

明 細 書

発明の名称：

機械学習装置、摺動面診断装置、推論装置、機械学習方法、機械学習プログラム、摺動面診断方法、摺動面診断プログラム、推論方法、及び、推論プログラム

技術分野

[0001] 本発明は、機械学習装置、摺動面診断装置、推論装置、機械学習方法、機械学習プログラム、摺動面診断方法、摺動面診断プログラム、推論方法、及び、推論プログラムに関する。

背景技術

[0002] 機械設備を構成する多数の機械要素の1つとして、摺動面を有する摺動機械要素が従来から使用されている。摺動機械要素は、固定側摺動部材と回転側摺動部材とを備え、両部材の摺動面が摺動することにより両部材の相対運動を実現する。そのため、摺動面の状態は、摺動機械要素の機能に大きく影響し、機械設備の保全の観点からしても、摺動面の状態を診断し、適切な状態に管理することは極めて重要である。

[0003] 例えば、特許文献1及び特許文献2には、摺動機械要素における摺動面の状態を診断する装置が開示されている。特許文献1には、回転軸とすべり軸受との摺動部分の圧力や温度等の物理量をモニタすることにより、摺動部分の損傷を検出する装置が開示されている。特許文献2には、摺動状態検出手段としての弾性波センサを軸受装置に取り付け、弾性波センサにより検出された振動の変化に応じて、ブッシュと連結ピンとの間の摺動面で潤滑油が不足傾向であることを検出する装置が開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特開2010-180982号公報

特許文献2：特開平10-318261号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0005] 特許文献 1 及び特許文献 2 にそれぞれ開示された装置では、個々の物理量（圧力、温度、及び、振動）に基づいて、摺動面の状態を診断するものである。そのため、摺動面の状態の変化が、上記以外の物理量に表出したり、複数の物理量に複合的に表出したりするような場合には、特許文献 1 及び特許文献 2 にそれぞれ開示された装置では対応できなかった。また、複数の物理量に基づくような複合的な事象に伴う診断では、作業者の経験（暗黙知を含む）に依存した部分や作業者の個人差が大きく、このような診断を自動化する装置の実現が強く要望されている。

[0006] 本発明は、上述した課題に鑑み、作業者の経験に依存することなく、摺動機械要素における摺動面の状態を高精度に診断することを可能とする機械学習装置、摺動面診断装置、推論装置、機械学習方法、機械学習プログラム、摺動面診断方法、摺動面診断プログラム、推論方法、及び、推論プログラ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

[0007] 上記目的を達成するために、本発明の第 1 の態様に係る機械学習装置は、
固定側摺動部材と回転側摺動部材とが摺動する摺動面の状態を診断する摺動面診断装置に用いられる学習モデルを生成する機械学習装置であって、
所定期間において前記回転側摺動部材の駆動源であるモータに供給されるモータ電流値のデータ、前記所定期間における前記固定側摺動部材と前記回転側摺動部材との間の接触電気抵抗のデータ、及び、前記所定期間において前記固定側摺動部材及び前記回転側摺動部材の少なくとも一方に生じる振動のデータを入力データとして少なくとも含む学習用データを 1 又は複数組記憶する学習用データ記憶部と、
前記学習モデルに前記学習用データを 1 又は複数組入力することで、前記入力データと前記摺動面の診断情報との相関関係を前記学習モデルに学習させる機械学習部と、

前記機械学習部により学習させた前記学習モデルを記憶する学習済みモデル記憶部と、を備える。

[0008] 上記目的を達成するために、本発明の第2の態様に係る摺動面診断装置は、

上記機械学習装置により生成された学習モデルを用いて、固定側摺動部材と回転側摺動部材とが摺動する摺動面の状態を診断する摺動面診断装置であって、

所定期間における前記回転側摺動部材の駆動源であるモータに供給されるモータ電流値のデータ、前記所定期間における前記固定側摺動部材と前記回転側摺動部材との間の接触電気抵抗のデータ、及び、前記所定期間における前記固定側摺動部材及び前記回転側摺動部材の少なくとも一方に生じる振動のデータを含む入力データを取得する入力データ取得部と、

前記入力データ取得部により取得された前記入力データを前記学習モデルに入力し、前記摺動面の診断情報を推論する推論部と、を備える。

発明の効果

[0009] 本発明の機械学習装置によれば、モータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、及び、振動のデータから、摺動面の診断情報を高精度に推論（推定）することが可能な学習モデルを提供することができる。また、本発明の摺動面診断装置によれば、作業者の経験に依存することなく、摺動面の状態を高精度に診断することができる。

[0010] 上記以外の課題、構成及び効果は、後述する発明を実施するための形態にて明らかにされる。

図面の簡単な説明

[0011] [図1]第1の実施形態に係る摺動面診断システム2が適用された第1の摺動機械要素1Aの一例を示す概略構成図である。

[図2]第1の実施形態に係る摺動面診断システム2が適用された第2の摺動機械要素1Bの一例を示す概略構成図である。

[図3]機械学習装置4及び摺動面診断装置5を構成するコンピュータ200の

一例を示すハードウェア構成図である。

[図4]第1の実施形態に係る機械学習装置4の一例を示すブロック図である。

[図5]第1の実施形態に係る機械学習装置4で使用されるデータ（教師あり学習）の一例を示すデータ構成図である。

[図6]第1の実施形態に係る機械学習装置4で使用されるニューラルネットワークモデルの一例を示す模式図である。

[図7]第1の実施形態に係る機械学習装置4による機械学習方法の一例を示すフローチャートである。

[図8]第1の実施形態に係る摺動面診断装置5の一例を示すブロック図である。

[図9]第1の実施形態に係る摺動面診断装置5による摺動面診断方法の一例を示すフローチャートである。

[図10]第2の実施形態に係る機械学習装置4で使用されるデータ（教師なし学習）の一例を示すデータ構成図である。

[図11]第2の実施形態に係る機械学習装置4で使用されるオートエンコーダモデルの一例を示す模式図である。

[図12]第2の実施形態に係る機械学習装置4による機械学習方法の一例を示すフローチャートである。

[図13]第2の実施形態に係る摺動面診断装置5による摺動面診断方法の一例を示すフローチャートである。

発明を実施するための形態

[0012] 以下、図面を参照して本発明を実施するための実施形態について説明する。以下では、本発明の目的を達成するための説明に必要な範囲を模式的に示し、本発明の該当部分の説明に必要な範囲を主に説明することとし、説明を省略する箇所については公知技術によるものとする。

[0013] （第1の実施形態）

図1は、第1の実施形態に係る摺動面診断システム2が適用された第1の摺動機械要素1Aの一例を示す概略構成図である。図2は、第1の実施形態

に係る摺動面診断システム２が適用された第２の摺動機械要素１Ｂの一例を示す概略構成図である。

- [0014] 摺動機械要素１Ａ、１Ｂは、摺動面１００、１１０が線接触する第１の摺動機械要素１Ａ（図１参照）と、摺動面１００、１１０が面接触する第２の摺動機械要素１Ｂ（図２参照）とに大別される。
- [0015] 第１及び第２の摺動機械要素１Ａ、１Ｂの各々は、固定側摺動面１００を有する固定側摺動部材１０と、回転側摺動面１１０を有する回転側摺動部材１１とを備える。なお、本明細書では、「摺動面」は、固定側摺動面１００及び回転側摺動面１１０の両方を示す場合だけでなく、これらのいずれか一方を示す場合も含む用語として使用する。
- [0016] 固定側摺動部材１０は、支持部材（不図示）に固定される。回転側摺動部材１１は、回転軸１２に固定され、回転軸１２は、駆動源としてのモータ１３に連結される。回転側摺動部材１１は、モータ制御装置１４からモータ１３に電流が供給されてモータ１３が回転駆動されることにより、回転軸１２と一体となって回転される。このとき、固定側摺動面１００と回転側摺動面１１０とが潤滑剤を介して摺動する。潤滑剤は、任意の物質でよく、例えば、油、水、水溶液等である。
- [0017] 第１の摺動機械要素１Ａは、図１に示すように、線接触の摺動面１００、１１０を有し、例えば、ラジアル荷重を受けるすべり軸受けを構成する。第１の摺動機械要素１Ａにおいて、固定側摺動部材１０及び回転側摺動部材１１は、円環状に形成され、回転軸１２を中心とする同心状に配置される。回転側摺動部材１１は、回転軸１２の外周面を覆うように回転軸１２に固定される。回転側摺動部材１１の外周面が回転側摺動面１１０に相当する。なお、回転側摺動部材１１と回転軸１２とを別部材とせず、回転軸１２自体が、回転側摺動部材１１として機能してもよく、その場合には、回転軸１２の外周面が回転側摺動面１１０に相当する。また、固定側摺動部材１０は、回転側摺動面１１０を覆うように配置される。固定側摺動部材１０の内周面が固定側摺動面１００に相当する。

