像530は、セクション531、532及び533を含む。

【0114】

セクション531は、監視対象システム（システム1）の監視対象の目的変数の実測値の時間変化541及び推定値の時間変化542を示す。実測値の時間変化541は実線で表わされ、推定値の時間変化542は破線で表わされている。セクション531は、監視対象システムの複数の運用状態の値を示す。図30の例は、運用状態A及びその次の運用状態Bの実測値及び推定値を示す。

40

【0115】

セクション531は、運用状態Aにおける正常／異常判定の閾値A545及び運用状態Bにおける正常／異常判定の閾値B546を破線で示す。セクション531は、さらに、運用状態Aにおける異常個所543及び運用状態Bにおける異常個所544を、ハッチングパターンで埋められた円で示す。異常個所543はドットパターンで埋められ、異常個所544は斜線パターンで埋められている。斜線パターンはドットパターンよりも視認されやすい。

【0116】

50

セクション 5 3 2 は、リストボックス 5 5 1 によってユーザに運用状態の選択を可能とする。図 3 0 の例において、運用状態 B が選択されている。セクション 5 3 2 は、選択された運用状態の推定値の時間変化のグラフ 5 5 2 を表示する。

【 0 1 1 7 】

セクション 5 3 1 は、リストボックス 5 5 1 で選択された運用状態の異常個所を、選択されていない運用状態の異常個所よりも視認性が高い画像で示す。図 3 0 の例において、リストボックス 5 5 1 で選択された運用状態の異常個所を斜線パターンで示し、選択されていない運用状態の異常個所をドットパターンで示す。いずれの運用状態も選択されていない場合、セクション 5 3 1 は、最初の異常個所を視認性が高いパターンで示し、それ以外の異常個所を視認性が低いパターンで示す。

10

【 0 1 1 8 】

セクション 5 3 2 は、ボタン 5 5 3 を含む。ユーザによってボタン 5 5 3 が選択されると、セクション 5 3 3 は、リストボックス 5 5 1 で選択されている運用状態の因果構造モデル 5 6 1 を表示する。因果構造モデル 5 6 1 は、さらに、異常原因候補のノードを明示する。図 3 0 の例において、異常原因候補ノード (X 3 及び X 5) は太線で示されている。

【 0 1 1 9 】

セクション 5 3 3 は、ボタン 5 6 2 及び 5 6 3 を含む。ユーザによってボタン 5 6 2 が選択されると、運用状態 B の警告履歴が表示される。また、ボタン 5 6 3 が選択されると、運用状態 B におけるシステムの保守履歴が表示される。

【 0 1 2 0 】

20

上述のように、監視画像 5 3 0 は、監視対象システムの監視において、検出された異常及びその原因候補ノードをユーザに容易かつ適切に提示することができる。監視画像 5 3 0 を作成するためのデータは、検査データ乖離判定装置 2 3 0 からクライアント装置 2 4 0 に送信される。

【 0 1 2 1 】

図 3 1 は、警告メッセージの例 6 0 0 を示す。警告メッセージ 6 0 0 は、警告内容 6 0 1 及びボタン 6 0 2 ~ 6 0 5 を含む。警告内容 6 0 1 は、警告の詳細を示す。ボタン 6 0 2 が選択されると、警告メッセージの対象の因果構造モデルが表示される。ボタン 6 0 3 が選択されると、保守記録の入力画像が表示される。ボタン 6 0 4 が選択されると、当該警告メッセージを含む警告メッセージの履歴が表示される。ボタン 6 0 5 が選択されると、対応する目的変数の監視における実測値及び推定値の履歴が表示される。

30

【 0 1 2 2 】

図 3 2 は、保守記録の入力画像 6 2 0 を示す。ユーザは、保守記録の入力画像 6 2 0 において必要な情報を入力する。入力された情報は、検査データ乖離判定装置 2 3 0 に送信され、補助記憶装置 3 1 3 に格納される。また、入力された情報の一部は、検査データデータベース 2 3 3 に格納される。

