

①9



SCHWEIZERISCHE EIDGENOSSENSCHAFT
EIDGENÖSSISCHES INSTITUT FÜR GEISTIGES EIGENTUM

①1 CH 693 568 A5

Erfindungspatent für die Schweiz und Liechtenstein

Schweizerisch-liechtensteinischer Patentschutzvertrag vom 22. Dezember 1978

⑤1 Int. Cl.⁷: B 66 B 005/00
G 06 F 017/14
G 01 M 019/00

①2 PATENTSCHRIFT A5

②1 Gesuchsnummer: 01131/98

②2 Anmeldungsdatum: 12.09.1997

③0 Priorität: 13.09.1996 JP 8-291310

④4 Patent erteilt: 15.10.2003

④5 Patentschrift veröffentlicht: 15.10.2003

⑦3 Inhaber:
Kabushiki Kaisha Toshiba
72, Horikawa-cho, Saiwai-ku
Kawasaki-shi (Kanagawa-ken) (JP)
TOSHIBA ELEVATOR CO., LTD.
5-27, Ktrashinagawa 6-chome,
Shinagawa-ku, Tokyo-to (JP)

⑦2 Erfinder:
Yutaka Iino
10-12, Ikuta 3-Chome, Tama-Ku
Kawasaki-Shi, Kanagawa 214 (JP)
Masanori Yukitomo
3701, Shiomidai, Isogo-Ku
Yokohama-Shi, Kanagawa 235 (JP)

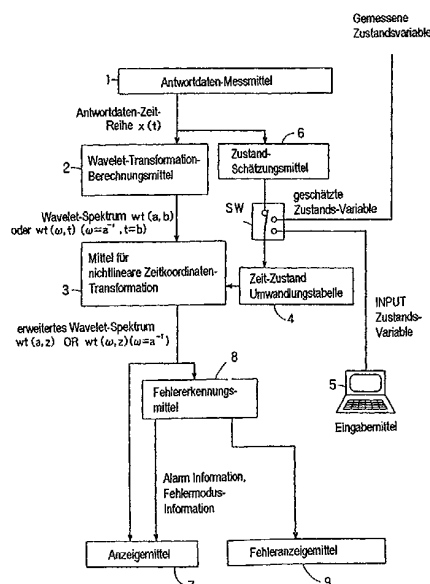
⑦4 Vertreter:
Patentanwaltsbüro Feldmann AG
Kanalstrasse 17, Postfach
8152 Opfikon-Glattbrugg (CH)

⑧6 Internationale Anmeldung:
PCT/JP 19/97003 (En)

⑧7 Internationale Veröffentlichung:
WO 19/98011 (En) 19.3.1998

⑤4 Analysator für ein sich änderndes Signal und Datenträger für ein Analyseprogramm.

⑤7 Ein Signal-Analysator zum Nachweisen eines Fehlers in einem überwachten Objekt durch die Analyse eines sich ändernden Signals, das vom überwachten Objekt generiert wird, verfügt über ein Wavelet-Transformations-Berechnungsmittel (2) zur Erzeugung von Wavelet-Spektrumsdaten durch Wavelet-Transformation des sich ändernden Signals, ein Zustandsvariationsfunktion-Festsetzungsmittel (4, 6) zur Festlegung einer Zustandsvariations-Funktion, welche eine zeitabhängige Variation einer spezifischen Zustandsvariablen des überwachten Objektes darstellt, und ein Mittel zur nichtlinearen Zeitkoordinaten-Transformation (3), um eine Zeitkoordinate der Wavelet-Spektrumsdaten nichtlinear in eine Koordinate der spezifischen Zustandsvariablen zu transformieren, indem eine inverse Funktion der Zustandsvariationsfunktion verwendet wird.



Beschreibung

Die vorliegende Erfindung bezieht sich auf einen Signal-Analysator, welcher ein sich änderndes Signal analysiert, das von einem überwachten Objekt, beispielsweise von einem mechanischen System, einem Verfahren oder etwas Ähnlichem generiert wird. Sie bezieht sich insbesondere auf einen Signal-Analysator zur Analyse eines sich ändernden, von einem Aufzug generierten Signals, und auf einen Datenträger zur Speicherung eines Analyseprogramms, welches mittels eines Computers ein sich änderndes, von einem überwachten Objekt generiertes Signal analysiert.

Stand der Technik

Es sind diverse Diagnostiksysteme bekannt, bei denen ein von einem überwachten Objekt, beispielsweise von einem mechanischen System, einem Verfahren oder etwas Ähnlichem, generiertes Signal von einem Messinstrument gemessen und analysiert wird, um einen Fehler im überwachten Objekt zu detektieren und, falls ein Fehler festgestellt wird, diesem dem Bediener oder Benutzer zu melden.

Bei diesen bekannten Diagnostiksystemen werden die Daten der empfangenen Signale meistens durch eine Fourier-Transformation in ein Spektrum umgewandelt, welches überwacht wird, oder sie verwenden eine Systemidentifikations-Methode, welche auf Daten beruht, die zum überwachten Objekt gesandt und von diesem geliefert werden, um ein charakteristisches Modell zu schaffen. Es hat sich aber gezeigt, dass es unmöglich ist, durch eine Fourier-Transformation von Daten, welche ein sich änderndes Signal darstellen, ein Spektrum zu erhalten, wenn sich der Zustand des überwachten Objekts abrupt ändert. Ebenso ist es nicht möglich, ein charakteristisches Modell durch System-Identifikation zu bestimmen.

Eine analytische Wavelet-Methode, welche eine Wavelet-Transformation verwendet, hat als Detektionsmethode zur Analyse eines Fehlers in einem überwachten Objekt, welches sich ändernde Signale abgibt, Aufmerksamkeit erregt. Die analytische Wavelet-Methode wird nachfolgend beschrieben.

Die Fourier-Transformation eines Signals $x(t)$, das von einem überwachten Objekt geliefert wird, ist

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

Die Wavelet-Transformation desselben Signals $x(t)$ ist

$$wt(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) x(t) dt \quad (2)$$

wobei $\Phi(\cdot)$ eine Basisfunktion ist, die als Mutter-Wavelet der Transformation bezeichnet wird. Die Fourier-Transformation entspricht der Wavelet-Transformation mit der Basisfunktion $\Phi(t) = e^{-jt}$, $b = 0$ und $a = \omega^{-1}$, wobei die Basisfunktion eine Funktion der Zeit von minus unendlich ($-\infty$) bis plus unendlich (∞) ist, wie dies in Fig. 2a dargestellt ist. Das durch Fourier-Transformation erzielte Spektrum ist daher eine Funktion einer einzigen Variablen, nämlich der Frequenz, wie in Fig. 2b anhand eines Beispiels dargestellt ist. Es ist nicht möglich, eine Zeitabhängigkeit des Spektrums zu bestimmen, das heisst also zu bestimmen, welcher Teil der Daten durch das Spektrum dargestellt wird.

In diesem Aufsatz verwendet die Wavelet-Transformation eine Gabor-Funktion, ausgedrückt durch

$$\phi(t) = e^{-(t/T)^2} e^{-j\omega t} \quad (3)$$

als Basisfunktion in Abhängigkeit der Zeit, wie Fig. 3a zeigt. Folglich ist das durch Wavelet-Transformation erhaltene Spektrum eine Funktion von zwei Variablen, nämlich der Frequenz und der Zeit. Die Zeitabhängigkeit der Frequenzkomponenten des Signals kann auf Grund einer Funktion von zwei Variablen bestimmt werden, wie dies in Fig. 3b anhand eines Beispiels dargestellt ist.

Wie oben erwähnt, ermöglicht die Wavelet-Transformation, die Spektralverteilung der beobachteten Daten zu jedem Zeitpunkt herauszuholen. Die Wavelet-Transformation ist daher ein effizientes Mittel, um ein sich änderndes Signal zu analysieren, welches die sich mit der Zeit ändernden Betriebsverhältnisse eines überwachten Objektes wiedergibt. Beim bisherigen Diagnosesystem wird ein sich änderndes Signal, welches von einem überwachten Objekt generiert wird, jedoch lediglich einer Wavelet-Transformation unterzogen. Deshalb zeigt das Ergebnis der Analyse lediglich die Zeitabhängigkeit des Frequenzspektrums. Das bisherige Diagnosesystem ist daher ein ungeeignetes Analysemittel, um den Zustand des überwachten Objektes zu diagnostizieren. Es ist zum Beispiel nicht möglich, die Relation zwischen dem Analyseergebnis, erhalten mit dem bisherigen, in Fig. 3b gezeigten Diagnosesystem, und der Variation des Zustandes des überwachten Objekts zu verstehen.