[0018] 第2の摺動機械要素1Bは、図2に示すように、面接触の摺動面100、110を有し、例えば、スラスト荷重を受けるすべり軸受けやメカニカルシーリングを構成する。第2の摺動機械要素1Bにおいて、固定側摺動部材10及び回転側摺動部材11は、円環状に形成され、回転軸12と同軸状に並べて配置される。固定側摺動部材10の回転側摺動部材11側に位置するドーナツ状の側面が固定側摺動面100に相当する。回転側摺動部材11は、回転軸12の外周面に固定される。回転側摺動部材11の固定側摺動部材10側に位置するドーナツ状の側面が回転側摺動面110に相当する。固定側摺動部材10及び回転側摺動部材11は、付勢部材15により固定側摺動面100及び回転側摺動面110が回転軸12の軸方向に押し付けられるように支持される。なお、付勢部材15は、図2に示すように、回転側摺動部材11側に設けられることに代えて又は加えて、固定側摺動部材10側に設けられてもよい。また、付勢部材15は、図2に示すように、回転側摺動部材11側に設けられることなく、省略されてもよい。

[0019] 上記構成を有する摺動機械要素1A、1Bに対して摺動面100、110の状態を診断する摺動面診断システム2が設けられている。摺動面診断システム2は、測定装置3と、機械学習装置4と、摺動面診断装置5とを備える。

[0020] 測定装置3は、摺動機械要素1A、1Bの各部に設置され、摺動機械要素1A、1Bの各部の物理量や状態量を測定する。測定装置3は、学習フェーズでは、機械学習装置4に接続されて学習用のデータ測定に用いられ、推論フェーズでは、摺動面診断装置5に接続されて診断用のデータ測定に用いられる。測定装置3は、モータ電流センサ30と、接触電気抵抗測定回路31と、アコースティックエミッション（以下、「AE」という）測定回路32と、加速度センサ33とを備える。

[0021] モータ電流センサ30は、例えば、モータ13とモータ制御装置14とを接続する電力線に取り付けられ、モータ制御装置14からモータ13に供給されるモータ電流値を測定する。なお、モータ電流センサ30は、モータ1

3の内部やモータ制御装置14の内部に設けられていてもよい。

[0022] 接触電気抵抗測定回路31は、固定側摺動部材10と回転側摺動部材11とに電氣的にそれぞれ接続されて所定の電圧を印加することで、固定側摺動部材10と回転側摺動部材11との間の接触電気抵抗を測定する。接触電気抵抗の測定値としては、例えば、固定側摺動部材10と回転側摺動部材11との間に十分な潤滑剤が存在しない場合には、接触状態を示す抵抗値（0Ω）が測定される。また、固定側摺動部材10と回転側摺動部材11との間に十分な潤滑剤が存在する場合には、絶縁状態を示す抵抗値（例えば、100kΩオーダー）が測定される。

[0023] AE測定回路32は、固定側摺動部材10に固定されたAEセンサ320と、AEセンサ320に電氣的に接続された信号処理回路321とを備える。AEセンサ320は、固定側摺動部材10に生じるAE波を検出し、AE信号として出力する。信号処理回路321は、例えば、プリアンプ及びディスクリミネータを有し、AEセンサ320により出力されたAE信号を所定のフィルタに通して増幅することで、AE波を測定する。なお、AEセンサ320は、固定側摺動部材10に代えて又は加えて、回転側摺動部材11に固定されてもよい。また、AEセンサ320は、図1、図2の例では、固定側摺動部材10の外周円筒面に取り付けられているが、AEセンサ320の取付位置や取付形態は適宜変更してもよい。AEセンサ320は、例えば、固定側摺動部材10の軸方向端面に取り付けられてもよいし、アダプタやケーシング等の部材を介して固定側摺動部材10に取り付けられてもよい。

[0024] 加速度センサ33は、固定側摺動部材10に固定され、固定側摺動部材10に生じる加速度を測定する。加速度センサ33は、例えば、1軸の加速度を測定するセンサであり、摺動面100、110に直交する方向（矢印D1、D2）の加速度を測定するように、固定側摺動部材10に固定される。第1の摺動機械要素1Aでは、矢印D1（図1参照）が示す方向は、固定側摺動部材10の径方向であり、回転軸12の荷重方向である。第2の摺動機械要素1Bでは、矢印D2（図2参照）が示す方向は、固定側摺動部材10の

軸方向であり、回転側摺動部材 11 と固定側摺動部材 10 とが押し付けられた押し付け方向である。なお、加速度センサ 33 は、固定側摺動部材 10 に代えて又は加えて、回転側摺動部材 11 に固定されてもよい。また、加速度センサ 33 は、図 1、図 2 の例では、固定側摺動部材 10 の外周円筒面に取り付けられているが、加速度センサ 33 の取付位置や取付形態は適宜変更してもよい。加速度センサ 33 は、例えば、固定側摺動部材 10 の軸方向端面に取り付けられてもよいし、アダプタやケーシング等の部材を介して固定側摺動部材 10 に取り付けられてもよい。

[0025] 測定装置 3 は、例えば、所定の測定周期にて各部の物理量や状態量を測定し、測定周期が経過する毎に、その測定時点での測定値を機械学習装置 4 及び摺動面診断装置 5 に出力可能に構成される。なお、測定装置 3 を構成するモータ電流センサ 30、接触電気抵抗測定回路 31、AE 測定回路 32、及び、加速度センサ 33 の各々における測定周期は同一でもよいし、異なるものでもよい。また、測定装置 3 は、上記のように、測定周期が経過する毎に離散的な測定値を出力することに代えて、アナログ信号のように連続的な測定値を出力してもよい。

[0026] 機械学習装置 4 は、学習フェーズの主体として動作し、摺動面 100、110 の状態を診断する際に用いられる学習モデル 6 を機械学習により生成する。機械学習装置 4 は、機械学習の手法として、「教師あり学習」及び「教師なし学習」のいずれも採用することができる。本実施形態では「教師あり学習」を採用し、後述する第 2 の実施形態では、「教師なし学習」を採用する。

[0027] 摺動面診断装置 5 は、推論フェーズの主体として動作し、機械学習装置 4 により生成された学習済みの学習モデル 6 を用いて、測定装置 3 により測定された測定値から摺動面 100、110 の状態を診断する。学習済みの学習モデル 6 は、機械学習装置 4 から任意の通信網や記録媒体等を介して摺動面診断装置 5 に提供される。

[0028] 図 3 は、機械学習装置 4 及び摺動面診断装置 5 を構成するコンピュータ 2

〇〇の一例を示すハードウェア構成図である。

- [0029] 機械学習装置４及び摺動面診断装置５のそれぞれは、汎用又は専用のコンピュータ２００により構成される。コンピュータ２００は、図３に示すように、その主要な構成要素として、バス２１０、プロセッサ２１２、メモリ２１４、入力デバイス２１６、表示デバイス２１８、ストレージ装置２２０、通信Ｉ／Ｆ（インターフェース）部２２２、外部機器Ｉ／Ｆ部２２４、Ｉ／Ｏ（入出力）デバイスＩ／Ｆ部２２６、及び、メディア入出力部２２８を備える。なお、上記の構成要素は、コンピュータ２００が使用される用途に応じて適宜省略されてもよい。
- [0030] プロセッサ２１２は、１つ又は複数の演算処理装置（ＣＰＵ、ＭＰＵ、ＧＰＵ、ＤＳＰ等）で構成され、コンピュータ２００全体を統括する制御部として動作する。メモリ２１４は、各種のデータ及びプログラム２３０を記憶し、例えば、メインメモリとして機能する揮発性メモリ（ＤＲＡＭ、ＳＲＡＭ等）と、不揮発性メモリ（ＲＯＭ、フラッシュメモリ等）とで構成される。
- [0031] 入力デバイス２１６は、例えば、キーボード、マウス、テンキー、電子ペン等で構成される。表示デバイス２１８は、例えば、液晶ディスプレイ、有機ＥＬディスプレイ、電子ペーパー、プロジェクタ等で構成される。入力デバイス２１６及び表示デバイス２１８は、タッチパネルディスプレイのように、一体的に構成されていてもよい。ストレージ装置２２０は、例えば、ＨＤＤ、ＳＳＤ等で構成され、オペレーティングシステムやプログラム２３０の実行に必要な各種のデータを記憶する。
- [0032] 通信Ｉ／Ｆ部２２２は、インターネットやイントラネット等のネットワーク２４０に有線又は無線により接続され、所定の通信規格に従って他のコンピュータとの間でデータの送受信を行う。外部機器Ｉ／Ｆ部２２４は、プリンタ、スキャナ等の外部機器２５０に有線又は無線により接続され、所定の通信規格に従って外部機器２５０との間でデータの送受信を行う。Ｉ／ＯデバイスＩ／Ｆ部２２６は、各種のセンサ、アクチュエータ等のＩ／Ｏデバイ

