

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6837848号
(P6837848)

(45) 発行日 令和3年3月3日(2021.3.3)

(24) 登録日 令和3年2月15日(2021.2.15)

(51) Int.Cl.

G O 1 M 99/00 (2011.01)
G O 1 H 11/08 (2006.01)

F 1

G O 1 M 99/00
G O 1 H 11/08

Z

請求項の数 7 (全 10 頁)

(21) 出願番号 特願2017-13485 (P2017-13485)
 (22) 出願日 平成29年1月27日 (2017.1.27)
 (65) 公開番号 特開2018-119924 (P2018-119924A)
 (43) 公開日 平成30年8月2日 (2018.8.2)
 審査請求日 令和1年9月19日 (2019.9.19)

(73) 特許権者 000149066
 オークマ株式会社
 愛知県丹羽郡大口町下小口五丁目25番地
 の1
 (74) 代理人 100078721
 弁理士 石田 喜樹
 (74) 代理人 100121142
 弁理士 上田 恒一
 (72) 発明者 上野 浩
 愛知県丹羽郡大口町下小口5丁目25番地
 の1 オークマ株式会社内
 (72) 発明者 安藤 知治
 愛知県丹羽郡大口町下小口5丁目25番地
 の1 オークマ株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】診断装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

被検体の状態を診断する診断装置であって、
 前記被検体の物理的特徴を元に前記被検体に異常が発生した際に生じると予測される特徴量を用いて診断を行う物理モデルベース診断部と、
 前記被検体の正常時及び/または異常時の信号を元に学習した機械学習モデルを用いて診断を行う数理モデルベース診断部と、
 前記物理モデルベース診断部と、前記数理モデルベース診断部とによる診断結果が異なった場合に、前記物理モデルまたは数理モデルの少なくとも一方を更新する必要があると判断するモデル更新要否判定部と、

前記モデル更新要否判定部において更新が必要と判断した際にその旨を通知する更新通知部と、

を備えることを特徴とする診断装置。

【請求項 2】

前記物理モデルベース診断部は、
 前記被検体から状態診断用の情報を取得する診断情報取得手段と、
 前記被検体の物理的特徴を元に、異常発生時に前記診断情報取得手段で取得した診断情報に生じる特徴量を算出する物理モデルを格納する物理モデル格納手段と、を含んでなることを特徴とする請求項1に記載の診断装置。

【請求項 3】

10

20

前記数理モデルベース診断部は、

前記被検体から状態診断用の情報を取得する診断情報取得手段と、

前記被検体の正常時及び／または異常時に前記診断情報取得手段で取得した診断情報を元に機械学習を行って得た数理モデルを格納する数理モデル格納手段と、を含んでなることを特徴とする請求項1に記載の診断装置。

【請求項4】

前記被検体の診断結果が正常、異常どちらの場合にモデルの更新が必要かを設定可能なモデル更新条件設定部を備え、

前記モデル更新要否判定部は、前記被検体の状態の診断結果が前記モデル更新条件設定部に設定された条件と一致したモデルを、更新する必要があると判断することを特徴とする請求項1乃至3の何れかに記載の診断装置。 10

【請求項5】

前記モデル更新要否判定部において更新が必要と判断された際に、前記物理モデル及び／または数理モデルでの診断に必要な情報を格納する診断情報格納部を備えることを特徴とする請求項1乃至4の何れかに記載の診断装置。

【請求項6】

前記機械学習モデルとしてニューラルネットワークを用い、

前記診断情報格納部は、前記物理モデルでの診断に必要な情報を、前記ニューラルネットワークを構成する各ニューロンの出力分布を元に分類して格納することを特徴とする請求項5に記載の診断装置。 20

【請求項7】

前記更新通知部は、前記モデルを更新する必要がある旨を画面に表示するとともに、更新の必要度のレベルも併せて表示することを特徴とする請求項1乃至6の何れかに記載の診断装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、予め組み込まれた診断モデルに基づいて工作機械等の被検体の状態が正常または異常であることを診断する診断装置に関するものである。