Es ist daher Aufgabe der Erfindung, einen Signal-Analysator zu schaffen, welcher einen sich ändernden Zustand eines überwachten Objekts genau diagnostizieren kann, indem ein sich änderndes, vom Objekt generiertes Signal analysiert wird.

5 Die Erfindung

Der erfindungsgemässe Signal-Analysator zum Analysieren eines sich ändernden Signals, das von einem überwachten Objekt generiert wird, weist Folgendes auf:
 ein Wavelet-Transformations-Berechnungsmittel zur Erzeugung von Wavelet-Spektrum-Daten durch eine Wavelet-Transformation des sich ändernden Signals,
 ein Zustandsvariationsfunktions-Festsetzungsmittel zur Festsetzung einer Zustandsvariationsfunktion, welche eine Variation einer spezifischen Zustandsvariablen des überwachten Objektes in Funktion der Zeit darstellt und ein nichtlineares Zeitkoordinaten-Transformationsmittel zur nichtlinearen Transformation einer Zeitkoordinate der Wavelet-Spektrumdaten in eine Koordinate der spezifischen Zustandsvariable durch Gebrauch einer inversen Funktion der durch das Festsetzungsmittel festgesetzten Zustandsvariationsfunktion.

Der erfindungsgemässe Signal-Analysator kann zur Überwachung einer Kabine eines Aufzuges verwendet werden, wobei das sich ändernde Signal eine gemessene Beschleunigung der Kabine darstellt und die spezifische Zustandsvariable die vertikale Position oder die vertikale Geschwindigkeit der Kabine ist.

Im Signal-Analysator transformiert das nichtlineare Zeitkoordinaten-Transformationsmittel die Zeitkoordinate der Wavelet-Spektrumdaten in eine Koordinate der spezifischen Zustandsvariablen durch:

$$wt(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \phi\left(\frac{t(z-b)}{a}\right) x(t(z)) \frac{dt(z)}{dz} dz$$

was eine erweiterte Wavelet-Transformation (extended wavelet-transformation) darstellt. Beim bisher genannten erfindungsgemässen Signal-Analysator teilt das Zeitkoordinaten-Transformationsmittel die Daten des Wavelet-Spektrums in Abhängigkeit der Zeit in Datensegmente, ordnet diese nach Grösse der Zustandsvariablen neu unter Berücksichtigung einer Datentabelle, welche die Relation zwischen Zeit und Zustandsvariable oder Zustandsvariationsfunktion wiedergibt, und schätzt die Zwischenwerte der Datensegmente durch Interpolation und Glättungstechniken, um so die Zeitkoordinate der Wavelet-Spektrumdaten nichtlinear in eine Koordinate der spezifischen Zustandsvariable zu transformieren.

Der Signal-Analysator gemäss der Erfindung weist ferner ein Antwortdaten-Messmittel zur Messung des sich ändernden Signals auf.

Beim vorher genannten Signal-Analysator gemäss der Erfindung kann das Zustandsvariationsfunktions-Festsetzungsmittel die Zustandsvariationsfunktion auf Grund der gemessenen Daten einer Zustandsvariable des überwachten Objektes, welche nicht die spezifische Zustandsvariable ist, schätzen. Der gemessene Wert der Zustandsvariable des überwachten Objektes, welche nicht die spezifische Zustandsvariable ist, kann ein gemessener Wert des sich ändernden Signals sein.

Beim vorher genannten Signal-Analysator kann das Zustandsvariationsfunktions-Festsetzungsmittel die Zustandsvariationsfunktion durch eine Schätzung einer Variation der spezifischen Zustandsvariablen in Funktion der Zeit auf der Basis der gemessenen Daten der Zustandsvariable des überwachten Objektes, welche nicht die spezifische Zustandsvariable ist, schätzen, indem ein Zustandsüberwachungssystem basierend auf einem dynamischen charakteristischen Modell des überwachten Objektes oder ein Kalman-Filter verwendet wird.

Beim vorher genannten erfindungsgemässen Signal-Analysator bestimmen die Zustandsvariationsfunktions-Festsetzungsmittel die Zustandsvariationsfunktion auf Grund gemessener Daten der spezifischen Zustandsvariablen.

Beim vorher genannten erfindungsgemässen Signal-Analysator ist die durch die Zustandsvariationsfunktions-Festsetzungsmittel verwendete Zustandsvariationsfunktion vorgängig bestimmt.

Sämtliche vorher genannten erfindungsgemässen Signal-Analysatoren können ferner ein Anzeigemittel zur Anzeige der Ergebnisse der Analyse aufweisen, wobei die Analyse durch das nichtlineare Zeitkoordinaten-Transformationsmittel auf einem Koordinatensystem durchgeführt ist, welches mindestens Koordinaten der spezifischen Zustandsvariablen und der Frequenz angibt.

Der erfindungsgemässe Signal-Analysator kann ferner ein Fehlererkennungsmittel aufweisen, um auf Grund der Resultate der durch die nichtlineare Zeitkoordinaten-Transformationsmittel durchgeführten Analyse einen Fehler im überwachten Objekt zu detektieren.

Der Signal-Analysator nach der Erfindung kann ferner aufweisen:

ein Gebietsbestimmungsmittel zur Bestimmung eines spezifischen Gebietes im Wavelet-Spektrum, welches als Ergebnis einer Analyse durch das nichtlineare Zeitkoordinaten-Transformationsmittel erhalten worden ist und welches auf dem Anzeigemittel angezeigt ist und

ein Datenextraktionsmittel zur Extraktion von Daten eines Spektrumabschnittes aus dem durch die Ge-

bietsbestimmungsmittel bestimmten spezifischen Gebiet und zur Übermittlung der extrahierten Daten des Spektrumabschnittes zum Fehlererkennungsmittel.

Der Signal-Analysator nach der Erfindung kann ein durch das Fehlererkennungsmittel erhaltenes Detektionsergebnis auf dem Anzeigemittel anzeigen.

5 Der Signal-Analysator nach der Erfindung kann ferner ein Fehleranzeigemittel aufweisen zur Anzeige eines durch das Fehlererkennungsmittel erhaltenen Detektionsergebnisses.

Die Erfindung umfasst ferner einen Datenträger zur Verwendung in einem erfindungsgemässen Signal-Analysator, auf welchem Datenträger ein Analyseprogramm für sich ändernde Signale gespeichert ist, wobei das Analyseprogramm ein Verfahren zur Analyse eines sich ändernden, durch ein überwach-

10 tes Objekt verursachten Signals definiert und mittels eines Computers auszuführen ist, wobei das Analyseprogramm den Computer Folgendes ausführen lässt:

eine Wavelet-Transformations-Berechnungsfunktion, welche mittels Wavelet-Transformation des sich ändernden Signals Wavelet-Spektrum-Daten erzeugt;

15 eine Zustandsvariationsfunktions-Festsetzungsfunktion, welche eine Zustandsvariationsfunktion festsetzt, welche eine Variation einer spezifischen Zustandsvariablen des überwachten Objekts in Abhängigkeit der Zeit darstellt und

eine Funktion zur nichtlinearen Zeitkoordinaten-Transformation, welche eine Zeitkoordinate der Wavelet-Spektrumdaten nichtlinear in eine Koordinate der spezifischen Zustandsvariablen transformiert unter Gebrauch einer inversen Funktion der Zustandsvariationsfunktion.

20 Bei einem Datenträger gemäss der dritten Ausführung der Erfindung zur Speicherung des Analyseprogramms ist das überwachte Objekt ein Aufzug, das sich ändernde Signal ein die gemessene Beschleunigung einer Aufzugskabine darstellendes Beschleunigungssignal und die spezifische Zustandsvariable eine vertikale Position oder eine vertikale Geschwindigkeit der Kabine.