ス260に接続され、I/Oデバイス260との間で、例えば、センサによる検出信号やアクチュエータへの制御信号等の各種の信号やデータの送受信を行う。メディア入出力部228は、例えば、DVDドライブ、CDドライブ等のドライブ装置で構成され、DVD、CD等のメディア270に対してデータの読み書きを行う。

[0033] 上記構成を有するコンピュータ200において、プロセッサ212は、プログラム230をメモリ214のワークメモリ領域に呼び出して実行し、バス210を介してコンピュータ200の各部を制御する。なお、プログラム230は、メモリ214の代わりに、ストレージ装置220に記憶されていてもよい。プログラム230は、インストール可能なファイル形式又は実行可能なファイル形式でCD、DVD等の非一時的な記録媒体に記録され、メディア入出力部228を介してコンピュータ200に提供されてもよい。プログラム230は、通信I/F部222を介してネットワーク240経由でダウンロードすることによりコンピュータ200に提供されてもよい。

[0034] コンピュータ200は、例えば、据置型コンピュータや携帯型コンピュータで構成され、任意の形態の電子機器である。コンピュータ200は、クライアント型コンピュータでもよいし、サーバ型コンピュータやクラウド型コンピュータでもよい。コンピュータ200は、機械学習装置4及び摺動面診断装置5以外の他の装置に適用されてもよい。

[0035] (機械学習装置4)

図4は、第1の実施形態に係る機械学習装置4の一例を示すブロック図である。図4に示す機械学習装置4では、第1の摺動機械要素1Aを学習モデル6の対象とするが、第2の摺動機械要素1Bを学習モデル6の対象としてもよい。

[0036] 機械学習装置4は、学習用データ取得部40と、学習用データ記憶部41と、機械学習部42と、学習済みモデル記憶部43とを備える。機械学習装置4は、例えば、図3に示すコンピュータ200で構成される。その場合、学習用データ取得部40は、通信I/F部222又はI/OデバイスI/F

部 2 2 6 で構成され、機械学習部 4 2 は、プロセッサ 2 1 2 で構成され、学習用データ記憶部 4 1 及び学習済みモデル記憶部 4 3 は、ストレージ装置 2 2 0 で構成される。

[0037] 学習用データ取得部 4 0 は、各種の外部装置と通信網 2 0 を介して接続され、入力データを少なくとも含む学習用データを取得するインタフェースユニットである。外部装置は、例えば、第 1 の摺動機械要素 1 A に設けられた測定装置 3、第 1 の摺動機械要素 1 A を模擬した試験装置 7 に設けられた測定装置 3、及び、作業者が使用する作業用端末 8 等である。なお、摺動面診断装置 5 が、通信網 2 0 に接続されている場合には、学習用データ取得部 4 0 は、摺動面診断装置 5 の診断対象である第 1 の摺動機械要素 1 A に設けられた測定装置 3 から学習用データを取得するようにしてもよい。

[0038] 試験装置 7 の各部には、測定装置 3 として、モータ電流センサ 3 0、接触電気抵抗測定回路 3 1、A E 測定回路 3 2、及び、加速度センサ 3 3 が設けられる。試験装置 7 が、図 4 に示すように、第 1 の摺動機械要素 1 A を模擬した装置である場合には、例えば、ブロックオンリング型の一方向すべり摩擦試験を実施する装置として構成される。

[0039] 学習用データ記憶部 4 1 は、学習用データ取得部 4 0 で取得した学習用データを 1 又は複数組記憶するデータベースである。なお、学習用データ記憶部 4 1 を構成するデータベースの具体的な構成は適宜設計すればよい。

[0040] 機械学習部 4 2 は、学習用データ記憶部 4 1 に記憶された学習用データを用いて機械学習を実施する。すなわち、機械学習部 4 2 は、学習モデル 6 に学習用データを複数組入力することで、学習用データに含まれる入力データと摺動面 1 0 0、1 1 0 の診断情報との相関関係を学習モデル 6 に学習させることで、学習済みの学習モデル 6 を生成する。本実施形態では、機械学習部 4 2 による教師あり学習の具体的な手法として、ニューラルネットワークを採用する場合について説明する。

[0041] 学習済みモデル記憶部 4 3 は、機械学習部 4 2 により生成された学習済みの学習モデル 6 を記憶するデータベースである。学習済みモデル記憶部 4 3

に記憶された学習済みの学習モデル6は、任意の通信網や記録媒体等を介して実システム（例えば、摺動面診断装置5）に提供される。なお、図4では、学習用データ記憶部41と、学習済みモデル記憶部43とが別々の記憶部として示されているが、これらは単一の記憶部で構成されてもよい。

[0042] 図5は、第1の実施形態に係る機械学習装置4で使用されるデータ（教師あり学習）の一例を示すデータ構成図である。

[0043] 学習用データは、入力データとして、所定期間においてモータ13に供給されるモータ電流値のデータ、所定期間における固定側摺動部材10と回転側摺動部材11との間の接触電気抵抗のデータ、及び、所定期間において固定側摺動部材10及び回転側摺動部材11の少なくとも一方に生じる振動のデータを少なくとも含む。入力データとしてのモータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、及び、振動のデータの各々における所定期間は、同一の期間に設定することを基本とするが、各データ間に時間差が生じる関係が認められる場合には、当該時間差に対応する期間に設定してもよい。なお、入力データは、モータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、及び、振動のデータ以外に他のデータをさらに含むものでもよく、例えば、固定側摺動部材10と回転側摺動部材11とが摺動するときに生じる音、固定側摺動部材10及び回転側摺動部材11の少なくとも一方の温度、固定側摺動部材10と回転側摺動部材11との間の潤滑圧力、潤滑剤の流量、潤滑剤の温度、及び、潤滑剤の性状値（色、粒径分布）のデータのうち少なくとも1つのデータをさらに含むものでもよい。

[0044] 所定期間におけるモータ電流値のデータは、所定期間内の複数の測定時点においてモータ電流センサ30により測定された複数の測定値（モータ電流値）で構成される。モータ電流値のデータは、例えば、測定時点を示す測定時刻と紐付けられて、測定時刻で時系列順に並べた配列のデータとして構成される。なお、モータ電流センサ30が、連続的な測定値を出力するような場合には、学習用データ取得部40が、所定のサンプリング周期にて測定値をデータ化する。これにより、所定期間におけるモータ電流値のデータは、

所定期間内の複数のサンプリング時点における複数の測定値（モータ電流値）で構成される。

[0045] 所定期間における接触電気抵抗のデータは、所定期間内の複数の測定時点において接触電気抵抗測定回路 3 1 により測定された複数の測定値（接触電気抵抗）で構成される。接触電気抵抗のデータは、例えば、測定時点を示す測定時刻と紐付けられて、測定時刻で時系列順に並べた配列のデータとして構成される。なお、接触電気抵抗測定回路 3 1 が、連続的な測定値を出力するような場合には、学習用データ取得部 4 0 が、所定のサンプリング周期にて測定値をデータ化する。これにより、所定期間における接触電気抵抗のデータは、所定期間内の複数のサンプリング時点における複数の測定値（接触電気抵抗）で構成される。

[0046] 所定期間における振動のデータは、所定期間における A E 波のデータ、及び、所定期間における摺動面 1 0 0、1 1 0 に直交する方向に生じる加速度のデータの少なくとも 1 つである。本実施形態では、振動のデータは、A E 波のデータ及び加速度のデータからなるものとして説明する。なお、振動のデータは、固定側摺動部材 1 0 及び回転側摺動部材 1 1 の少なくとも一方に生じる振動を表すものであれば、A E 波のデータ及び加速度のデータ以外のデータを用いてもよい。