【背景技術】 30

【0002】

各種設備を運用する上で設備の状態診断は非常に重要である。設備の異常に気付かず使用を続けた場合、設備の重大な破損や人的被害につながる恐れがあり、異常を早期に検出することが必要となる。

こうした設備の異常診断を目的として、多くの技術が提案されている。例えば特許文献1では、被検体の振動検出信号をフーリエ変換して予め設定するしきい値と比較するとともに、ニューラルネットワークを用いて異常の確信度（正常または異常と考えられる程度）を求め、両者をファジィ演算することで異常判定を行う技術を提案している。

【先行技術文献】

【特許文献】 40

【0003】

【特許文献1】特許第3340541号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

上記技術のように、事前に設定した条件、あるいは事前に学習したモデルを用いて異常判定を行う技術が提案されているが、例えば工作機械においては、ユーザごとに仕様や設置環境、加工対象、使用工具、加工条件など影響因子が非常に膨大となり、出荷前にあらゆるパターンを想定して上記しきい値の設定やニューラルネットワークの学習を行っておくことは現実的に不可能である。そのため、適宜判定手法を更新することが必要となるが 50

、その際、どのようなタイミングでモデルの更新を行うべきか、また高精度なモデルを効率よく構築するにはどうするべきかが非常に重要である。不要なタイミングで更新を行うと計算リソースの過剰消費や学習データのバランス悪化による精度低下につながり、また更新を怠ると新たな異常に対応できなくなってしまう。

さらに、モデル更新のために必要なデータをいかに選別するかも重要で、記憶装置の容量制限の中で診断精度向上に必要な情報を効率よく選別・保持することが必要である。

【0005】

そこで、本発明は、診断モデルを更新する適切なタイミングを装置自身が判断することで、診断性能を常に好適に保ちつつ、モデルの性能を向上させる上で必要な情報を適切に保持する診断装置を提供することを目的とする。

10

【課題を解決するための手段】

【0006】

上記目的を達成するために、請求項1に記載の発明は、被検体の状態を診断する診断装置であって、

被検体の物理的特徴を元に被検体に異常が発生した際に生じると予測される特徴量を用いて診断を行う物理モデルベース診断部と、被検体の正常時及び／または異常時の信号を元に学習した機械学習モデルを用いて診断を行う数理モデルベース診断部と、物理モデルベース診断部と、数理モデルベース診断部とによる診断結果が異なった場合に、物理モデルまたは数理モデルの少なくとも一方を更新する必要があると判断するモデル更新要否判定部と、モデル更新要否判定部において更新が必要と判断した際にその旨を通知する更新通知部と、を備えることを特徴とする。

20

請求項2に記載の発明は、請求項1の構成において、物理モデルベース診断部は、被検体から状態診断用の情報を取得する診断情報取得手段と、被検体の物理的特徴を元に、異常発生時に診断情報取得手段で取得した診断情報に生じる特徴量を算出する物理モデルを格納する物理モデル格納手段と、を含んでなることを特徴とする。

請求項3に記載の発明は、請求項1の構成において、数理モデルベース診断部は、被検体から状態診断用の情報を取得する診断情報取得手段と、被検体の正常時及び／または異常時に診断情報取得手段で取得した診断情報を元に機械学習を行って得た数理モデルを格納する数理モデル格納手段と、を含んでなることを特徴とする。

請求項4に記載の発明は、請求項1乃至3の何れかの構成において、被検体の診断結果が正常、異常どちらの場合にモデルの更新が必要かを設定可能なモデル更新条件設定部を備え、モデル更新要否判定部は、被検体の状態の診断結果がモデル更新条件設定部に設定された条件と一致したモデルを、更新する必要があると判断することを特徴とする。

30

請求項5に記載の発明は、請求項1乃至4の何れかの構成において、モデル更新要否判定部において更新が必要と判断された際に、物理モデル及び／または数理モデルでの診断に必要な情報を格納する診断情報格納部を備えることを特徴とする。