25 Bei einem Datenträger gemäss der dritten Ausführung der Erfindung zur Speicherung des Analyseprogramms führt die Funktion zur nichtlinearen Zeitkoordinaten-Transformation die nichtlineare Transformation der Zeitkoordinate der Wavelet-Spektrumdaten aus unter Verwendung des folgenden, eine erweiterte Wavelet-Transformation darstellenden Ausdruckes:

$$30 \quad w_t(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \phi\left(\frac{t(z-b)}{a}\right) x(t(z)) \frac{dt(z)}{dz} dz$$

35 Bei einem Datenträger zur Speicherung des Analyseprogramms nach der dritten Ausführung der Erfindung unterteilt die Funktion der nichtlinearen Zeitkoordinaten-Transformation die Wavelet-Spektrumdaten bezüglich der Zeit in Datensegmente, ordnet die Datensegmente entsprechend der Grösse der Zustandsvariablen auf Grund einer die Beziehung zwischen Zeit und Zustandsvariablen oder Zustandsvariationsfunktion zeigenden Datentabelle neu und schätzt die Zwischenwerte der Datensegmente durch Interpolations- und Glättungstechniken, um die Zeitkoordinate der Wavelet-Spektrumdaten nichtlinear in

40 die Koordinate der spezifischen Zustandsvariable zu transformieren.

Die vorliegende Erfindung erlaubt eine genaue Diagnose des sich ändernden Zustandes eines überwachten Objektes durch die Korrelation und den kausalen Zusammenhang zwischen der spezifischen Zustandsvariablen des überwachten Objektes und den Frequenzänderungen.

45 Kurze Beschreibung der Zeichnungen

Fig. 1 ist ein Blockschema eines Signal-Analysators gemäss einer ersten bevorzugten Ausführung der Erfindung;

50 Fig. 2a und 2b sind grafische Darstellungen einer Basisfunktion für eine Fourier-Transformation und ein durch Fourier-Transformation erzeugtes Powerspektrum;

Fig. 3a und 3b sind grafische Darstellungen einer Basisfunktion für eine Wavelet-Transformation und ein Wavelet-Powerspektrum erhalten durch Wavelet-Transformation;

55 Fig. 4 ist ein Blockschema eines Signal-Analysators für ein sich änderndes Signal in einer Variante zu Fig. 1;

Fig. 5 ist eine schematische Darstellung eines Aufzuges, bei dem der Signal-Analysator nach der Erfindung Anwendung findet;

Fig. 6 ist eine schematische Darstellung des Aufzuges nach Fig. 5 versehen mit einem Signal-Analysator nach der Erfindung;

60 Fig. 7 ist ein Fluss-Diagramm eines diagnostischen Algorithmus' zum Feststellen von Fehlern in einem Aufzug, basierend auf einer erweiterten Wavelet-Transformation, welche durch einen Signal-Analysator nach der Erfindung auszuführen ist;

Fig. 8a, 8b und 8c sind grafische Darstellungen, welche die zeitlichen Änderungen vom Drehmoment des Aufzugsmotors nach Fig. 5, die Geschwindigkeit der Aufzugskabine nach Fig. 5 und die Position der Kabine zeigen, wenn die Abtriebswelle des Motors exzentrisch ist;

Fig. 9a, 9b und 9c sind grafische Darstellungen, welche die zeitlichen Änderungen der Beschleunigung der Kabine nach Fig. 5, die Änderungen des Drehmomentes des Motors und das Ergebnis der Fourier-Transformation der Kabinenbeschleunigung zeigen, wenn die Abtriebswelle des Motors exzentrisch ist;

5 Fig. 10 ist eine grafische Darstellung, welcher das Ergebnis der Analyse der Beschleunigung der Aufzugskabine mit einer konventionellen Wavelet-Transformation zeigt, wenn die Abtriebswelle des Motors exzentrisch ist;

Fig. 11a und 11b sind grafische Darstellungen, welche das Ergebnis der Analyse gemäss einer erweiterten Wavelet-Transformation der Beschleunigung der Aufzugskabine bezüglich der Kabinengeschwindigkeit zeigen, wenn die Abtriebswelle des Motors exzentrisch ist;

10 Fig. 12 ist eine grafische Darstellung, welche das Ergebnis der Analyse gemäss der erweiterten Wavelet-Transformation der Beschleunigung der Aufzugskabine bezüglich der Position der Kabine zeigt, wenn die Abtriebswelle des Motors exzentrisch ist;

Fig. 13a, 13b und 13c sind grafische Darstellungen, welche die Zeitabhängigkeit des Ausgangsdrehmomentes des Kabinenmotors, die Geschwindigkeit der Aufzugskabine und die Position der Kabine zeigen, für den Fall, dass eine Führungsschiene des Aufzuges defekt ist;

Fig. 14a und 14b sind grafische Darstellungen, welche die Beschleunigung der Aufzugskabine und das Ergebnis der Fourier-Transformation der Beschleunigung der Aufzugskabine darstellen, für den Fall, dass die Führungsschiene defekt ist;

20 Fig. 15 zeigt eine grafische Darstellung des Ergebnisses einer erweiterten Wavelet-Transformation der Beschleunigung der Aufzugskabine, wenn die Führungsschiene defekt ist;

Fig. 16 ist ein Block-Diagramm eines erfindungsgemässen Signal-Analysators für sich ändernde Signale nach der Erfindung für einen Eisenbahnwagen;

25 Fig. 17 zeigt eine schematische Seitenansicht eines Eisenbahnwagens mit einem erfindungsgemässen Signal-Analysator;

Fig. 18 ist eine perspektivische Darstellung eines erfindungsgemässen Signal-Analysators;

Fig. 19 ist ein Block-Diagramm einer inneren Vorrichtung eines erfindungsgemässen Signal-Analysators;

30 Fig. 20 ist eine bildhafte Ansicht, welche anhand eines Beispiels Daten zeigt, die auf der Anzeigevorrichtung des erfindungsgemässen Signal-Analysators angezeigt sind;

Fig. 21 zeigt ein Block-Diagramm eines erfindungsgemässen Signal-Analysators;

Fig. 22 ist eine perspektivische Darstellung eines Computersystems, das verwendet wird, um das auf dem Datenträger gespeicherte Signal-Analyseprogramm gemäss einer zweiten bevorzugten Ausführung der Erfindung ablesen zu können;

35 Fig. 23 ist ein Block-Diagramm des Computersystems, welches verwendet wird, um das auf dem Datenträger gespeicherte Signal-Analyseprogramm gemäss der zweiten Ausführung ablesen zu können.

Die beste Weise zur Ausführung der Erfindung

Eine erste Ausführung der Erfindung

40 Anhand der Fig. 1, 3a und 3b wird eine erste Ausführung des erfindungsgemässen Signal-Analysators beschrieben. Der Signal-Analysator nach Fig. 1 weist ein Antwortdaten-Messmittel 1 auf mit einem Sensor, einem A/D-Wandler und einem Störschutzfilter.

45 Ein sich änderndes Signal $x(t)$, d.h. eine zeitliche Serie von Antwortdaten, empfangen vom Antwortdaten-Messmittel 1, wird einem Wavelet-Transformationsmittel 2 zugeführt, welches eine Berechnung ausführt, beispielsweise mit folgender Formel (2) einer Wavelet-Transformation:

$$50 \quad wt(a, b) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \phi\left(\frac{t-b}{a}\right) x(t) dt \quad (2)$$

In Formel (2) ist a der Reziprokwert der Frequenz ω , und b ist die Zeit t .

55 Das Wavelet-Transformationsmittel 2 führt eine Wavelet-Transformation des sich ändernden Signals $x(t)$ der Kabinenbeschleunigung gemäss der Formel (2) durch, um ein Wavelet-Spektrum (Wavelet-Transformationsdaten) $wt(a,b)$ nach Fig. 3b zu erstellen. Das Wavelet-Transformationsmittel 2 übergibt dann das Wavelet-Spektrum $wt(a,b)$ an ein nichtlineares Zeitkoordinaten-Transformationsmittel 3 weiter. Das nichtlineare Zeitkoordinaten-Transformationsmittel 3 transformiert die Zeitkoordinate des Wavelet-Spektrums $wt(a,b)$ durch nichtlineare Koordinaten-Transformation unter Berücksichtigung einer spezifischen Zustandsvariablen (physikalischer Wert) des überwachten Objekts.