【 0 1 2 3 】

なお、本発明は上記した実施例に限定されるものではなく、様々な変形例が含まれる。例えば、上記した実施例は本発明を分かりやすく説明するために詳細に説明したものであり、必ずしも説明したすべての構成を備えるものに限定されるものではない。また、ある実施例の構成の一部を他の実施例の構成に置き換えることが可能であり、また、ある実施例の構成に他の実施例の構成を加えることも可能である。また、各実施例の構成の一部について、他の構成の追加・削除・置換をすることが可能である。

40

【 0 1 2 4 】

また、上記の各構成・機能・処理部等は、それらの一部又は全部を、例えば集積回路で設計する等によりハードウェアで実現してもよい。また、上記の各構成、機能等は、プロセッサがそれぞれの機能を実現するプログラムを解釈し、実行することによりソフトウェアで実現してもよい。各機能を実現するプログラム、テーブル、ファイル等の情報は、メモリや、ハードディスク、SSD (Solid State Drive) 等の記録装置、または、ICカード、SDカード等の記録媒体に置くことができる。

50

【 0 1 2 5 】

また、制御線や情報線は説明上必要と考えられるものを示しており、製品上必ずしも全ての制御線や情報線を示しているとは限らない。実際には殆どすべての構成が相互に接続されていると考えてもよい。

【 符号の説明 】

【 0 1 2 6 】

1 5 0 学習データ、1 7 0 検査データ、1 7 1 検査データレコード、2 1 0 因果構造モデル推定装置、2 1 1 因果構造モデル推定プログラム、2 1 2 学習データデータベース、2 1 5 因果構造モデル、2 1 6 トップノード、2 1 7 異常原因ノード候補、2 1 9 因果構造モデル、2 2 0 モデル管理装置、2 2 1 モデル管理プログラム、2 2 2 モデルデータベース、2 2 3 検査データデータベース、2 3 0 検査データ乖離判定装置、2 3 1 目的変数値推定プログラム、2 3 2 乖離判定プログラム、2 3 3 検査データデータベース、2 4 0 クライアント装置、3 3 1 学習データ、3 5 1 学習データレコード、4 0 0 監視画像、4 1 0 因果構造モデル画像、4 2 0 実測値及び推定値の履歴の画像、5 3 0 監視画像、6 0 0 警告メッセージ、6 2 0 入力画像