[0047] 所定期間における A E 波のデータは、所定期間内の複数の測定時点において A E 測定回路 3 2 により測定された複数の測定値（A E 波）で構成される。A E 波のデータは、例えば、測定時点を示す測定時刻と紐付けられて、測定時刻で時系列順に並べた配列のデータとして構成される。なお、A E 測定回路 3 2 が、連続的な測定値を出力するような場合には、学習用データ取得部 4 0 が、所定のサンプリング周期にて測定値をデータ化する。これにより、所定期間における A E 波のデータは、所定期間内の複数のサンプリング時点における複数の測定値（A E 波）で構成される。

[0048] 所定期間における加速度のデータは、所定期間内の複数の測定時点において加速度センサ 3 3 により測定された複数の測定値（加速度）で構成される。

。加速度のデータは、例えば、測定時点を示す測定時刻と紐付けられて、測定時刻で時系列順に並べた配列のデータとして構成される。なお、加速度センサ33が、連続的な測定値を出力するような場合には、学習用データ取得部40が、所定のサンプリング周期にて測定値をデータ化する。これにより、所定期間における加速度のデータは、所定期間内の複数のサンプリング時点における複数の測定値（加速度）で構成される。

[0049] 機械学習として「教師あり学習」を採用する場合、学習用データは、入力データに対応付けられた出力データとして、所定期間における摺動面100、110の状態が複数の状態のうちのいずれかであることを表す診断情報をさらに含む。出力データは、教師あり学習において、例えば、教師データや正解ラベルと称される。

[0050] 診断情報は、摺動面100、110の摩耗に関する診断情報、摺動面100、110の焼付きに関する診断情報、及び、潤滑剤の汚損に関する診断情報、の少なくとも1つである。

[0051] 摺動面100、110の状態として、異常の有無を診断する場合には、診断情報は、摺動面100、110の状態が正常及び異常のいずれかであることを表す情報として構成される。この場合、診断情報は、2値に分類され、例えば、摺動面100、110が正常な状態であることを示す値を「0」とし、摺動面100、110が異常な状態であることを示す値を「1」として定義される。本実施形態では、診断情報は、正常及び異常のいずれかであることを表すものとして説明する。

[0052] したがって、本実施形態に係る学習用データは、図5に示すように、モータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、AE波のデータ、及び、加速度のデータを含む入力データと、正常及び異常のいずれかであることを表す診断情報を含む出力データとが対応付けられて構成される。ここでの異常は、診断時点において異常の発生が判明したような事後的な異常だけでなく、診断時点では正常と判断される許容範囲ではあるが、将来的な異常の発生が予想されたような異常の兆候も含むものでもよい。

- [0053] なお、診断情報のうち異常を表す情報は、図5に示す異常1／異常2／…／異常nに対応するように、例えば、異常の具体的な内容や度合いに応じた複数の異常を含んでいてもよい。
- [0054] 異常の具体的な内容としては、例えば、摩耗に関する異常、焼付きに関する異常、又は、潤滑剤の汚損に関する異常が含まれる。この場合、診断情報は、多値（3以上の整数）に分類され、例えば、摺動面100、110が正常な状態であることを示す値を「0」とし、摩耗に関する異常であることを示す値を「1」とし、焼付きに関する異常であることを示す値を「2」とし、以下同様に各異常の内容に合わせた値として定義される。
- [0055] 異常の具体的な度合いとしては、例えば、摩耗に関する異常であれば、摩耗の度合いを複数のレベルで分類したものが含まれる。この場合、診断情報は、多値（3以上の整数）に分類され、例えば、摺動面100、110が正常な状態であることを示す値を「0」とし、摩耗の度合いが低レベルの異常であることを示す値を「1」とし、摩耗の度合いが中レベルの異常であることを示す値を「2」とし、以下同様に各異常の度合いに合わせた値として定義される。
- [0056] ここで、学習用データに含まれる入力データ（所定期間における、モータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、AE波のデータ及び加速度のデータ）と、摺動面100、110の診断情報との間の相関関係について説明する。
- [0057] モータ電流値は、モータ13を所定の回転速度で回転駆動させるときにモータ制御回路14からモータ13に供給されるため、摺動面100、110の状態に応じて変化する。例えば、摺動面100、110の摩擦係数が高い状態では、モータ電流値は上昇する。そのため、モータ電流値のデータは、摺動面100、110の摩擦抵抗を間接的に表しており、摺動面100、110の摩擦抵抗を監視するために主に使用される。接触電気抵抗は、固定側摺動部材10と回転側摺動部材11との間が絶縁状態か接触状態かで連続的に変化する。そのため、接触電気抵抗のデータは、摺動面100、110に

おける潤滑剤の潤滑状態を監視するために主に使用される。

[0058] また、潤滑剤に異物が混入したり、摺動面 100、110 の摩耗による摩耗粉が増加したりしたような潤滑剤の汚損が発生した場合には、摺動面 100、110 にて突発的な振動が発生し、加速度や A E 波の変化として計測される。また、焼付きにより摺動面 100、110 の損傷が発生したような場合には、A E 波として計測される。そのため、加速度のデータ及び A E 波のデータは、摺動面 100、110 における潤滑剤の汚損状態や、摺動面 100、110 の焼付き状態を監視するために主に使用される。

[0059] モータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、A E 波のデータ及び加速度のデータについて、個々のデータの主な監視用途としては上記のとおりであるが、摺動面 100、110 の状態は、摺動面 100、110 の使用環境、使用条件、メンテナンス状況等の様々な影響を受けて複雑に変化する。このように複雑に変化する摺動面 100、110 の状態を適切に診断するためには、個々のデータを個別に監視するだけでは難しく、従来は作業者の経験に依存する部分が大きかった。そこで、学習用データが、入力データとして、所定期間における、モータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、A E 波のデータ及び加速度のデータを含む構成とすることで、摺動面 100、110 の状態が上記のように様々な影響を受けて複雑に変化する場合であっても摺動面 100、110 の状態を高精度に診断することが可能となる。

[0060] 学習用データ取得部 40 は、上記の学習用データを取得する場合、第 1 の摺動機械要素 1 A 又は試験装置 7 に設けられた測定装置 3 にて測定された所定期間におけるモータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、A E 波のデータ、及び、加速度のデータを入力データとして、測定装置 3 から取得する。また、作業者が、測定装置 3 にて入力データが測定された所定期間における摺動面 100、110 の状態を診断し、その診断した診断結果（例えば、正常又は異常）を作業者用端末 8 に入力すると、学習用データ取得部 40 は、作業者用端末 8 にて入力された診断結果に基づく診断情報を出力データ（教師データ）として、作業者用端末 8 から取得する。そして、学習用データ

取得部40は、これらの入力データと出力データとを対応付けられることでの学習用データを構成し、学習用データ記憶部41に記憶する。

[0061] 図6は、第1の実施形態に係る機械学習装置4で使用されるニューラルネットワークモデルの一例を示す模式図である。

[0062] 学習モデル6は、図6に示すニューラルネットワークモデルとして構成される。ニューラルネットワークモデルは、入力層にある1個のニューロン ($x_1 \sim x_l$)、第1中間層にある m 個のニューロン ($y_{11} \sim y_{1m}$)、第2中間層にある n 個のニューロン ($y_{21} \sim y_{2n}$)、及び、出力層にある o 個のニューロン ($z_1 \sim z_o$) から構成される。

[0063] 入力層の各ニューロンには、学習用データに含まれる入力データのそれぞれが対応付けられる。出力層の各ニューロンには、学習用データに含まれる出力データのそれぞれが対応付けられる。なお、入力層に入力する前の入力データに対して所定の前処理を施しもよいし、出力層から出力された後の出力データに対して所定の後処理を施しもてもよい。

[0064] 第1中間層及び第2中間層は、隠れ層とも呼ばれており、ニューラルネットワークとしては、第1中間層及び第2中間層の他に、さらに複数の隠れ層を有するものでもよいし、第1中間層のみを隠れ層とするものでもよい。また、入力層と第1中間層との間、第1中間層と第2中間層との間、第2中間層と出力層との間には、各層のニューロンの間を接続するシナプスが張られており、それぞれのシナプスには、重み w_i (i は自然数)が対応付けられる。