60 Stellt das sich ändernde, durch das Antwortdaten-Messmittel 1 gemessene Signal eine Beschleunigung dar, ist die spezifische Zustandsvariable beispielsweise eine Geschwindigkeit oder eine Position, was später anhand der Anwendung des Signal-Analysators für einen Aufzug und einen Eisenbahnwagen beschrieben wird.

65 Der Analysator hat eine Zeit-Zustand-Umwandlungstabelle 4, in welcher Zustandsvariations-Funktionsda-

ten $\{z(t_1), z(t_2), \dots, z(t_N)\}$ für das Verhältnis zwischen Zeit und spezifischer Zustandsvariable aufgelistet sind. Die Zeit-Zustand-Umwandlungstabelle 4 und das nachfolgende Zustandsvariablen-Schätzmittel 6 bilden das Zustandsvariationsfunktion-Festsetzungsmittel zur Festlegung einer Zustandsvariationsfunktion, welche die zeitliche Änderung einer spezifischen Zustandsvariablen des überwachten Objekts darstellt.

Es gibt verschiedene Möglichkeiten, um die Zustandsvariations-Funktionsdaten zu erhalten $\{z(t_1), z(t_2), \dots, z(t_N)\}$. Der Signal-Analysator gemäss dieser Ausführung weist ein Eingabemittel 5 auf, um vorher bestimmte Zustandsvariations-Funktionsdaten $\{z(t_1), z(t_2), \dots, z(t_N)\}$ in die Zeit-Zustands-Umwandlungstabelle 4 zu schreiben.

Die Zustandsvariations-Funktionsdaten $\{z(t_1), z(t_2), \dots, z(t_N)\}$ kann man direkt erhalten durch eine direkte Messung einer zeitabhängigen spezifischen Zustandsvariablen z , wie z.B. der Geschwindigkeit, oder durch Schätzung der zeitlichen Änderung der spezifischen Zustandsvariablen z , wie z.B. der Geschwindigkeit, anhand von gemessenen Daten einer Zustandsvariablen, wie beispielsweise der Beschleunigung, welche nicht die spezifische Zustandsvariable z , z.B. die Geschwindigkeit, ist.

Die letztgenannte Methode zur Schätzung der zeitlichen Änderung der spezifischen Zustandsvariablen z auf Grund der gemessenen Daten einer Zustandsvariablen, welche nicht die spezifische Zustandsvariable ist, wird durch das Zustands-Schätzmittel 6 nach Fig. 1 ausgeführt, welches später anhand einer Variante des Signal-Analysators nach Fig. 1 beschrieben wird.

Das Mittel 3 für eine nichtlineare Zeitkoordinaten-Transformation 3 liest die Zustandsvariationsdaten $\{z(t_1), z(t_2), \dots, z(t_N)\}$ aus der Zeit-Zustand-Umwandlungstabelle 4 und transformiert die Zeitkoordinate b des Wavelet-Spektrums $wt(a, b)$ in die Koordinate der Zustandsvariablen z .

Genauer gesagt, die Mittel 3 für nichtlineare Zeitkoordinaten-Transformation bildet die inverse Funktion $t(z)$ einer Funktion $z(t)$ (Zustandsvariationsfunktion), das heisst, eine Funktion von t , welche die spezifische Zustandsvariable z darstellt, und führt die Variation der Variablen auf Grund der inversen Funktion $t(z)$ durch, um die Zeit t der Formel (2) zu ändern, d.h. eine Wavelet-Transformation für die spezifische Zustandsvariable z , um den Ausdruck (4) zu erhalten

$$wt(a, b) = \int_{t(-\infty)}^{t(\infty)} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \phi\left(\frac{t(z-b)}{a}\right) x(t(z)) \frac{dt(z)}{dz} dz \quad (4)$$

Die Transformation nach Ausdruck (4) wird im Folgenden der Einfachheit halber als erweiterte Wavelet-Transformation bezeichnet. Ein erweitertes Wavelet-Spektrum $wt(a, z)$, welches die Variation der Frequenz bezüglich der spezifischen Zustandsvariablen z angibt, kann man erhalten durch Ersetzen der Zeitkoordinate b des Wavelet-Spektrums $wt(a, b)$ für die Koordinate der spezifischen Zustandsvariablen z , indem man den Ausdruck (4) der erweiterten Wavelet-Transformation verwendet.

In der nachfolgenden Beschreibung wird das oben genannte Wavelet-Spektrum $wt(a, b)$ durch $wt(\omega, b)$, $wt(a^{-1}, b)$, mit $\omega = a^{-1}$, ausgedrückt, um damit zum Ausdruck zu bringen, dass das Spektrum eine Funktion der Frequenz ω ist. Zudem wird das konventionelle Wavelet-Spektrum durch $wt(\omega, t)$ und das erweiterte Wavelet-Spektrum durch $wt(\omega, z)$ ausgedrückt, um zwischen dem konventionellen und dem erweiterten Wavelet-Spektrum zu unterscheiden.

Das erweiterte Wavelet-Spektrum $wt(\omega, z)$, erhalten durch Ersetzen der Zeitkoordinate durch die Koordinate der Zustandsvariablen, kann man ebenfalls erhalten, indem ein Wavelet-Spektrum $wt(\omega, t)$, welches durch eine konventionelle Wavelet-Transformation erhalten worden ist, in Daten-Segmente $\{wt(\omega, t_1), wt(\omega, t_2), \dots, wt(\omega, t_n)\}$ für Zeiten $\{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ unterteilt wird, die Daten-Segmente $\{wt(\omega, t_1), wt(\omega, t_2), \dots, wt(\omega, t_n)\}$ nach der Grösse der Zustandsvariablen z neu geordnet und die Zwischenwerte der Daten-Segmente durch Interpolation geschätzt werden.

Das Mittel 3 für nichtlineare Zeitkoordinations-Transformation sendet ein erweitertes Wavelet-Spektrum $wt(a, z)$ zu einem Anzeigemittel 7. Das Anzeigemittel 7 zeigt eine Funktion $wt(\omega, z)$ mit zwei Variablen, d.h. der Frequenz $\omega = a^{-1}$ (oder den Reziprokwert a von a^{-1}) und der Zustandsvariablen z an, d.h. ein erweitertes Wavelet-Spektrum (Wavelet-analytische Daten) auf Grund des erweiterten Wavelet-Spektrums $wt(a, z)$. Genauer gesagt wird $\{\omega, z, |wt(\omega, z)|\}$ oder $\{\omega, z, (wt(\omega, z))\}$ auf dem Bildschirm in Form einer dreidimensionalen Grafik dargestellt. Die Notation $|a|$ bezeichnet den Absolutwert von a und die Notation $\angle a$ bezeichnet den Phasenwinkel von a .

Der Signal-Analysator ist mit einem Fehleranzeigemittel 8 versehen, welches anhand des vom Mittel 3 für nichtlineare Zeitkoordinations-Transformation erstellten erweiterten Wavelet-Spektrums automatisch Fehler im überwachten Objekt anzeigt. Das Fehleranzeigemittel 8 entscheidet auf Grund eines vorbestimmten Fehlerdiagnose-Systems automatisch, ob sich das überwachte Objekt normal verhält oder nicht. Findet das Fehleranzeigemittel 8 einen Fehler im Verhalten des überwachten Objektes, so sendet es ein Alarmsignal oder ein Fehleranzeigesignal zum Anzeigemittel 7, um den Bediener zu warnen.

Das vorbestimmte Fehlerdiagnose-System enthält eine Grenzwertmethode für die Diagnose eines Fehlers, indem ein Power-Spektrum (Potenz-Spektrum) eines bestimmten Teiles des erweiterten Wavelet-Spektrums $wt(\omega, z)$, d.h. $\{|wt(\omega_1, z_1)|, \dots, |wt(\omega_m, z_m)|\}$ sowie folgende Grenzbedingung benützt wird:

If $(|wt(\omega_1, z_1)| > \varepsilon_1)$, then defective i (5)

oder es werden kombinierte Mittel verwendet. Das Ergebnis der Detektion durch das Fehlererkennungsmittel 8 lässt sich auf einem Fehleranzeigemittel 9 zusätzlich zu der Anzeige auf dem Anzeigemittel 7 anzeigen.