10

20

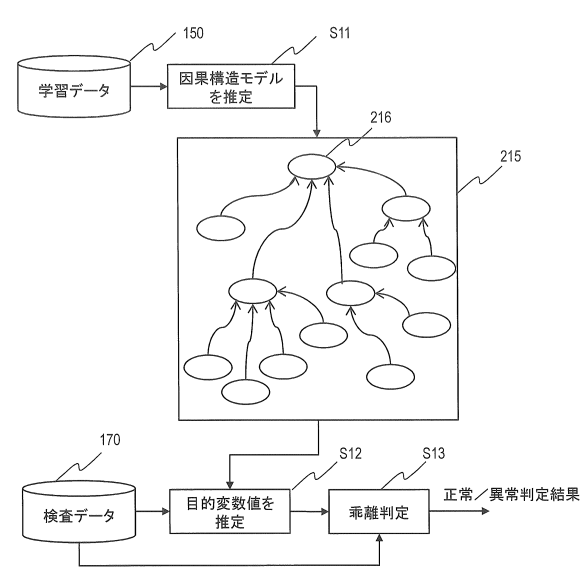
30

40

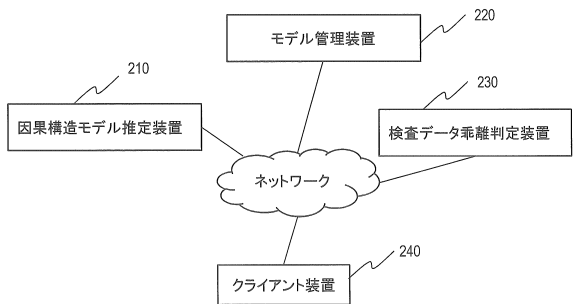
50

【図面】

【図 1】



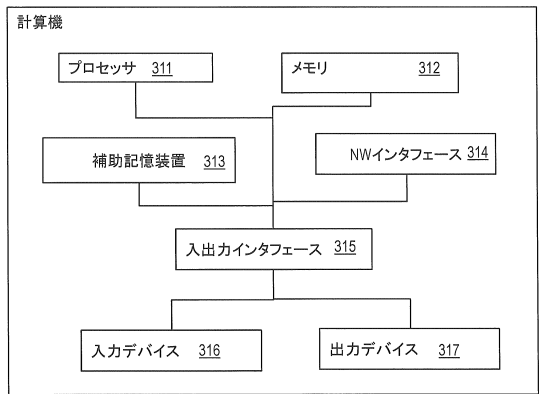
【図 2】



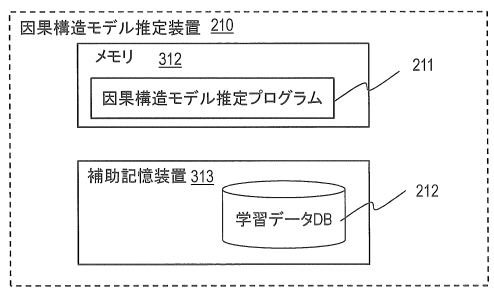
10

20

【図 3】



【図 4】

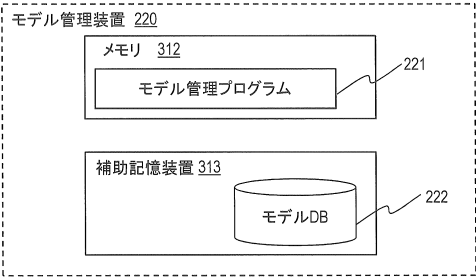


30

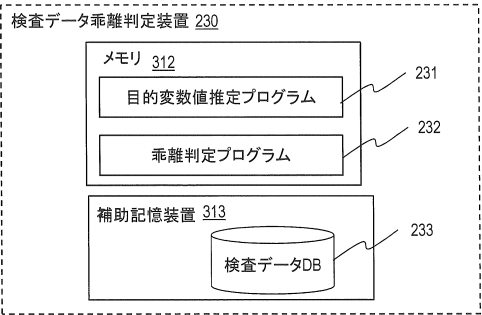
40

50

【図 5】



【図 6】



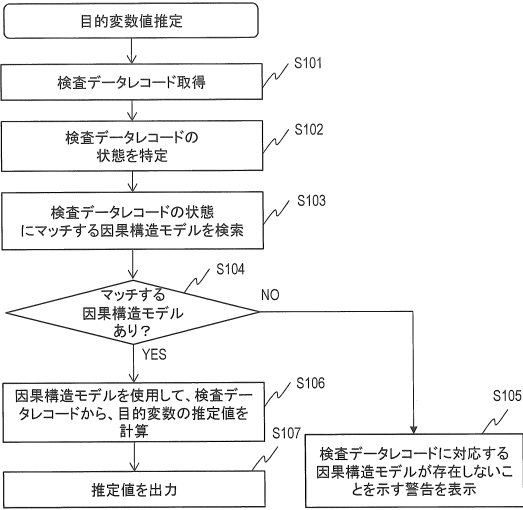
10

【図 7】

時刻	状態A	状態B	状態...	データA (X1)	データB (X2)	データ...
16:22	AB	BB	...	2	3	...
...