[0065] ニューラルネットワークモデルは、学習用データを用いて、当該学習用データに含まれる入力データを入力層に入力し、その推論結果として出力層から出力された出力データと、当該学習用データに含まれる出力データ（教師データ）とを比較することで、入力データと出力データとの相関関係を学習する。

[0066] 具体的には、入力層の各ニューロンには、学習用データに含まれる入力データのそれぞれが入力される。そして、出力層の各ニューロンの値は、当該

ニューロンに接続される入力側のニューロンの値と、出力側のニューロンと入力側のニューロンとを接続するシナプスに対応付けられた重み w_i との乗算値の数列の和として算出する処理を、入力層以外の全てのニューロンに対して行うことで算出される。

[0067] そして、推論結果として出力層の各ニューロンに出力された値($z_1 \sim z_o$)と、学習用データに含まれる出力データのそれぞれに対応する教師データの値($t_1 \sim t_o$)とをそれぞれ比較して誤差を求め、その誤差が小さくなるように、各シナプスに対応付けられた重み w_i を調整する処理(バックプロパゲーション)が実施される。

[0068] 上記の一連の工程を所定回数反復実施すること、又は、上記の誤差が許容値より小さくなること等の所定の学習終了条件が満たされた場合には、機械学習を終了し、学習済みのニューラルネットワークモデル(シナプスのそれぞれに対応付けられた全ての重み w_i)として生成される。

[0069] (機械学習方法)

図7は、第1の実施形態に係る機械学習装置4による機械学習方法の一例を示すフローチャートである。なお、機械学習方法は、図5の学習フェーズに該当する。

[0070] まず、ステップS100において、学習用データ取得部40は、機械学習を開始するための事前準備として、所望の数の学習用データを準備し、その準備した学習用データを学習用データ記憶部41に記憶する。ここで準備する学習用データの数については、最終的に得られる学習モデル6に求められる推論精度を考慮して設定すればよい。

[0071] 学習用データを準備する方法には、いくつかの方法を採用することができる。例えば、特定の第1の摺動機械要素1Aや試験装置7における摺動面100、110に異常が発生した場合、又は、作業者が異常の兆候を認識した場合において、その前後の期間における各種の測定値を測定装置3を用いて取得するとともに、作業者が作業用端末8を用いて、これらの測定値に対応付ける形で診断結果を入力することで、学習データを構成する入力データ

と出力データ（例えば、この場合の出力データの値は「1」）とを準備する。そして、このような作業を繰り返すことで学習用データを複数組準備することが可能である。また、他の方法として、例えば、第1の摺動機械要素1 Aや試験装置7の摺動面100、110に異常な状態を意図的に発生させることで学習用データを取得することも可能である。さらに、学習用データとしては、異常が発生した場合だけでなく、異常が発生していないとき、すなわち、第1の摺動機械要素1 Aや試験装置7の摺動面100、110が正常な状態であるときの入力データ及び出力データ（例えば、この場合の出力データの値は「0」）で構成された学習用データを複数組準備する。

[0072] 次に、ステップS110において、機械学習部42は、機械学習を開始すべく、学習前の学習モデル6を準備する。ここで準備する学習前の学習モデル6は、図6に例示したニューラルネットワークモデルで構成されており、各シナプスの重みが初期値に設定されている。入力層の各ニューロンには、学習用データに含まれる入力データとしてのモータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、AE波のデータ、及び、加速度のデータのそれぞれが対応付けられる。出力層の各ニューロンには、学習用データに含まれる出力データとしての診断情報のそれぞれが対応付けられる。

[0073] 次に、ステップS120において、機械学習部42は、学習用データ記憶部41に記憶された複数組の学習用データから、例えば、ランダムに一の学習用データを取得する。

[0074] 次に、ステップS130において、機械学習部42は、一の学習用データに含まれる入力データを、準備された学習前（又は学習中）の学習モデル6の入力層に入力する。その結果、学習モデル6の出力層から推論結果として出力データが出力されるが、当該出力データは、学習前（又は学習中）の学習モデル6によって生成されたものである。そのため、学習前（又は学習中）の状態では、推論結果として出力された出力データは、学習用データに含まれる出力データ（教師データ）とは異なる情報を示す。

[0075] 次に、ステップS140において、機械学習部42は、ステップS120

において取得された一の学習用データに含まれる出力データ（教師データ）と、ステップS 1 3 0において出力層から推論結果として出力された出力データとを比較し、各シナプスの重みを調整することで、機械学習を実施する。これにより、機械学習部4 2は、入力データと出力データ（摺動面1 0 0、1 1 0の診断情報）との相関関係を学習モデル6に学習させる。

[0076] 例えば、教師データを構成する診断情報が、正常の状態を「0」で示し、異常の状態を「1」で示す2値分類として定義された場合において、ステップS 1 2 0で選択された一の学習用データセットに含まれる出力データの値が「1」であるが、出力層から出力された出力データの値は、0～1の所定の値、具体的に、例えば「0. 6 3」といった値が出力されたものとする。この場合、ステップS 1 4 0では、仮に同様の入力データが学習中の学習モデル6の入力層に入力された場合に出力層から出力される値が「1」に近づくように、当該学習中の学習モデル6の各シナプスに対応付けられた重みを調整する。

[0077] 次に、ステップS 1 5 0において、機械学習部4 2は、機械学習を継続する必要があるか否かを、例えば、出力データと教師データとの誤差や、学習用データ記憶部4 1内に記憶された未学習の学習用データの残数に基づいて判定する。

[0078] ステップS 1 5 0において、機械学習部4 2が機械学習を継続すると判定した場合（ステップS 1 5 0でNo）、ステップS 1 2 0に戻り、学習中の学習モデル6に対してステップS 1 2 0～S 1 4 0の工程を未学習の学習用データを用いて複数回実施する。一方、ステップS 1 5 0において、機械学習部4 2が機械学習を終了すると判定した場合（ステップS 1 5 0でYes）、ステップS 1 6 0に進む。

[0079] そして、ステップS 1 6 0において、機械学習部4 2は、各シナプスに対応付けられた重みが調整されることで生成された学習済みの学習モデル6を学習済みモデル記憶部4 3に記憶し、図7に示す一連の機械学習方法を終了する。機械学習方法において、ステップS 1 0 0が学習用データ記憶工程、

ステップS 1 1 0～S 1 5 0が機械学習工程、ステップS 1 6 0が学習済みモデル記憶工程に相当する。

[0080] 以上のように、本実施形態に係る機械学習装置4及び機械学習方法によれば、モータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、及び、振動（本実施形態では、A E波及び加速度）のデータから、摺動面1 0 0、1 1 0の診断情報を高精度に推論（推定）することが可能な学習モデル6を提供することができる。

[0081] （摺動面診断装置5）

図8は、第1の実施形態に係る摺動面診断装置5の一例を示すブロック図である。図8に示す摺動面診断装置5では、第1の摺動機械要素1 Aを学習モデル6の対象とするが、第2の摺動機械要素1 Bを学習モデル6の対象としてもよい。

[0082] 摺動面診断装置5は、入力データ取得部5 0と、推論部5 1と、学習済みモデル記憶部5 2と、出力処理部5 3とを備える。摺動面診断装置5は、例えば、図3に示すコンピュータ2 0 0で構成される。その場合、入力データ取得部5 0は、通信I / F部2 2 2又はI / OデバイスI / F部2 2 6で構成され、推論部5 1及び出力処理部5 3は、プロセッサ2 1 2で構成され、学習済みモデル記憶部5 2は、ストレージ装置2 2 0で構成される。なお、摺動面診断装置5は、モータ制御装置1 4に組み込まれていてもよいし、モータ制御装置1 4の上位の管理装置（例えば、機械設備のコントローラ、複数の機械設備を管理する設備管理システム等）に組み込まれていてもよい。

[0083] 入力データ取得部5 0は、第1の摺動機械要素1 Aに設けられた測定装置3（モータ電流センサ3 0、接触電気抵抗測定回路3 1、A E測定回路3 2、及び、加速度センサ3 3）に接続され、測定装置3により測定された測定値に基づく入力データ（所定期間における、モータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、A E波のデータ、及び、加速度のデータ）を取得するインタフェースユニットである。