Ein gewünschtes Gebiet lässt sich im Wavelet-Spektrum, d.h. im auf dem Anzeigemittel 7 angezeigten Resultat der durch das Mittel 3 für nichtlineare Zeitkoordinaten-Transformation durchgeführten Analyse, durch den Bediener mit einem Zeigemittel oder Ähnlichem auswählen. Das dem ausgewählten Gebiet entsprechende erweiterte Wavelet-Spektrum lässt sich dem Fehler-Erkennungsmittel 8 zuführen, wobei das Fehler-Erkennungsmittel 8 einzig durch Verwendung des im zugeführten erweiterten Wavelet-Spektrums einen Fehler im überwachten Objekt detektiert.

Auf diese Weise kann eine direkte Analyse durchgeführt werden, die nicht durch Rauschen, Störungen oder andere hinderliche Faktoren aus anderen Gebieten als das ausgewählte Gebiet beeinflusst wird. Die Genauigkeit der Fehleranzeige wird verbessert, indem nur ein charakteristischer Fehler analysiert wird, welcher im erweiterten Wavelet-Spektrum enthalten ist, das auf dem Anzeigemittel 7 angezeigt und vom Bediener ausgewählt worden ist.

Aus obiger Beschreibung geht hervor, dass der erfindungsgemässe Signal-Analysator durch eine Wavelet-Transformation eines sich ändernden Signals, welches den Zustand eines überwachten Objektes angibt, ein Wavelet-Spektrum erzeugt, und die Zeitkoordinate des Wavelet-Spektrums in eine Koordinate der spezifischen Zustandsvariablen transformiert. Daher kann die Korrelation sowie der kausale Zusammenhang zwischen der spezifischen Zustandsvariablen, wie die Position, Geschwindigkeit oder Beschleunigung in einem mechanischen System, und dem Frequenzspektrum auf einfache Weise festgestellt werden. Dies gilt ebenfalls für die zeitliche Änderung des Frequenzspektrums.

Wird irgendein Fehler beim überwachten Objekt gefunden, kann der Fehler folglich analysiert werden, das Analyseergebnis kann physikalisch gesehen auf einfach verständliche Weise dargestellt und die Position des Fehlers im überwachten Objekt kann leicht lokalisiert werden.

Ausserdem kann der erfindungsgemässen Signal-Analysator eine sich ändernde Spektralverteilung bei einem sich ändernden Zustand analysieren, wobei der Betriebszustand und der innere Zustand des überwachten Objektes sich regelmässig ändern. Das sich ändernde Signal kann sehr wirksam analysiert werden und demzufolge können auch kleine, fragmentierte Daten wirksam analysiert werden.

Modifikation

Fig. 4 zeigt eine weitere Variante des erfindungsgemässen Signal-Analysator. Der abgeänderte Signal-Analysator erstellt Zustandsvariations-Funktionsdaten $\{z(t_1), z(t_2), \dots, z(t_N)\}$, welche in die Zeit-Zustands-Umwandlungstabelle 4 zu schreiben sind, indem das Zustand-Schätzungsmittel 6 auf Grund der gemessenen Daten eine Zustandsvariable schätzt, die sich von der spezifischen Zustandsvariable z unterscheidet.

Dieses Verfahren zur Erlangung der Zustandsvariations-Funktionsdaten ist sehr geeignet, wenn eine direkte Messung der spezifischen Zustandsvariablen z nicht möglich ist.

Bei dieser Änderung schätzt das Zustands-Schätzungsmittel 6 die zeitliche Änderung der spezifischen Zustandsvariablen z aus den gemessenen Daten in einem Echtzeit-Modus (real-time-mode) auf der Basis des dynamischen charakteristischen Modells des überwachten Objektes, um so die Zustandsvariations-Funktionsdaten $\{z(t_1), z(t_2), \dots, z(t_N)\}$ zu erhalten.

Gemäss Fig. 4 ist dieses Zustands-Schätzungsmittel in der Lage, eine spezifische Zustandsvariable $z(t)$, die nicht direkt gemessen werden kann, in einem real-time-mode zu schätzen, indem eine geschätzte Zustandsvariable eines Output-Signal-Schätzungsmodells 11 durch ein Korrekturmittel 12 für den geschätzten Zustand und anhand eines geschätzten Fehlersignals $\varepsilon(t)$ sukzessive korrigiert wird, das heisst, der Unterschied zwischen einem geschätzten Outputsignal $\hat{y}(t)$ aus dem Output-Signal-Schätzungsmodell 11, wenn ein Inputsignal $u(t)$ zum überwachten Objekt 10 zum Output-Signal-Schätzungsmodell 11 geliefert wird, und einem wirklichen Outputsignal $y(t)$.

Wird ein Kalman-Filter oder ein Zustandsbeobachter-System als Zustands-Schätzungsmittel 6 verwendet, lässt sich das Output-Signal-Schätzungsmodell darstellen durch die Formeln (6) und (7) und das Korrekturmittel 12 für den geschätzten Zustand durch die Formel (8):

$$z(k|k-1) = Az(k-1|k-1) + Bu(k-1) \quad (6)$$

$$\hat{y}(k|k-1) = Cz(k|k-1) \quad (7)$$

$$z(k|k) = z(k|k-1) + K(y(k) - \hat{y}(k|k-1)) \quad (8)$$

Dabei sind A, B und C Koeffizienten-Matrizen, die sich auf das dynamische charakteristische Modell des überwachten Objektes beziehen, und K ist der Kalman-Verstärkungsfaktor (oder der Verstärkungsfaktor des Zustandsbeobachter-Systems).

Ein interner Zustandsvariablen-Vektor $z(k|k)$ des überwachten Objektes kann aus einer Reihe von Beobachtungsdaten des Inputsignals $u(k)$ zum überwachten Objekt und aus den Outputsignalen $y(k)$ durch sukzessive Berechnung ermittelt werden.

Einige Elemente des derart geschätzten Zustandsvariablenvektors werden als spezifische Zustandsvariable z herausgenommen und die Zeit-Zustands-Umwandlungstabelle 4 wird hergestellt aus den Zeitreihen $\{z(t_1), z(t_2), \dots, z(t_N)\}$ der spezifischen Zustandsvariablen z .

Die Zustandsvariable kann vorher in einem off-line-Modus oder im real-time-Modus während der Beobachtung der Daten geschätzt werden.

Aus der vorhergehenden Beschreibung ist ersichtlich, dass bei dieser Variante das Verhältnis der spezifischen Zustandsvariablen z und dem Spektrum der beobachteten Daten mittels des Zustands-Schätzungsmittels 6 geschätzt werden kann, sogar wenn die spezifische Zustandsvariable z nicht direkt messbar ist. Eine analytische Methode kann auf einfache Art und Weise mit der analytischen Wavelet-Methode kombiniert werden.

Beispiel 1

Ein Signal-Analysator für ein sich änderndes Signal gemäss der Erfindung wird in Beispiel 1 bei einem Aufzug, d.h. bei einem mechanischen System, das das zu überwachende Objekt darstellt, verwendet, wie anhand der Fig. 5 bis 15 beschrieben wird.

Das durch den Signal-Analysator zu analysierende sich ändernde Signal ist in Beispiel 1 ein Beschleunigungssignal, welches die Beschleunigung einer Aufzugskabine darstellt, und die spezifische Zustandsvariable, welche bei der nichtlinearen Transformation verwendet werden soll, ist die vertikale Position oder die Geschwindigkeit der Kabine in vertikaler Richtung.

Der Aufzug nach Fig. 5, d.h. das zu überwachende Objekt, weist einen Motor 51, Scheiben 52a, 52b, 52c und 52d, einen Kabinenrahmen 53, eine Kabine 54, Führungsrollen 55, Führungsschienen 56 und ein Gegengewicht 57 auf.