検査データDB

【図 8】



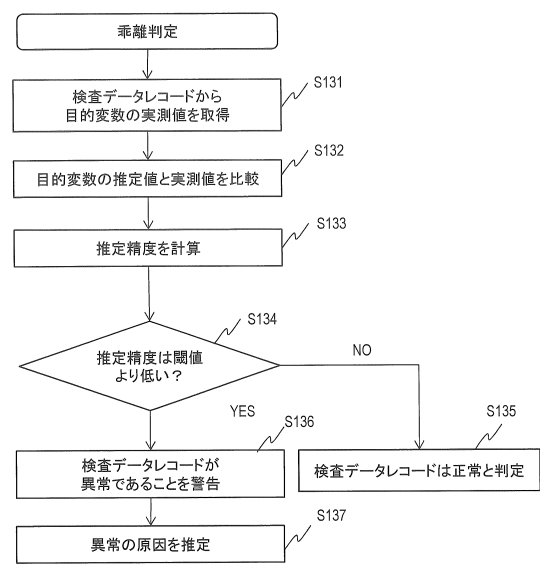
20

30

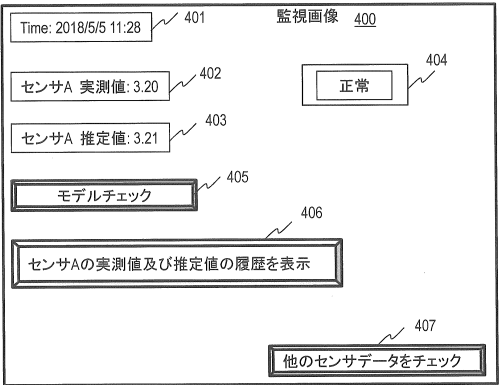
40

50

【図 9】

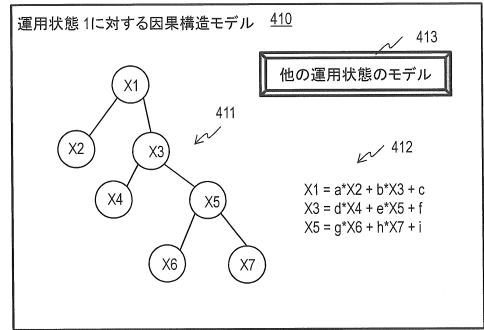


【図 10】

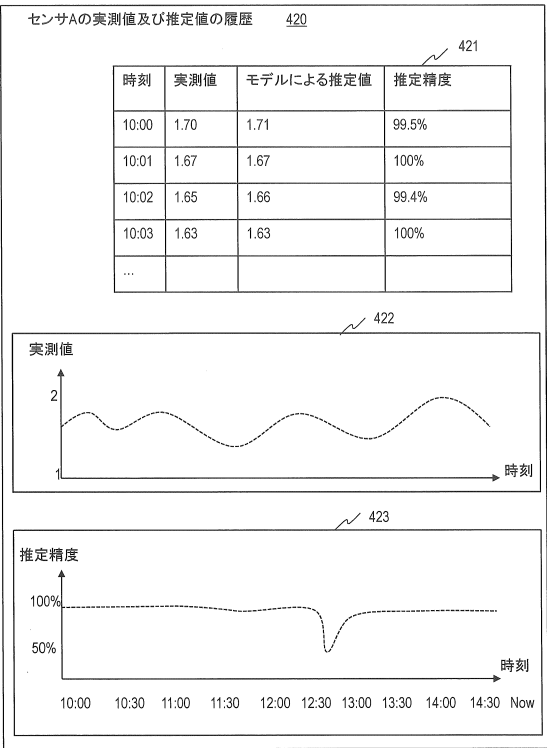


10

【図 11】



【図 12】

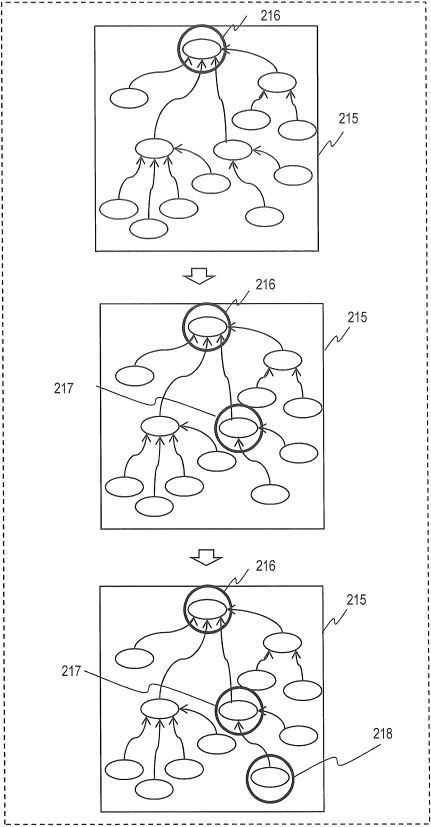


30

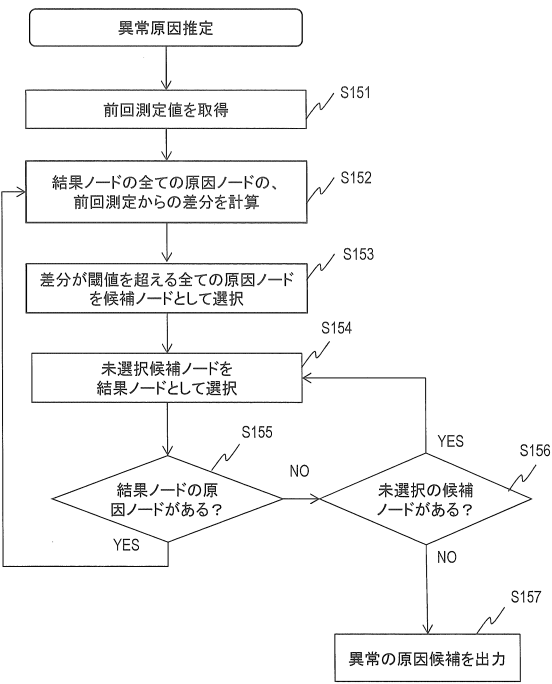
40

50

【図 1 3】



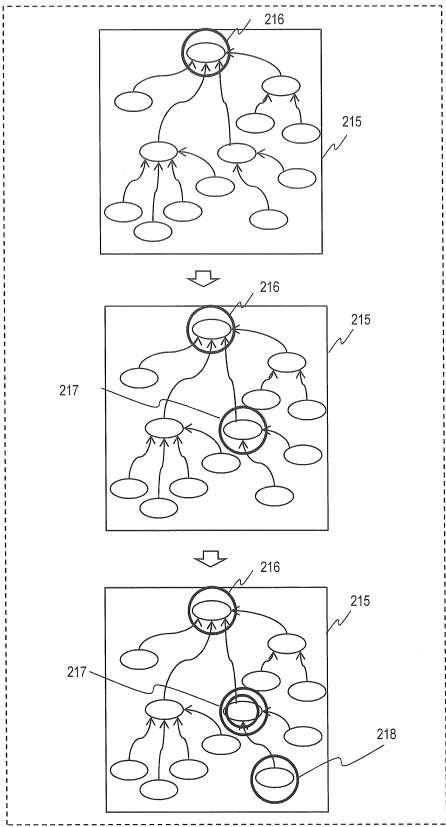