請求項6に記載の発明は、請求項5の構成において、機械学習モデルとしてニューラルネットワークを用い、診断情報格納部は、物理モデルでの診断に必要な情報を、ニューラルネットワークを構成する各ニューロンの出力分布を元に分類して格納することを特徴とする。

40

請求項7に記載の発明は、請求項1乃至6の何れかの構成において、更新通知部は、モデルを更新する必要がある旨を画面に表示するとともに、更新の必要度のレベルも併せて表示することを特徴とする。

【発明の効果】

【0007】

本発明によれば、装置自身が診断モデルの適切な更新タイミングを計ることができ、診断装置内で自動的に再学習を行うことや、メーカーにモデルの更新が必要な旨を通知することなどが可能となり、診断能力を常に好適に保つことができる。

特に、請求項5及び6に記載の発明によれば、上記効果に加えて、診断モデルの更新の際に必要となる情報を効率よく収集・保持することができ、記憶量や通信量の削減が可能

50

になるとともに、診断性能の向上につながる。

また、請求項 7 に記載の発明によれば、上記効果に加えて、モデル更新を推奨する表示を行う際にモデル更新の必要性がどの程度大きいかが併せて通知されるため、実際に更新を行うか否かの検討や更新作業のスケジュール調整に必要な情報を容易に得ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0008】

【図 1】診断装置のブロック構成図である。

【図 2】特徴周波数による診断例を示す波形図で、(a) は正常時、(b) は物理モデルの異常時、(c) は数理モデルの異常時の信号波形をそれぞれ示す。

10

【図 3】診断方法のフローチャートである。

【図 4】モデル更新推奨表示の説明図である。

【図 5】ニューラルネットワーク構造及び各層ユニット群の出力分布を示す説明図である。

【発明を実施するための形態】

【0009】

以下、本発明の実施の形態を図面に基づいて説明する。

図 1 は、本発明の診断装置の一例を示すブロック構成図である。ここでは被検体としての工作機械 1 に対し、診断装置 10 が併設されているが、診断装置 10 は工作機械 1 の制御装置（図示略）に内包されていても構わない。

20

診断装置 10 には、工作機械 1 の制御情報や各種センサ（図示しない）の測定信号を診断情報として取得する診断情報取得手段 11 が設けられている。

また、診断装置 10 には、機械構成要素の諸元値や機械構造などの物理的特徴を元に、異常発生時に診断情報にどのような特徴が表れるかを算出する物理モデルを格納する物理モデル格納手段 12 と、工作機械 1 が正常な状態及び／または異常な状態における診断情報を元に機械学習を行って得た数理モデルを格納する数理モデル格納手段 13 とが備えられている。

【0010】

さらに、診断装置 10 には、物理モデル格納手段 12 に格納した物理モデル及び診断情報取得手段 11 から取得した診断情報に基づいて状態診断を行う物理モデルベース診断手段 14 と、数理モデル格納手段 13 に格納した数理モデル及び診断情報取得手段 11 から取得した診断情報に基づいて状態診断を行う数理モデルベース診断手段 15 と、両手段の診断結果及びモデル更新条件設定手段 16 が保持する更新条件を元に物理モデル及び／または数理モデルの更新要否を判断するモデル更新要否判定手段 17 とが備えられている。

30

【0011】

物理モデルベース診断手段 14 及び数理モデルベース診断手段 15 における判定手法について説明する。

例えば工作機械の送り軸を対象とした異常診断では、想定される異常モードの一つとしてボールねじの支持軸受損傷が挙げられる。例えば軸受に傷がある場合には特定の周波数の振動が増加することが知られており、この周波数（図 2 の「特徴周波数」）は軸受諸元やボールねじの回転速度などから容易に求めることができる。物理モデルベース診断手段 14 では、このような物理的特徴を元に異常有無の判定を行う。この場合、判定ロジックが明確であり、また既知の特徴量に注目して分析するため高精度な検出が可能な反面、技術者が事前に想定した異常モードしか検出できない。