Wie in Fig. 6 dargestellt ist, verfügt der Signal-Analysator über einen Beschleunigungssensor 20, der in der Kabine 54 angebracht ist. Ein Beschleunigungssignal, welches eine gemessene Beschleunigung wiedergibt und vom Beschleunigungssensor 20 stammt, wird einem A/D-Wandler 21 zugeführt, der es in ein entsprechendes digitales Signal umwandelt und einer Analyse- und Anzeigeeinheit 22, beispielsweise einem Computer, zuführt. Der Beschleunigungssensor 20 und der A/D-Wandler 21 bilden das Antwortdaten-Messmittel 1 nach Fig. 1. Die Analyse- und Anzeigeeinheit 22 führt das Verfahren nach Fig. 1 durch, berechnet ein erweitertes Wavelet-Spektrum und zeigt dieses auf seinem Bildschirm. Das Resultat der Analyse oder der Fehlerdiagnose wird durch Modem 23 und einem öffentlichen Daten Netzwerk zu einer Remote-Überwachungsstation übermittelt. Das Resultat wird in einem zentralen Überwachungsterminal der Überwachungsstation angezeigt und, falls ein Fehler vorliegt, wird ein Alarmsignal ausgelöst.

Fig. 7 zeigt das Verfahren, welches von der Analyse- und Anzeigeeinheit 22 ausgeführt wird. Der Beschleunigungssensor 20 gibt in einem ersten Schritt ein Kabinen-Beschleunigungssignal $x(t)$ ab, welches der gemessenen Beschleunigung der Kabine 54 entspricht. In einem zweiten Schritt wird ein Wavelet-Spektrum $wt(a, b)$ anhand des Kabinen-Beschleunigungssignals $x(t)$ mit den Formeln (2) und (3) berechnet.

Danach wird in einem 3. Schritt das Wavelet-Spektrum $wt(a, b)$ oder $wt(\omega, b)$, wobei $\omega = a^{-1}$ die Frequenz des Wavelet-Spektrums darstellt, auf einem Display als Grafik mit einer Zeit- und einer Frequenzachse gezeigt. In einem 4. Schritt wählt die Bedienungsperson (Operator) die Geschwindigkeit oder die Position der Kabine 54 als spezifische Zustandsvariable. Im 4. Schritt können beide Schritte für die Geschwindigkeit und für die Position der Kabine 54 automatisch gewählt werden.

Wird im 4. Schritt die Position der Kabine 54 als spezifische Zustandsvariable gewählt, wird in einem 5. Schritt das Beschleunigungssignal $x(t)$ zweimal in Bezug auf t integriert, um ein Kabinen-Positionssignal $p(t)$ zu erhalten. Eine Funktionstabelle, welche die Beziehung zwischen der Zeit t und der Position p angibt, wird in einem 6. Schritt anhand der Positionsdaten $\{p(t_1), p(t_2), \dots, p(t_N)\}$ der Positionssignale $p(t)$ der Kabine erhalten.

Dann wird anhand der Funktionstabelle gemäss dem 6. Schritt die im 2. Schritt berechnete Zeitkoordinate des Wavelet-Spektrums in eine Koordinate der Kabinenposition p umgewandelt, um ein erweitertes Wavelet-Spektrum $wt(\omega, p)$ in einem 7. Schritt zu erhalten. In einem 8. Schritt erscheint das erweiterte Wavelet-Spektrum $wt(\omega, p)$, das Resultat der Analyse, auf einem Anzeigemittel.

In einem 9. Schritt wird die Änderungsrate im Powerspektrum bezüglich der Kabinenposition p berechnet, indem das erweiterte Wavelet-Spektrum $wt(\omega, p)$ und die unten aufgeführte Formel (9) verwendet werden. Die Änderungsrate wird geprüft, um festzustellen, ob sie grösser ist als ein Grenzwert, und es wird entschieden, ob das Powerspektrum sich plötzlich mit der Position p der Kabine geändert hat.

$$|wt(\omega, p(t_i)) - wt(\omega, p(t_{i+1}))| / |p(t_i) - p(t_{i+1})| > \varepsilon_p \quad (9)$$

Wenn im 9. Schritt entschieden worden ist, dass sich das Powerspektrum plötzlich geändert hat, wird eine Kabinenposition $p(t_i)$, bei welcher das Powerspektrum sich plötzlich geändert hat, detektiert und es

erscheint in einem 10. Schritt eine Warnung auf dem Bildschirm, welche auf eine Störung bei den Führungsschienen 56 oder beim Kabel hinweist. Wird im 9. Schritt entschieden, dass sich das Powerspektrum nicht plötzlich geändert hat, erscheint auf der Anzeige in einem 11. Schritt die Mitteilung «Normal» und das Diagnose-Verfahren wird beendet oder der Signal-Analysator bleibt bis zum nächsten Analyse-Zyklus im Stand-by-Betrieb.

- 5 Wird im 4. Schritt die Kabinengeschwindigkeit $v(t)$ als Zustandsvariable gewählt, wird in einem 12. Schritt durch einmalige Integration des Kabinenbeschleunigungssignals $x(t)$ ein Kabinengeschwindigkeitssignal $v(t)$ erhalten. Eine Funktionstabelle, welche den Zusammenhang zwischen der Zeit t und der Geschwindigkeit v anzeigt, wird in einem 13. Schritt anhand von Kabinengeschwindigkeits-Daten $\{v(t_1), v(t_2), \dots, v(t_N)\}$, welche die Geschwindigkeitssignale $v(t)$ darstellen, erstellt.
- 10 Nun wird anhand der im 13. Schritt erstellten Funktionstabelle die Zeitkoordinate der im 2. Schritt berechneten Wavelet-Spektrumsdaten in die Koordinate der Kabinengeschwindigkeit v transformiert, um in einem 14. Schritt ein erweitertes Wavelet-Spektrum $wt(\omega, v)$ zu bilden. In einem 15. Schritt wird das erweiterte Wavelet-Spektrum $wt(\omega, v)$, das heisst das Resultat der Analyse, auf einer Anzeige dargestellt.
- 15 Die Spektrum-Daten $|wt(\omega, v)|$ werden mit dem Grenzwert verglichen nach der Formel

$$|wt(\omega_i, v_i)| > \varepsilon v \quad (10)$$

- um den Datenanteil des Powerspektrums, welcher den Grenzwert überschreitet, auszuwählen: (Peakwert-Spektrum) $\{wt(\omega_1, v_1), wt(\omega_2, v_2), \dots, wt(\omega_m, v_m)\}$.
- 20 Unter der Annahme, dass die Beziehung zwischen der Frequenz ω und der Kabinengeschwindigkeit v sich durch folgende Proportionalität (11) ausdrücken lässt:

$$v_i = r\omega_i + e_i \quad (11)$$

- 25 ist die nachfolgende kleinste QuadratLösung des Koeffizienten r , welche die Fehlerquadratsumme e_i d.h. $\sum e_i^2$, minimiert, bestimmt durch

$$r = \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i v_i}{\sum_{i=1}^m \omega_i^2} \quad (12)$$

- 35 Falls eine Diskriminante:

$$\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{|v_i - r\omega_i|^2}{1 + r^2} < \varepsilon r \quad (13)$$

- 45 für eine Abweichung bei einem Abstand d von einer geraden Linie Ausdruck (11) erfüllt, das heisst den proportionalen Ausdruck für die Datenpunkte $\{(\omega_1, v_1), (\omega_2, v_2), \dots, (\omega_m, v_m)\}$, so wird in einem 16. Schritt entschieden, dass die Geschwindigkeit v und die Frequenz ω stark miteinander korrelieren; es wird entschieden, dass sich die Geschwindigkeit v und die Frequenz ω proportional zueinander verhalten.

- In diesem Fall wird entschieden, dass ein Fehler bei einem der rotierenden Teile, beispielsweise beim Motor 51, den Scheiben 52a, 52b, 52c und 52d, den Lagern und den Führungsrollen 55 vorliegt, weil die Frequenz der Änderung des Drehmomentes, erzeugt durch die Exzentrizität des sich drehenden Teiles, proportional der Drehgeschwindigkeit des sich drehenden Teiles ist, und die Kabinengeschwindigkeit proportional zur Drehgeschwindigkeit ist.