【図 1 4】



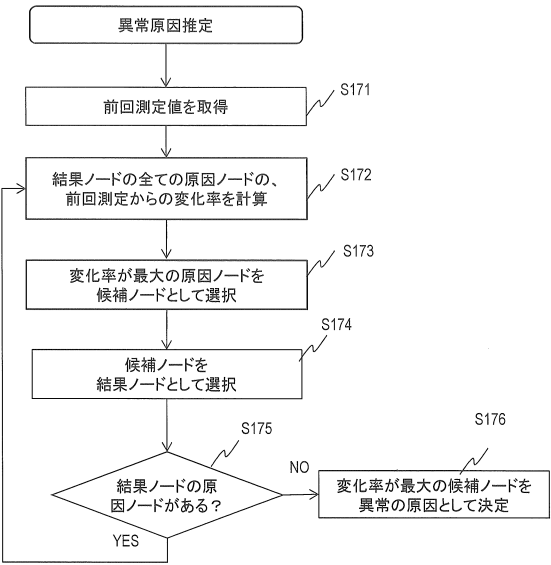
10

20

【図 1 5】



【図 1 6】

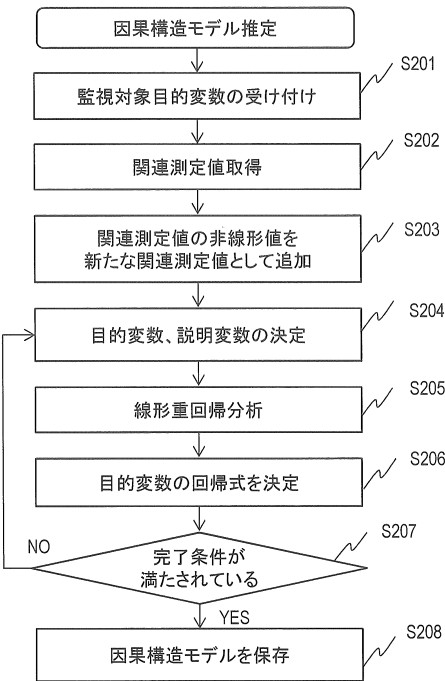


30

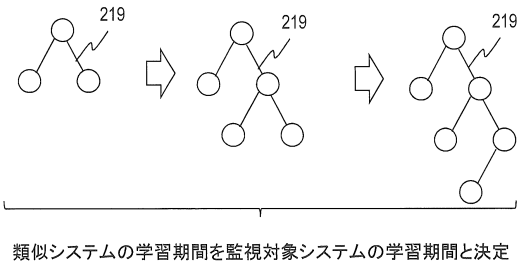
40

50

【図 17】



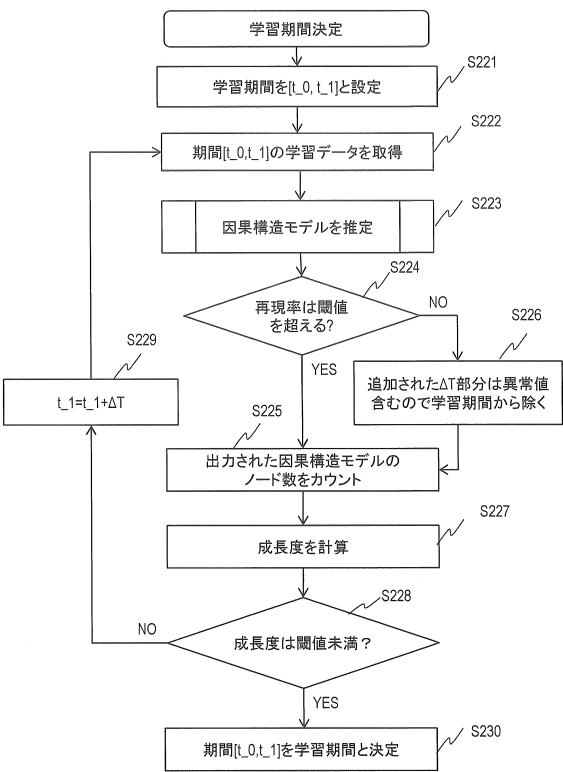
【図 18】



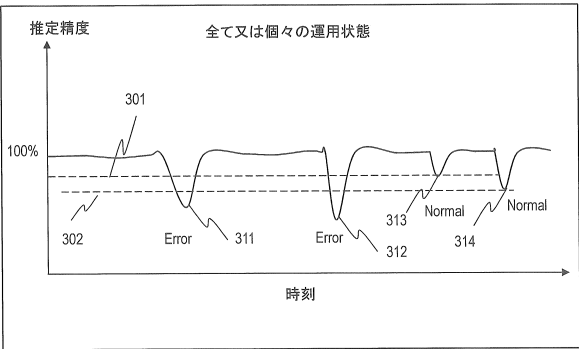
10

20

【図 19】



【図 20】

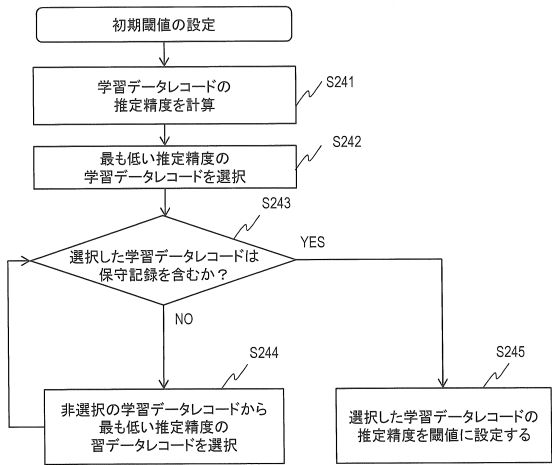


30