[0084] 推論部5 1は、入力データ取得部5 0により取得された入力データを学習

モデル6に入力し、摺動面100、110の診断情報を推論する推論処理を行う。推論処理には、機械学習装置4及び機械学習方法にて教師あり学習が実施された学習済みの学習モデル6が用いられる。

[0085] 推論部51は、学習モデル6を用いた推論処理を行う機能のみならず、推論処理の前処理として、入力データ取得部50により取得された入力データを所望の形式等に調整して学習モデル6に入力する前処理機能や、推論処理の後処理として、学習モデル6から出力された出力データの値に所定の論理式や計算式を適用することで、摺動面100、110の状態を最終的に判断する後処理機能をも含んでいる。なお、推論部51の推論結果は、学習済みモデル記憶部52や他の記憶装置（不図示）に記憶することが好ましく、過去の推論結果は、例えば、学習モデル6の推論精度の更なる向上のため、オンライン学習や再学習に用いられる学習用データとして利用することが可能である。

[0086] 学習済みモデル記憶部52は、推論部51の推論処理にて用いられる学習済みの学習モデル6を記憶するデータベースである。なお、学習済みモデル記憶部52に記憶される学習モデル6の数は1つに限定されない。例えば、入力データの数が異なる、又は、機械学習の手法が異なる複数の学習モデル6が記憶され、選択的に利用可能としてもよい。

[0087] 出力処理部53は、推論部51の推論結果、すなわち、摺動面100、110の診断情報を出力する出力処理を行う。具体的な出力手段は、種々の手段を採用することが可能である。出力処理部53は、例えば、診断情報を、表示や音で作業者に報知したり、第1の摺動機械要素1Aの診断履歴として、例えば、モータ制御装置14又はモータ制御装置14の上位の管理装置（不図示）に送信し、モータ制御装置14やモータ制御装置14の管理装置の記憶部に記憶したり、モータ13の駆動制御に利用してもよい。

[0088] （摺動面診断方法）

図9は、第1の実施形態に係る摺動面診断装置5による摺動面診断方法の一例を示すフローチャートである。図9では、摺動面100、110の診断

情報が、正常「0」及び異常「1」のいずれかを表す2値分類として定義されたものとして説明する。なお、摺動面診断方法は、図5の推論フェーズに該当する。

- [0089] モータ制御装置14からモータ13に電流が供給されてモータ13が回転駆動されることにより、第1の摺動機械要素1Aの回転側摺動部材11は回転された状態となる。このとき、図9に示す一連の摺動面診断方法が、摺動面診断装置5にて所定の診断タイミングにて実行される。診断タイミングは、例えば、所定の時間間隔毎でもよいし、所定の事象発生時（作業者の操作指示時、メンテナンス動作時等）でもよい。
- [0090] まず、ステップS200において、入力データ取得部50が、測定装置3（モータ電流センサ30、接触電気抵抗測定回路31、AE測定回路32、及び、加速度センサ33）により測定された測定値に基づく入力データ（所定期間における、モータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、AE波のデータ、及び、加速度のデータ）を取得する。このとき、入力データは、所定期間と同一期間又は所定期間よりも長期間において測定装置3にて測定された測定値を含むことが要求される。
- [0091] 次に、ステップS210において、推論部51は、入力データに前処理を施して学習モデル6の入力層に入力し、その学習モデル6の出力層から出力された出力データを取得する。
- [0092] 次に、ステップS220において、推論部51は、教師あり学習の後処理の一例として、出力データの値（0と1の間の数）と、所定の閾値とを比較し、例えば、出力データの値が、所定の閾値未満であれば、診断情報は「正常」であると判断し、所定の閾値以上であれば、診断情報は「異常」とであると判断することで、その判断結果を推論結果として出力する。
- [0093] 次に、ステップS230において、出力処理部53は、推論部51の推論結果である摺動面100、110の診断情報が「正常」及び「異常」のいずれを表すかを判定し、「正常」と判定した場合には、ステップS240に進み、「異常」と判定した場合には、ステップS250に進む。

[0094] そして、ステップS 2 4 0において、出力処理部5 3は、「正常」を表す情報を出力する。なお、ステップS 2 4 0は省略されてもよい。

[0095] また、ステップS 2 5 0において、出力処理部5 3は、「異常」を表す情報を出力し、

図9に示す一連の摺動面診断方法を終了する。摺動面診断方法において、ステップS 2 0 0が入力データ取得工程、ステップS 2 1 0～S 2 2 0が推論工程、ステップS 2 3 0～S 2 5 0が出力処理工程に相当する。

[0096] 以上のように、本実施形態に係る摺動面診断装置5及び摺動面診断方法によれば、作業者の経験に依存することなく、摺動面1 0 0、1 1 0の状態を高精度に診断することができる。

[0097] (第2の実施形態)

第1の実施形態では、機械学習の手法として、「教師あり学習」を採用した場合について説明したが、本実施形態では、「教師なし学習」を採用した場合について説明する。なお、第2の実施形態に係る摺動機械要素1 A、1 B並びに摺動面診断システム2を構成する測定装置3、機械学習装置4及び摺動面診断装置5の基本的な構成や動作は、第1の実施形態と同様であるため、以下では第1の実施形態との相違点を中心に説明する。

[0098] (機械学習装置4)

機械学習装置4は、第1の実施形態(図4参照)と同様に、学習用データ取得部4 0と、学習用データ記憶部4 1と、機械学習部4 2と、学習済みモデル記憶部4 3とを備える。

[0099] 図1 0は、第2の実施形態に係る機械学習装置4で使用されるデータ(教師なし学習)の一例を示すデータ構成図である。

[0100] 機械学習として「教師なし学習」を採用する場合、学習データは、診断情報が所定期間における摺動面1 0 0、1 1 0の状態が所定の状態であることを表すときの入力データのみを含む。すなわち、学習データは、出力データを含まない構成としてもよく、機械学習装置4が採用する機械学習の手法に応じて出力データの有無や出力データの形式を適宜選択することができる。

- [0101] 摺動面 100、110の状態として、異常の有無を診断する場合には、診断情報は、摺動面 100、110の状態が正常及び異常のいずれかであることを表す情報として構成される。この場合に、本実施形態に係る学習用データは、図 10 に示すように、摺動面 100、110の状態が正常であるときの所定期間におけるモータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、AE 波のデータ、及び、加速度のデータを含む入力データのみで構成される。
- [0102] 学習用データ取得部 40 は、上記の学習用データを取得する場合、摺動機械要素 1A、1B 又は試験装置 7 に設けられた測定装置 3 にて測定された所定期間におけるモータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、AE 波のデータ、及び、加速度のデータを入力データとして、測定装置 3 から取得する。そして、作業者が、測定装置 3 にて入力データが測定された所定期間における摺動面 100、110の状態を診断し、その診断した診断結果が正常であることを作業者用端末 8 に入力すると、学習用データ取得部 40 は、その入力データのみで一の学習用データを構成し、学習用データ記憶部 41 に記憶する。
- [0103] 機械学習部 42 は、学習モデル 6 に学習用データを一又は複数組入力することで、学習用データに含まれる入力データと摺動面 100、110の状態が正常であることを表す診断情報との相関関係を学習モデル 6 に学習させることで、学習済みの学習モデル 6 を生成する。本実施形態では、機械学習部 42 による教師なし学習の具体的な手法として、オートエンコーダを採用する場合について説明する。
- [0104] 図 11 は、第 2 の実施形態に係る機械学習装置 4 で使用されるオートエンコーダモデルの一例を示す模式図である。
- [0105] 学習モデル 6 は、図 10 に示すオートエンコーダモデルとして構成される。オートエンコーダモデルは、入力層にある l 個のニューロン ($x_1 \sim x_l$)、中間層にある m 個のニューロン ($y_1 \sim y_m$)、及び、出力層にある o 個のニューロン ($z_1 \sim z_o$) から構成される。入力層と出力層のニューロンの個数は同じであり、中間層のニューロンの個数よりも多い。

[0106] 入力層の各ニューロンには、学習用データに含まれる入力データのそれぞれが対応付けられる。中間層は、隠れ層とも呼ばれており、複数の隠れ層を有するものでもよい。また、入力層と中間層との間、中間層と出力層との間には、各層のニューロンの間を接続するシナプスが張られており、それぞれのシナプスには、重み w_i （ i は自然数）が対応付けられる。

[0107] オートエンコーダモデルは、学習用データを用いて、当該学習用データに含まれる入力データを入力層に入力し、その推論結果として出力層から出力された出力データと、当該学習用データに含まれる入力データとを比較し、重み w_i を調整する処理を実施することで、入力データが有するパターンや傾向を学習する。