40

一方、数理モデルベース診断手段 15 では、例えばニューラルネットワークなどの機械学習技術を用いてデータから学習してモデルを構築し、異常診断を行う。この方法では、異常時の事例を元に機械自身が特徴を抽出するため、図 2 (c) のような特徴周波数に変化がない、事前に想定していない異常モードでも検出が可能となる。

【0012】

上記特性を利用して、既知の異常モードを高精度に検出可能な物理モデルと、物理モデ

50

ルが対応していない異常でも検出可能な数理モデルとを組み合わせることで、より広範な異常検出が可能となるだけでなく、互いの補完関係を利用して、診断性能の効率的な成長につなげることができる。具体的には、物理モデルが「異常」と診断した事例に高精度に追従できるように数理モデルの学習を進め、また数理モデルが「異常」と診断した事例を収集、蓄積して技術者にフィードバックすることで、より多様な異常を検出可能な物理モデルの構築につなげることができる。

【0013】

上記技術を実現するための手段として、モデル更新要否判定手段17、診断情報格納手段18、表示手段19の動作について下記で説明する。

まず、診断情報格納手段18では、モデル更新要否判定手段17にて「更新要」と判断された場合、その時点における診断情報を格納する。その際、数理モデルの演算過程を示す数理モデル演算情報を数理モデルベース診断手段15から併せて取得し、この数理モデル演算情報をキーとして診断情報を分類して格納しても良い。10

そして、表示手段19では、物理モデルベース診断手段14及び数理モデルベース診断手段15における診断結果、または両者を統合した診断結果を表示するとともに、モデル更新要否判定手段17における更新要否判断結果を表示する。

【0014】

以下、上記診断装置10による状態診断方法の詳細を、図3のフローチャートに基づいて説明する。

まず、S1で、診断情報取得手段11により、状態診断用の情報（診断情報）を工作機械1から取得する。20

診断用の情報としては、工作機械のモータトルク、振動センサで測定される加速度信号、機械の仕様、部品の諸元値などがある。

次に、S2で、物理モデル格納手段12及び数理モデル格納手段13から、物理モデル及び数理モデル診断で使用するモデルデータを取得する。物理モデルでは測定信号から特徴量を算出する計算式などが、数理モデルではニューラルネットワークの構造や重みなどがモデルデータに含まれる。

【0015】

次に、S3にて、物理モデルベース診断手段14において、取得した物理モデル及び上記診断情報を用いて状態診断を実施すると共に、数理モデルベース診断手段15において、取得した数理モデル及び上記診断情報を用いて状態診断を実施する。30

続いて、S4で、両診断手段における物理モデル、数理モデルの診断結果、及びモデル更新条件設定手段16が保持する更新条件に基づき、モデル更新要否判定手段17が診断モデルの更新要否を判定する。この判定方法の詳細については後述する。

【0016】

このS4において「モデル更新不要」と判断された場合、S3での診断結果を表示手段19に表示して診断を終了する。一方、「モデル更新が必要」と判断された場合、モデル更新に必要な情報を分類、蓄積する（S5、S6）。

具体的には、S4において「数理モデル更新が必要」と判断された場合、S3の診断実施において数理モデルに入力された数理モデル診断情報と、物理モデルに入力された物理モデル診断情報を合わせて診断情報格納手段18に格納する（S5）。40

一方、S4において「物理モデル更新が必要」と判断された場合、S3の診断実施において物理モデルに入力された物理モデル診断情報に加え、数理モデルに入力された数理モデル診断情報、及びその入力に対する数理モデル内部の演算情報を合わせて診断情報格納手段18に格納する（S6）。