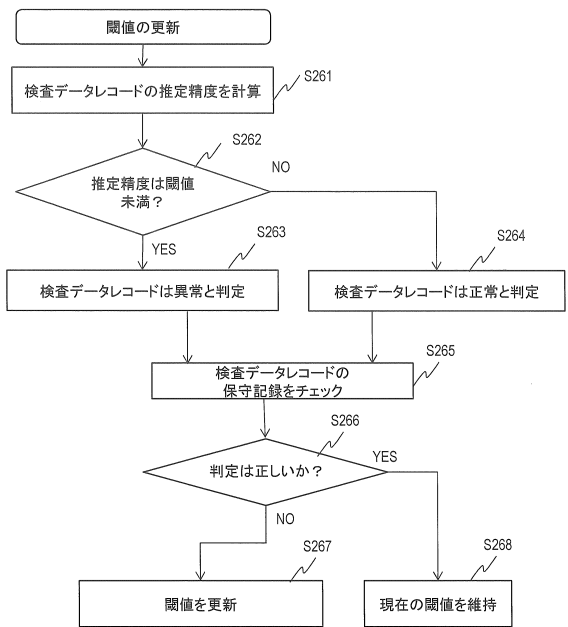
40

50

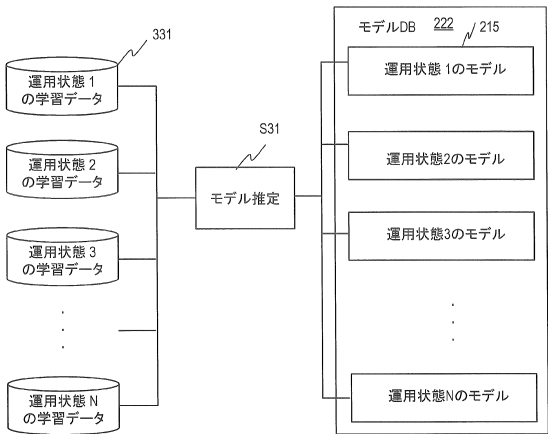
【図 2 1】



【図 2 2】



【図 2 3】



【図 2 4】

時刻	状態A	状態B	状態...	データA	データB	データ...	保守記録
12:31	AA	BA	...	1	4	...	NO
12:32	AB	BB	...	2	3	...	NO
12:33	AB	BA	...	3	4	...	保守
12:34	AA	BA	...	4	3	...	保守
...

学習データDB

10

20

30

40

50

【図 2 5】

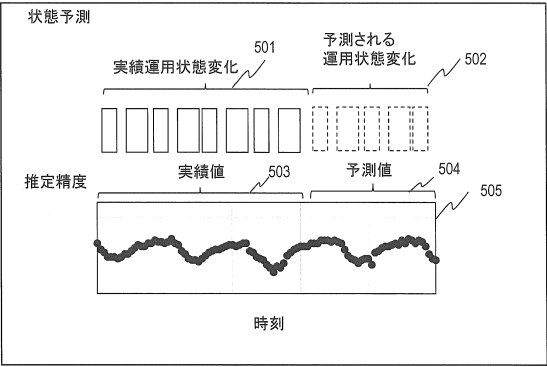
331

運用状態1

時刻	状態A	状態B	状態...	データA	データB	データ...	保守記録
12:31	AA	BA	...	1	4	...	NO
12:34	AA	BA	...	4	3	...	保守
...

運用状態1の学習データ

【図 2 6】



10

【図 2 7】

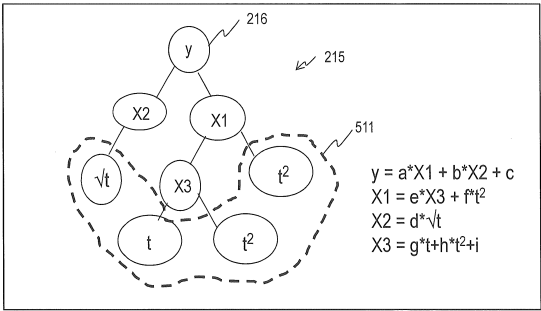
352 353 354 212 355

時刻	状態A	状態B	状態	データA	データB	...	時刻	保守記録
12:31	AA	BA	...	1	4	...	12:31	NO
12:32	AB	BB	...	2	3	...	12:32	NO
12:33	AB	BA	...	3	4	...	12:33	保守開始
12:34	AA	BA	...	4	3	...	12:34	保守終了
...