[0108] 上記の一連の工程を所定回数反復実施すること、又は、上記の誤差が許容値より小さくなること等の所定の学習終了条件が満たされた場合には、機械学習を終了し、学習済みのオートエンコーダモデル（シナプスのそれぞれに対応付けられた全ての重み w_i ）として生成される。

[0109] （機械学習方法）

図12は、第2の実施形態に係る機械学習装置4による機械学習方法の一例を示すフローチャートである。

[0110] まず、ステップS300において、学習用データ取得部40は、機械学習を開始するための事前準備として、所望の数の学習用データを準備し、その準備した学習用データを学習用データ記憶部41に記憶する。

[0111] 学習用データを準備する方法には、いくつかの方法を採用することができる。例えば、特定の摺動機械要素1A、1Bや試験装置7における摺動面100、110が正常な状態である場合の所定期間における各種の測定値を測定装置3を用いて取得することで、学習データを構成する入力データを準備する。そして、このような作業を繰り返すことで学習用データを複数組準備することが可能である。

[0112] 次に、ステップS310において、機械学習部42は、機械学習を開始すべく、学習前の学習モデル6を準備する。ここで準備する学習前の学習モデ

ル6は、図11に例示したオートエンコーダモデルで構成されており、各シナプスの重みが初期値に設定されている。入力層の各ニューロンには、学習用データに含まれる入力データとしてのモータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、AE波のデータ、及び、加速度のデータのそれぞれが対応付けられる。

[0113] 次に、ステップS320において、機械学習部42は、学習用データ記憶部41に記憶された複数組の学習用データから、例えば、ランダムに一の学習用データを取得する。

[0114] 次に、ステップS330において、機械学習部42は、一の学習用データに含まれる入力データを、準備された学習前（又は学習中）の学習モデル6の入力層に入力する。その結果、学習モデル6の出力層から推論結果として出力データが出力されるが、当該出力データは、学習前（又は学習中）の学習モデル6によって生成されたものである。そのため、学習前（又は学習中）の状態では、推論結果として出力された出力データは、学習用データに含まれる入力データとは異なる情報を示す。

[0115] 次に、ステップS340において、機械学習部42は、ステップS320において取得された一の学習用データに含まれる入力データと、ステップS330において出力層から推論結果として出力された出力データとを比較し、各シナプスの重みを調整することで、機械学習を実施する。

[0116] 次に、ステップS350において、機械学習部42は、機械学習を継続する必要があるか否かを判定する。その結果、継続すると判定した場合（ステップS350でNo）、ステップS320に戻り、学習中の学習モデル6に対してステップS320～S340の工程を実施し、機械学習を終了すると判定した場合（ステップS350でYes）、ステップS360に進む。

[0117] そして、機械学習部42は、ステップS360において、各シナプスに対応付けられた重みが調整されることで生成された学習済みの学習モデル6を学習済みモデル記憶部43に記憶し、図12に示す一連の機械学習方法を終了する。機械学習方法において、ステップS300が学習用データ記憶工程

、ステップS 3 1 0～S 3 5 0が機械学習工程、ステップS 3 6 0が学習済みモデル記憶工程に相当する。

[0118] 以上のように、本実施形態に係る機械学習装置4及び機械学習方法によれば、モータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、及び、振動（本実施形態では、A E波及び加速度）のデータから、摺動面1 0 0、1 1 0の診断情報を高精度に推論（推定）することが可能な学習モデル6を提供することができる。

[0119] （摺動面診断装置5）

摺動面診断装置5は、第1の実施形態（図8参照）と同様に、入力データ取得部5 0と、推論部5 1と、学習済みモデル記憶部5 2と、出力処理部5 3とを備える。

[0120] 推論部5 1は、入力データ取得部5 0により取得された入力データを学習モデル6に入力し、摺動面1 0 0、1 1 0の診断情報を推論する推論処理を行う。推論処理には、機械学習装置4及び機械学習方法にて教師なし学習が実施された学習済みの学習モデル6が用いられる。

[0121] （摺動面診断方法）

図1 3は、第2の実施形態に係る摺動面診断装置5による摺動面診断方法の一例を示すフローチャートである。図1 3では、摺動面1 0 0、1 1 0の診断情報が、正常及び異常のいずれかであることを表す2値分類として定義されたものとして説明する。

[0122] まず、ステップS 4 0 0において、入力データ取得部5 0が、測定装置3（モータ電流センサ3 0、接触電気抵抗測定回路3 1、A E測定回路3 2、及び、加速度センサ3 3）により測定された測定値に基づく入力データ（所定期間における、モータ電流値のデータ、接触電気抵抗のデータ、A E波のデータ、及び、加速度のデータ）を取得する。

[0123] 次に、ステップS 4 1 0において、推論部5 1は、入力データに前処理を施して学習モデル6の入力層に入力し、その学習モデル6の出力層から出力された出力データを取得する。

- [0124] 次に、ステップS 4 2 0において、推論部5 1は、教師なし学習の後処理の一例として、入力データに基づく特徴量と、出力データに基づく特徴量との差を求める。特徴量は、例えば、多次元空間上の特徴ベクトルとして表現されるパラメータであり、差は、特徴ベクトル間の距離として表現される。そして、推論部5 1は、その差が所定の閾値未満であれば、診断情報は「正常」であると判断し、所定の閾値以上であれば、診断情報は「異常」であると判断することで、その判断結果を推論結果として出力する。
- [0125] 次に、ステップS 4 3 0において、出力処理部5 3は、推論部5 1の推論結果である摺動面1 0 0、1 1 0の診断情報が「正常」及び「異常」のいずれを表すかを判定する。その結果、「正常」と判定した場合には、ステップS 4 4 0に進み、「異常」と判定した場合には、ステップS 4 5 0（省略可能）に進み、図1 3に示す一連の摺動面診断方法を終了する。摺動面診断方法において、ステップS 4 0 0が入力データ取得工程、ステップS 4 1 0～S 4 2 0が推論工程、ステップS 4 3 0～S 4 5 0が出力処理工程に相当する。
- [0126] 以上のように、本実施形態に係る摺動面診断装置5及び摺動面診断方法によれば、作業者の経験に依存することなく、摺動面1 0 0、1 1 0の状態を高精度に診断することができる。
- [0127] （他の実施形態）
- 本発明は上述した実施形態に制約されるものではなく、本発明の主旨を逸脱しない範囲内で種々変更して実施することが可能である。そして、それらはすべて、本発明の技術思想に含まれるものである。
- [0128] 上記実施形態では、機械学習部4 2による機械学習の具体的な手法として、ニューラルネットワーク（第1の実施形態）及びオートエンコーダ（第2の実施形態）をそれぞれ採用した場合について説明したが、機械学習部4 2は、任意の他の機械学習の手法を採用してもよい。他の機械学習の手法としては、例えば、決定木、回帰木等のツリー型、バギング、ブースティング等のアンサンブル学習、再帰型ニューラルネットワーク、畳み込みニューラル

ネットワーク等のニューラルネット型(ディープラーニングを含む)、階層型クラスタリング、非階層型クラスタリング、k近傍法、k平均法等のクラスタリング型、主成分分析、因子分析、ロジスティック回帰等の多変量解析、サポートベクターマシン等が挙げられる。

[0129] 本発明は、図3に示すコンピュータ200に、上記実施形態に係る機械学習方法が備える各工程を実行させるためのプログラム(機械学習プログラム)230の態様で提供することもできる。また、本発明は、図3に示すコンピュータ200に、上記実施形態に係る摺動面診断方法が備える各工程を実行させるためのプログラム(摺動面診断プログラム)230の態様で提供することもできる。

[0130] (推論装置、推論方法及び推論プログラム)

本発明は、上記実施形態に係る摺動面診断装置5(摺動面診断方法又は摺動面診断プログラム)の態様によるもののみならず、摺動面の状態を診断するために用いられる推論装置(推論方法又は推論プログラム)の態様で提供することもできる。その場合、推論装置(推論方法又は推論プログラム)としては、メモリと、プロセッサとを含み、このうちのプロセッサが、一連の処理を実行するものとすることができる。当該一連の処理とは、所定期間におけるモータ電流値のデータ、所定期間における接触電気抵抗のデータ、及び、所定期間における振動(AE波及び加速度の少なくとも1つ)のデータを含む入力データを取得する入力データ取得処理(入力データ取得工程)と、入力データ取得処理にて入力データを取得すると、摺動面の診断情報を推論する推論処理(推論工程)とを含む。