- Der fehlerhafte rotierende Teil lässt sich anhand des Koeffizienten r herausfinden und die Information wird auf der Anzeige in einem 17. Schritt angezeigt. Ist beispielsweise $r/2\pi$ gleich dem Radius der Scheibe, lässt sich gemäss der Formel (14) schliessen, dass der Grund des Fehlers in der Änderung des Drehmomentes liegt, verursacht durch die Exzentrizität der Scheibe.

$$\text{Kabinengeschwindigkeit} = 2\pi (\text{Radius der Scheibe}) \times (\text{Drehfrequenz der Scheibe}) \quad (14)$$

- 60 Wird im 16. Schritt entschieden, dass die Geschwindigkeit v und die Frequenz ω nicht korrelieren, wird im 11. Schritt auf der Anzeige «Normal» angezeigt, das Diagnoseverfahren wird beendet oder der Signal-Analysator verbleibt bis zum nächsten Analysezyklus in einem Stand-by-Modus.
- Der 6. Schritt, mit welchem das Mittel 3 zur nichtlinearen Zeitkoordinaten-Transformation eine Prozedur ausführt, oder eine Koordinatentransformation gemäss dem 13. Schritt werden nachfolgend beschrieben.
- 65

In der folgenden Beschreibung wird an Stelle des Signals des Kabinenpositionsvariablen $p(t)$ oder des Signals der Kabinengeschwindigkeit $v(t)$ ein Signal einer Zustandsvariablen $z(t)$ verwendet, und es wird vorausgesetzt, dass eine Funktionstabelle, das heisst die Zeit-Zustands-Umrechnungstabelle 4 mit dem Datenstring $\{z(t_1), z(t_2), \dots, z(t_N)\}$ vorher aufgestellt worden ist.

Die mittels der normalen Wavelet-Transformation gewonnenen Daten entsprechen

$$wt(a, b) = \{wt(a_i, b_j) \mid i = 1, \dots, n1, j = 1, \dots, n2\} \quad (15)$$

Setzt man $\omega = a^{-1}$ in der Formel (15), so erhält man:

$$wt(\omega, b) = \{wt(\omega_i, b_j) \mid \omega_i = a_i^{-1}, i = 1, \dots, n1, j = 1, \dots, n2\} \quad (16)$$

Die zugehörige Zustandsvariable $z(b_j)$ erhält man, wenn man t_k aus:

$$t_k \leq b_j \leq t_{k+1} \quad (17)$$

wählt, mit $\{t_1, t_2, \dots, t_N\}$ für die Zeitkoordinate der Datenelemente, und Gleichung (18) für eine lineare Interpolation zur Bestimmung eines erweiterten Wavelet-Spektrums, dargestellt durch Gleichung (19) verwendet.

$$\begin{aligned} z(b_j) &= z(t_k) + \frac{b_j - t_k}{t_{k+1} - t_k} (z(t_{k+1}) - z(t_k)) \\ &= \frac{(b_j - t_k)z(t_{k+1}) + (t_{k+1} - b_j)z(t_k)}{t_{k+1} - t_k} \end{aligned} \quad (18)$$

$$wt(\omega, z) = \{wt(\omega_i, z(b_j)) \mid \omega_i = a_i^{-1}, i = 1, \dots, n1, j = 1, \dots, n2\} \quad (19)$$

Eine andere Methode schätzt die Funktion $z(t)$ aus der Zeit-Zustands-Umwandlungstabelle 4. Beispielsweise wird ein Polynom:

$$z(t) = z_0 + z_1 t + \dots + z_p t^p \quad (20)$$

angenommen, und die Koeffizienten $z_0, z_1, \dots, z_p$ werden aus den Daten $\{z(t_1), z(t_2), \dots, z(t_N)\}$ durch eine kleinste Fehlerquadratmethode geschätzt, um dann die inverse Funktion $t(z)$ nach Ausdruck (20) zu erhalten. Schliesslich wird mit den gemessenen Daten, welche das Signal einer Kabinenbeschleunigung $x(t)$ darstellen, eine Berechnung gemäss der Formel (21) für numerische Integration durchgeführt, um ein erweitertes Wavelet-Spektrum zu erhalten

$$wt(a, b) = \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{1}{\sqrt{|a|}} \phi\left(\frac{t(z) - b}{a}\right) x(t(z)) \frac{dt(z)}{dz} dz \quad (21)$$

45

Die Fig. 8a bis 15 zeigen die Resultate einer Analyse eines Beschleunigungssignals, welche von dem in der Kabine 54 eines Aufzuges angebrachten Beschleunigungssensor 20 abgegeben worden ist, wobei die Analyse mit dem Signal-Analysator gemäss der Erfindung durchgeführt worden ist.

Die Fig. 8a bis 12 zeigen Daten für den Fall, dass die Kabine 54 Vibrationen erzeugt hat, welche durch ein ungleichmässiges Drehmoment infolge der Exzentrizität der Abtriebswelle des Aufzugsmotors 51 verursacht worden ist. Der Graph nach Fig. 8a zeigt das erforderliche Ausgangsdrehmoment des Motors 51, Fig. 8b zeigt das Signal der Kabinengeschwindigkeit $v(t)$, welches aus einer Integration des Kabinen-Beschleunigungs-Signals $x(t)$ geschätzt worden ist, und Fig. 8c zeigt das Kabinen-Positionssignal $p(t)$, welches aus einer zweimaligen Integration des Kabinen-Beschleunigungssignals $x(t)$ geschätzt worden ist.

Wie in Fig. 9a gezeigt ist, ist das Beschleunigungssignal $x(t)$, welches von dem an der Kabine 54 befestigten Beschleunigungssensor 20 erhalten wird, ein sich änderndes Signal, bei welchem sich die Frequenzcharakteristik mit der Geschwindigkeit ändert, da sich die Frequenz des infolge der Exzentrizität der Abtriebswelle des Motors 51 ungleichmässigen Drehmomentes proportional zur Kabinengeschwindigkeit ändert, wie Fig. 9b zeigt. Deshalb wird nur eine gesamte Verteilung eines Powerspektrums erhalten, wie in Fig. 9c dargestellt ist und die Abhängigkeit des Geschwindigkeitssignals kann nicht durch eine einfache Fourier-Transformation des Kabinen-Beschleunigungssignals $x(t)$ hergeleitet werden.

Fig. 10 zeigt einen Graph des Resultates der gewöhnlichen Wavelet-Transformation des Kabinen-Beschleunigungssignals $x(t)$, während die Fig. 11a und 11b einen Graph des Kabinen-Beschleunigungssig-

65

nals $x(t)$ basierend auf dem Kabinen-Geschwindigkeitssignals $v(t)$ darstellen. Fig. 12 zeigt einen Graph des Resultates der erweiterten Wavelet-Transformation des Kabinen-Beschleunigungs-Signals $x(t)$ basierend auf dem Signal der Kabinenposition $p(t)$.

Beispielsweise geht aus den Wavelet-Spektren gemäss den Fig. 11a und 11b hervor, dass sich die Peaks der Spektren auf einer Linie befinden, welche das Proportionalverhältnis zwischen dem Kabinen-Geschwindigkeits-Signal $v(t)$ und der Frequenz $\omega = a^{-1}$ darstellt. Es wird deshalb entschieden, dass ein rotierender Teil des Aufzuges defekt ist, und aus dem proportionalen Verhältnis zwischen der Geschwindigkeit und der Frequenz lässt sich schliessen, dass die Abtriebswelle des Motors 51 einen Fehler aufweist.

Die Fig. 13a bis 15 zeigen die Resultate der Analyse des sich ändernden Signals für den Fall, dass ein Fehler bei den Führungsschienen 56 des Aufzuges vorliegt. Die Fig. 13a, 13b und 13c zeigen das Ausgangsdrehmoment des Motors 51 respektive ein Geschwindigkeitssignal $v(t)$ der Kabine und ein Positionssignal $p(t)$ der Kabine. Die Fig. 14a und 14b zeigen ein Signal der Kabinenbeschleunigung $x(t)$ respektive ein Powerspektrum, welches durch die Fourier-Transformation des Beschleunigungssignals $x(t)$ der Kabine erhalten worden ist.

In diesem Fall ist eine Stufe an der Verbindungsstelle der Führungsschiene 56 auf einer Höhe von etwa 10,7 m vorhanden, und die sich nach oben bewegend Kabine beginnt hier infolge einer von der Stufe herrührenden externen Kraft in der Führungsschiene 56 zu vibrieren.

Anhand der Fourier-Transformation nach Fig. 14b ist es nicht möglich festzustellen, was die auf die Kabine wirkende externe Kraft verursacht hat.