学習データDB

351

【図 2 8】



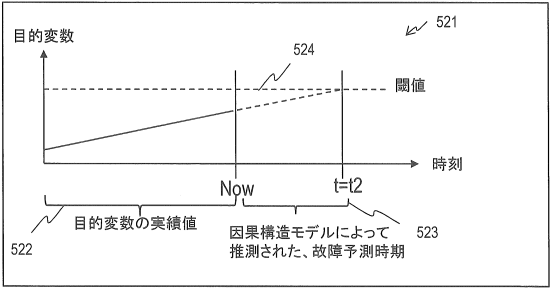
20

30

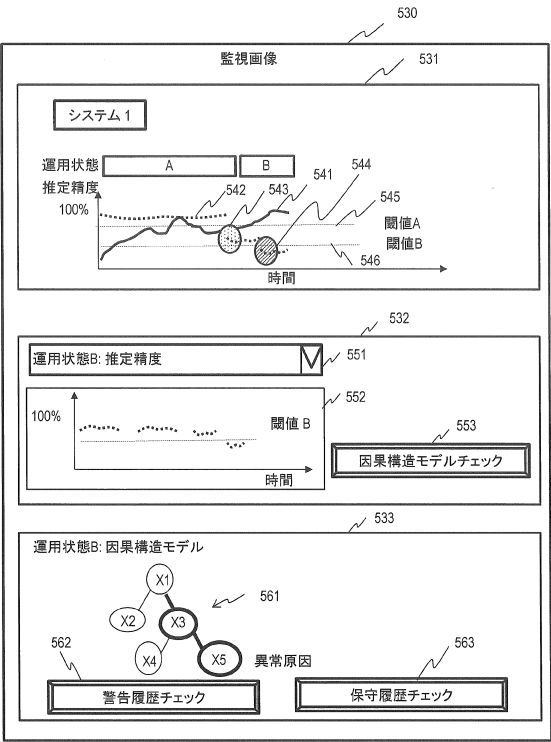
40

50

【図 29】



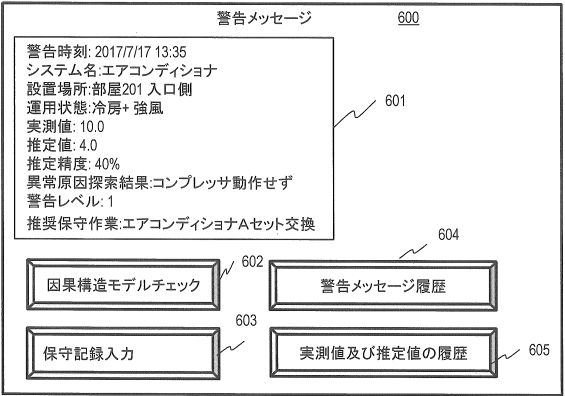
【図 30】



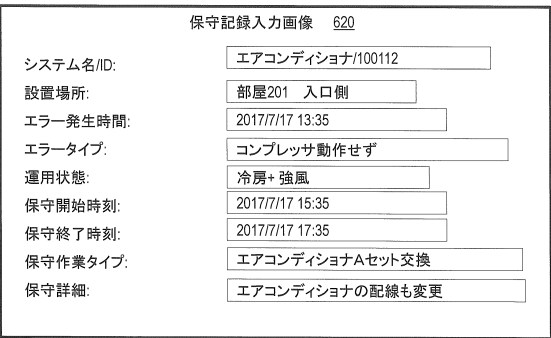
10

20

【図 31】



【図 32】



30

40

50

フロントページの続き

東京都千代田区丸の内一丁目 6 番 6 号 株式会社日立製作所内

審査官 黒田 暁子

(56)参考文献 特表 2 0 1 1 - 5 1 7 8 0 7 (J P , A)

米国特許第 7 1 8 1 3 7 4 (U S , B 1)

特開 2 0 0 9 - 1 1 6 8 4 2 (J P , A)

特開平 1 0 - 2 3 8 9 2 0 (J P , A)

矢野 浩仁, ほか, デジタル活用による鉄道サービスのスマート化「鉄道分野におけるデータモデリング技術」, 日立評論, 日本, 日立評論社, 2018年09月20日, 第100巻, 第5号, P.96-100, 特にp.98左欄第22行-p.100左欄第9行, 図4-7

(58)調査した分野 (Int.Cl., D B 名)

G 0 5 B 2 3 / 0 2