[0131] 推論装置(推論方法又は推論プログラム)の態様で提供することで、摺動面診断装置5を実装する場合に比して簡単に種々の装置への適用が可能となる。推論装置(推論方法又は推論プログラム)が摺動面の状態を推論する際、上記実施形態に係る機械学習装置4及び機械学習方法により生成された学習済みの学習モデル6を用いて、摺動面診断装置5の推論部51が実施する推論手法を適用してもよいことは、当業者にとって当然に理解され得るもの

である。

産業上の利用可能性

[0132] 本発明は、機械学習装置、摺動面診断装置、推論装置、機械学習方法、機械学習プログラム、摺動面診断方法、摺動面診断プログラム、推論方法、及び、推論プログラムに利用可能である。

符号の説明

[0133] 1 A…第1の摺動機械要素、1 B…第2の摺動機械要素、2…摺動面診断システム、
3…測定装置、4…機械学習装置、5…摺動面診断装置、6…学習モデル、
1 0…固定側摺動部材、1 1…回転側摺動部材、1 2…回転軸、1 3…モータ、
1 4…モータ制御回路、1 5…付勢部材、
3 0…モータ電流センサ、3 1…接触電気抵抗測定回路、
3 2…A E測定回路、3 3…加速度センサ、
4 0…学習用データ取得部、4 1…学習用データ記憶部、
4 2…機械学習部、4 3…モデル記憶部、
5 0…入力データ取得部、5 1…推論部、5 2…モデル記憶部、5 3…出力処理部、
1 0 0…固定側摺動面、1 1 0…回転側摺動面、2 0 0…コンピュータ、

請求の範囲

- [請求項1] 固定側摺動部材と回転側摺動部材とが摺動する摺動面の状態を診断する摺動面診断装置に用いられる学習モデルを生成する機械学習装置であって、
- 所定期間において前記回転側摺動部材の駆動源であるモータに供給されるモータ電流値のデータ、前記所定期間における前記固定側摺動部材と前記回転側摺動部材との間の接触電気抵抗のデータ、及び、前記所定期間において前記固定側摺動部材及び前記回転側摺動部材の少なくとも一方に生じる振動のデータを入力データとして少なくとも含む学習用データを1又は複数組記憶する学習用データ記憶部と、
- 前記学習モデルに前記学習用データを1又は複数組入力することで、前記入力データと前記摺動面の診断情報との相関関係を前記学習モデルに学習させる機械学習部と、
- 前記機械学習部により学習させた前記学習モデルを記憶する学習済みモデル記憶部と、を備える、
- 機械学習装置。
- [請求項2] 前記学習用データは、
- 前記入力データに対応付けられ、前記所定期間における前記摺動面の状態が複数の状態のうちのいずれかであることを表す前記診断情報を出力データとしてさらに含み、
- 前記機械学習部は、
- 前記入力データと前記出力データとの相関関係を教師あり学習により前記学習モデルに学習させる、
- 請求項1に記載の機械学習装置。
- [請求項3] 前記学習用データは、
- 前記診断情報が前記所定期間における前記摺動面の状態が所定の状態であることを表すときの前記入力データのみを含み、
- 前記機械学習部は、

前記入力データと前記摺動面の状態が前記所定の状態であることを表す前記診断情報との相関関係を教師なし学習により前記学習モデルに学習させる、

請求項 1 に記載の機械学習装置。

[請求項4]

前記入力データに含まれる前記振動のデータは、

アコースティックエミッション波のデータ、及び、前記摺動面と直交する方向に生じる加速度のデータ、の少なくとも一つである、

請求項 1 乃至請求項 3 のいずれか一項に記載の機械学習装置。

[請求項5]

前記診断情報は、

前記摺動面の摩耗に関する診断情報、前記摺動面の焼付きに関する診断情報、及び、前記摺動面を潤滑する潤滑剤の汚損に関する診断情報である、の少なくとも一つである、

請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか一項に記載の機械学習装置。

[請求項6]

請求項 1 乃至請求項 5 のいずれか一項に記載の機械学習装置により生成された学習モデルを用いて、固定側摺動部材と回転側摺動部材とが摺動する摺動面の状態を診断する摺動面診断装置であって、

所定期間における前記回転側摺動部材の駆動源であるモータに供給されるモータ電流値のデータ、前記所定期間における前記固定側摺動部材と前記回転側摺動部材との間の接触電気抵抗のデータ、及び、前記所定期間における前記固定側摺動部材及び前記回転側摺動部材の少なくとも一方に生じる振動のデータを含む入力データを取得する入力データ取得部と、

前記入力データ取得部により取得された前記入力データを前記学習モデルに入力し、前記摺動面の診断情報を推論する推論部と、を備える、

摺動面診断装置。

[請求項7]

固定側摺動部材と回転側摺動部材とが摺動する摺動面の状態を診断するために用いられる推論装置であって、

前記推論装置は、メモリと、プロセッサとを備え、

前記プロセッサは、

所定期間における前記回転側摺動部材の駆動源であるモータに供給されるモータ電流値のデータ、前記所定期間における前記固定側摺動部材と前記回転側摺動部材との間の接触電気抵抗のデータ、及び、前記所定期間における前記固定側摺動部材及び前記回転側摺動部材の少なくとも一方に生じる振動のデータを含む入力データを取得する入力データ取得処理と、

前記入力データ取得処理にて前記入力データを取得すると、前記摺動面の診断情報を推論する推論処理と、を実行する、

推論装置。

[請求項8]

固定側摺動部材と回転側摺動部材とが摺動する摺動面の状態を診断する摺動面診断装置に用いられる学習モデルを学習する機械学習方法であって、

所定期間における前記回転側摺動部材の駆動源であるモータに供給されるモータ電流値のデータ、前記所定期間における前記固定側摺動部材と前記回転側摺動部材との間の接触電気抵抗のデータ、及び、前記所定期間における前記固定側摺動部材及び前記回転側摺動部材の少なくとも一方に生じる振動のデータを入力データとして少なくとも含む学習用データを、学習用データ記憶部に1又は複数組記憶する学習用データ記憶工程と、

前記学習モデルに前記学習用データを1又は複数組入力することで、前記入力データと前記摺動面の診断情報との相関関係を前記学習モデルに学習させる機械学習工程と、

前記機械学習工程により学習させた前記学習モデルを学習済みモデル記憶部に記憶する学習済みモデル記憶工程と、を備える、

機械学習方法。

[請求項9]

コンピュータに、請求項8に記載の機械学習方法が備える各工程を

実行させるための、

機械学習プログラム。

[請求項10] 請求項1乃至請求項5のいずれか一項に記載の機械学習装置により生成された学習モデルを用いて、固定側摺動部材と回転側摺動部材とが摺動する摺動面の状態を診断する摺動面診断方法であって、

所定期間における前記回転側摺動部材の駆動源であるモータに供給されるモータ電流値のデータ、前記所定期間における前記固定側摺動部材と前記回転側摺動部材との間の接触電気抵抗のデータ、及び、前記所定期間における前記固定側摺動部材及び前記回転側摺動部材の少なくとも一方に生じる振動のデータを含む入力データを取得する入力データ取得工程と、

前記入力データ取得工程により取得された前記入力データを前記学習モデルに入力し、前記摺動面の診断情報を推論する推論工程と、を備える、

摺動面診断方法。

[請求項11] コンピュータに、請求項10に記載の摺動面診断方法が備える各工程を実行させるための、

摺動面診断プログラム。

[請求項12] 固定側摺動部材と回転側摺動部材とが摺動する摺動面の状態を推論する推論方法であって、

所定期間における前記回転側摺動部材の駆動源であるモータに供給されるモータ電流値のデータ、前記所定期間における前記固定側摺動部材と前記回転側摺動部材との間の接触電気抵抗のデータ、及び、前記所定期間における前記固定側摺動部材及び前記回転側摺動部材の少なくとも一方に生じる振動のデータを含む入力データを取得する入力データ取得工程と、

前記入力データ取得工程にて前記入力データを取得すると、前記摺動面の診断情報を推論する推論工程と、を備える、

推論方法。

[請求項13] コンピュータに、請求項 1 2 に記載の推論方法が備える各工程を実行させるための、
推論プログラム。