さらに、S4において「物理モデル更新が必要」または「数理モデル更新が必要」と判断された場合、表示手段19において、モデル更新が必要な旨の表示を行う（S7）。

【0017】

次に、S4におけるモデル更新要否判定の詳細について説明する。

前述のように例えば回転部品に傷がある場合には機械振動の特定周波数にピークが表れ50

るなど、機械構造情報や部品の諸元を用いて、異常時に生じる特徴量を予測することができる。物理モデルはこのような考え方に基づき、異常が生じ得る部品やその異常モードを予め想定し、対応した特徴量を算出、しきい値と比較するなどして異常発生を検出する。他方、機械学習による診断では信号に表れる特徴を機械自身が学習するため、事前に入人が特徴量を求めておく必要は無いが、学習を行うために機械異常時（または正常時）のデータが多数必要となる。

このような関係のため、物理モデルによる診断のみが「異常」と判断した場合、数理モデルにおいて該当する異常モードに対応する学習が不足している可能性がある。反面、数理モデルによる診断のみが「異常」と判断した場合、数理モデルが人にとって未知の特徴量を学習しており、人が気付きにくいレベル、モードの異常を検出している可能性がある。

10

【0018】

そこで、S4において、物理モデルが「異常」、数理モデルが「正常」判定とした場合には数理モデル更新の必要がある旨の判断を、逆の場合は物理モデル更新の必要がある旨の判断を行う。両者の診断が一致した場合はモデル更新の必要はない。

上記の例では「異常」時の特徴を抽出、検出するシステムとして説明したが、「正常」時の特徴を抽出、検出するような場合、上記例とは逆の動作となる。「異常検出モデル」または「正常検出モデル」いずれであるかをモデル更新条件設定手段16に設定しておき、S4における動作を切り替えることができる。

【0019】

20

次に、S7におけるモデル更新推奨通知の詳細を図4に基づいて説明する。前述したように、S4において物理モデル、数理モデルの診断結果が不一致の場合にモデル更新が必要な旨を表示するが、更新の手間、機械のスケジュールなどによっては即座に更新作業を行えない場合があり得る。その際、更新の必要性の大小を併せて表示することで、作業計画を立てる参考にすることができる。例えば図4のようにアイコンを利用し、必要度の高さに応じて塗りつぶしの領域を変化させるなどの工夫をしても良い。例えば正常時は青、異常時は赤、モデル要更新時は黄色など、アイコンの色を変化させることでよりわかりやすく通知することができる。

更新の必要度は、物理モデル及び数理モデルの確信度を用いて、例えば次の式(1)のような形で表すことができる。

30

$$\text{更新必要度} = \min(\text{数理モデル確信度}, \text{物理モデル確信度}) \quad \cdots \text{式(1)}$$

【0020】

あるいは、物理モデルが「異常」判定の場合は数理モデルの確信度を、数理モデルが「異常」判定の場合は物理モデルの確信度を用いる、という形にしても良い。確信度を求める方法として、物理モデルであればしきい値からの乖離度合い、数理モデルであればニューラルネットワーク出力層のユニット出力値などを用いることができる。これらの式の意図するところとして、「確信を持って誤診」した場合ほどモデル更新の必要性が高い、ということを指す。同様の演算意図であれば、本発明は上記の数式に限定されるものではない。

【0021】

40

次に、S6における物理モデル更新に必要な情報の格納について詳細に説明する。

前述したように、数理モデルのみが「異常」と診断した場合、人には気付きにくい異常の特徴を抽出できている可能性がある。そこで、このような事例を集めて分析することで、新たな特徴量や異常形態に対応した物理モデルの構築につなげることができる。しかしながら無闇に大量のデータを集めても分析が間に合わず活用できない恐れがあるが、パターンごとに分類して収集することで、より効率よくモデルの育成を行える。

以下では、ニューラルネットワークを利用した機械学習を例にとって説明する。ニューラルネットワークが「異常」（あるいは「正常」）と判断する過程において、ネットワークを構成する各ニューロンの発火が伝播して最終的な出力値を生成する。従って、図5に示すような各ニューロンの発火パターンと関連付けて診断情報を蓄積することで、同一の

50

異常モードに対応するデータ分類が得られる。この分類ごとにデータを分析することで、より効率よく新たな物理モデルの構築を進めることができる。

【0022】

以上を実現するため、S6において、診断情報に加えて数理モデルの演算情報（例えば上記ニューラルネットワークの発火パターン）を併せて格納することで、効率のよい物理モデル開発に寄与することができる。発火パターンによる分類方法としては、例えば各ユニットの出力分布を波形として捉えたときに相関の高いパターン同士は同一分類にするなど、適宜選択することができる。

【0023】

このように、上記形態の診断装置10によれば、診断情報取得手段11から取得した診断情報及び物理モデル格納手段12から得た物理モデルデータを用いて工作機械1に異常が発生した際に生じると予測される特徴量を算出し、この特徴量を用いて診断を行う物理モデルベース診断手段14と、診断情報取得手段11から取得した工作機械1の正常時及び／または異常時の信号を元に、数理モデル格納手段13から得た数理モデルデータに基づいて学習した機械学習モデルを用いて診断を行う数理モデルベース診断手段15と、物理モデルベース診断手段14と数理モデルベース診断手段15とによる診断結果が異なった場合に、物理モデルまたは数理モデルの少なくとも一方を更新する必要があると判断するモデル更新要否判定手段17と、モデル更新要否判定手段17において更新が必要と判断した際にその旨を通知する表示手段19とを設けたことで、装置自身が診断モデルの適切な更新タイミングを計ることができ、診断装置10内で自動的に再学習を行うことや、メーカーにモデルの更新が必要な旨を通知することなどが可能となり、診断能力を常に好適に保つことができる。

【0024】

特にここでは、モデル更新要否判定手段17において更新が必要と判断された際に、物理モデル及び／または数理モデルでの診断に必要な情報を格納する診断情報格納手段18を備えることで、診断モデルの更新の際に必要となる情報を効率よく収集・保持することができ、記憶量や通信量の削減が可能になるとともに、診断性能の向上につながる。

また、表示手段19は、モデルを更新する必要がある旨を画面に表示するとともに、更新の必要度のレベルも併せて表示するので、実際に更新を行うか否かの検討や更新作業のスケジュール調整に必要な情報を容易に得ることができる。

【0025】

なお、本診断装置の構成は上記形態に限らず、例えばデータ記憶装置の容量に十分な余裕がある場合などでは、S5、S6を共通化し、システムが保持する情報を全て記憶する形態としても良い。

また診断対象は機械状態診断に限らず、加工状態の診断などにも適用が可能である。

さらに、本診断装置の運用において「モデル更新」をエンドユーザに意識させない場合は、更新通知ではなく「モデル不適合」などモデルの不備を示す情報としても良い。

【0026】

そして、上記実施例では物理モデルを技術者が検討、構築するものとしているが、特定の異常モードを高精度に検出することを意図して、物理的な因果関係に注目して異常モードごとに入力信号を限定、または異常モードごとに詳細なラベルを付して学習させたり、あるいは対象とする異常モードに対応する測定データ群に重点を置いた教師データを用いて学習させるなどして得た数理モデルを物理モデル相当の識別器として利用しても同様の効果を得ることができる。この場合、特定の異常モードを高精度に検出することを目的とした物理モデル相当の数理モデルと、広範な異常を検出することを目的とした数理モデルとが互いに補完することで、本発明が意図する効果を発揮することができる。

【符号の説明】

【0027】

1…工作機械、10…診断装置、11…診断情報取得手段（診断情報取得部）、
12…物理モデル格納手段（物理モデルベース診断部）、13…数理モデル格納手段

10

20

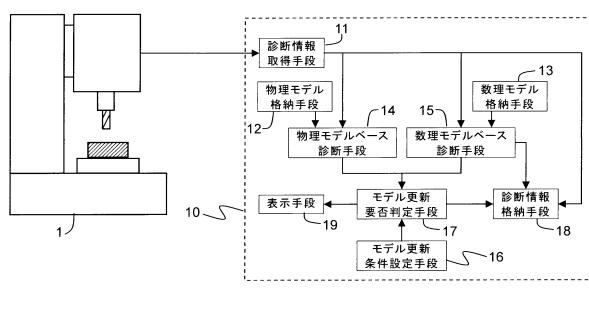
30

40

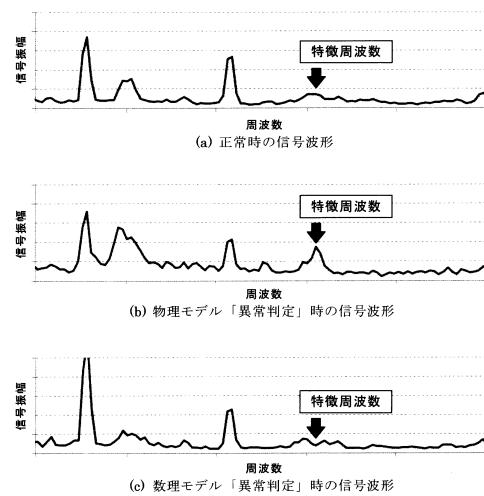
50

(数理モデルベース診断部)、14···物理モデルベース診断手段(物理モデルベース診断部)、15···数理モデルベース診断手段(数理モデルベース診断部)、16···モデル更新条件設定手段(モデル更新条件設定部)、17···モデル更新要否判定手段(モデル更新要否判定部)、18···診断情報格納手段(診断情報格納部)、19···表示手段(更新通知部)。

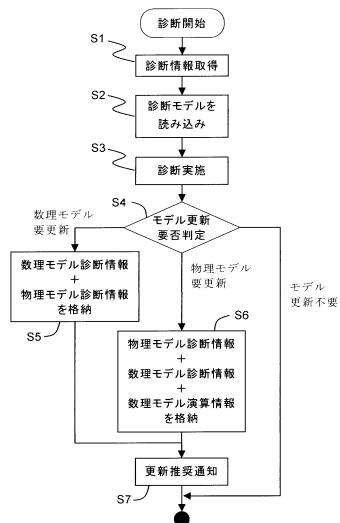
【図1】



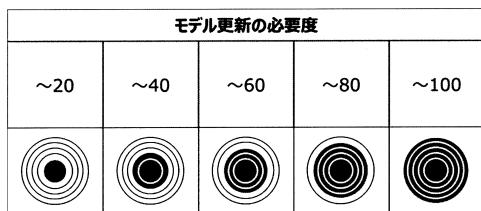
【図2】



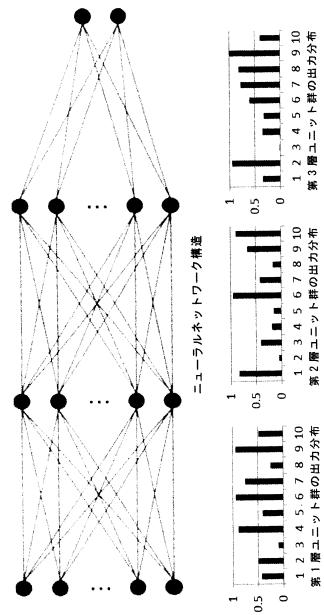
【図3】



【図4】



【図5】



フロントページの続き

(72)発明者 則久 孝志

愛知県丹羽郡大口町下小口5丁目25番地の1 オークマ株式会社内

(72)発明者 北郷 匠

愛知県丹羽郡大口町下小口5丁目25番地の1 オークマ株式会社内

審査官 川瀬 正巳

(56)参考文献 特開平08-202444 (JP, A)

特開2005-121639 (JP, A)

特開2013-218725 (JP, A)

特開2011-253275 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01M 99/00

G01H 11/08

G05B 23/02