Fig. 15 zeigt ein Wavelet-Powerpektrum, welches durch eine erweiterte Wavelet-Transformation des Kabinenbeschleunigungs-Signals $x(t)$ bezüglich des Kabinenpositions-Signals $p(t)$ erhalten worden ist. Wie in Fig. 15 dargestellt ist, ist eine abrupte Änderung in einem Teil des Spektrums erkennbar, welcher einem Wert von $p = 10,7$ Meter auf der Kabinen-Positionsachse entspricht, und es ist bekannt, dass an dieser Stelle ein Fehler an der Führungsschiene 56 vorliegt, die mit der Position $p = 10,7$ m der Kabine 54 übereinstimmt.

Wie aus der vorgehenden Beschreibung hervorgeht, wird das Beschleunigungssignal der Kabine 54 erfindungsgemäss einer erweiterten Wavelet-Transformation bezüglich der Kabinengeschwindigkeit unterworfen. Die Änderung des Ausgangsdrehmomentes des Motors 51 lässt sich feststellen aus dem proportionalen Verhältnis der Frequenz der Peaks im erweiterten Wavelet-Spektrum und der Kabinengeschwindigkeit, und der Radius des fehlerhaften rotierenden Teils lässt sich aus der Proportionalitätskonstanten schätzen.

Auf gleiche Weise lassen sich aus Änderungen im erweiterten Wavelet-Spektrum, welches durch die erweiterte Wavelet-Transformation des Kabinenbeschleunigungssignals unter Berücksichtigung der Kabinenposition erhalten worden ist, Fehler bei den Führungsschienen 56 und dem Kabel lokalisieren.

Folglich erhöht die Erfindung die Wirksamkeit der Überwachung und beim Unterhalt eines Aufzuges erheblich. Eine genaue Analyse und Feststellung eines Fehlers ist möglich, sogar wenn sich die Kabine über kurze Distanzen bewegt und nur wenige Messdaten zur Verfügung stehen.

Wird die Erfindung für die Überwachung eines Aufzugssystems eingesetzt, kann die Korrelation zwischen der Kabinenposition, lokalisiert durch das im Beschleunigungssignal enthaltene Vibrationsspektrum, und der Kabinengeschwindigkeit auf eindeutige Weise festgestellt werden und Fehler können auf einfache Weise aufgespürt werden.

Beispiel 2

Im Beispiel 2 wird anhand der Fig. 16 und 17 die Verwendung des erfindungsgemässen Signalanalyzers bei der Überwachung eines Eisenbahnwagens als überwachtes Objekt beschrieben. Manchmal generiert der Eisenbahnwagen infolge abgenutzter Räder oder infolge verdrehter, gekrümmter oder verzogener Schienen anormale Vibrationen und Geräusche, was den Fahrkomfort beeinträchtigt, die Passagiere verärgert und zu Unfällen führen kann. Nachfolgend wird ein Signal-Analysator für ein sich änderndes Signal beschrieben, welcher in einem Fehlererkennungssystem eines Eisenbahnwagens integriert ist.

Fig. 16 zeigt ein Block-Diagramm des Signal-Analysator und Fig. 17 zeigt die Anordnung des Signal-Analysators im Eisenbahnwagen.

Der Signal-Analysator gemäss Fig. 16 ist nach dem Beispiel 2 mit einem Antwortdaten-Messmittel 1, mit einem Beschleunigungssensor 30 und einem Akustiksensoren 31 versehen, welche im Eisenbahnwagen 32 angeordnet sind, wie in Fig. 17 dargestellt ist. Die Output-Signale des Beschleunigungssensors 30 und des Akustiksensors 31, welche als Antwortdaten-Messmittel 1 dienen, werden an das Wavelet-Transformations-Berechnungsmittel 2 weitergeleitet. Das Wavelet-Transformations-Berechnungsmittel 2 transformiert das Output-Signal des Beschleunigungssensors 30 und des Akustiksensors 31 in Wavelet-Spektren.

Der Eisenbahnwagen 32 ist mit einem Positionssensor 33 und einem Encoder 34 versehen, wie in Fig. 17 dargestellt ist. Der Positionssensor 33 erkennt Abstandsmarkierungen 35, die an der Strecke angebracht sind. Der Encoder 34 ist mit einem Rad des Eisenbahnwagens 32 verbunden und zeigt die Rotation des Rades an. Wie Fig. 16 zeigt, ist der Signal-Analysator mit einem Geschwindigkeits-

und-Positions-Detektionsmittel 36 versehen, welches die Reisegeschwindigkeit und die Position feststellt, d.h. die spezifischen Eigenschaften des Zuges auf Grund der Signale des Positionssensors 33 und des Encoders 34, und welches Zeit-Positionsdaten oder Zeit-Geschwindigkeitsdaten angibt. Die Zeit-Positionsdaten oder die Zeit-Geschwindigkeitsdaten sind in der Zeit-Zustands-Umwandlungstabelle 4 gespeichert.

Das von den Wavelet-Transformations-Berechnungsmitteln 2 berechnete Wavelet-Spektrum wird an die Mittel 3 zur nichtlinearen Zeitkoordinations-Transformation weitergeleitet. Diese transformieren die Zeitkoordinate des Wavelet-Spektrums anhand der Zeit-Positionsdaten oder der Zeit-Geschwindigkeitsdaten in eine Positionsordinate oder in eine Geschwindigkeitsordinate, um damit ein erweitertes Wavelet-Spektrum zu schaffen.

Das Resultat der Transformation durch das Mittel 3 der nichtlinearen Zeitkoordinaten-Transformation wird an das Fehler-Erkennungsmittel 8 weitergeleitet. Dieses prüft das Resultat der Transformation, um zu entscheiden, ob beim Eisenbahnwagen 32 ein Fehler vorliegt oder nicht.

Beim Feststellen des Zustandes des Eisenbahnwagens 32 durch ein Betriebszustand-Bestimmungsmittel vergleicht das Fehler-Erkennungsmittel 8 das erweiterte Wavelet-Spektrum bezüglich der Lage und der Frequenz mit einem erweiterten Referenz-Wavelet-Spektrum, welches vorgängig unter normalen Bedingungen erhalten worden ist. Es entscheidet, wenn die Differenz zwischen dem erweiterten Wavelet-Spektrum und dem erweiterten Referenz-Wavelet-Spektrum nicht kleiner als ein Grenzwert ist, dass bei der Schiene etwas fehlerhaft ist, und lokalisiert den Defekt in der Schiene.

Wird der Zustand des Eisenbahnwagens 32 durch ein anderes Betriebszustand-Bestimmungsmittel festgestellt, so prüft das Fehler-Erkennungsmittel 8 den Zustand des Eisenbahnwagens 32, indem es das erweiterte Wavelet-Spektrum in Bezug auf die Geschwindigkeit und Frequenz mit einem erweiterten Referenz-Wavelet-Spektrum vergleicht, welches vorgängig unter normalen Bedingungen erstellt worden ist, und beschliesst, falls die Differenz zwischen den beiden nicht kleiner ist als ein Grenzwert, dass mit den Rädern etwas nicht stimmt und findet das defekte Rad heraus.

Das erweiterte Referenz-Wavelet-Spektrum, das einen normalen Betriebszustand darstellt und welches als Kriterium verwendet wird zur Bestimmung, ob ein Betriebszustand des Eisenbahnwagens 32 normal ist oder nicht, ist vorher anhand von Daten aufgenommen worden, welche einen normalen Betriebszustand des Eisenbahnwagens 32 darstellen.

Das Resultat der Prüfung durch das Fehler-Erkennungsmittel 8 wird an das Fehleranzeigemittel 9 (welches sowohl anzeigt als auch warnt) weitergeleitet. Wird am Eisenbahnwagen 32 ein Fehler festgestellt, wird die Bedienungsperson durch das Fehleranzeigemittel 9 gewarnt. Informationen über das Resultat der durch das Fehler-Erkennungsmittel 8 durchgeführten Prüfung wird über eine Leitung oder über Radiokommunikationsmittel 37 auf das Empfangsmittel 38 übertragen, welches in einem zentralen Zug-Kontrollzentrum angeordnet ist, und die Information wird dort auf einem Anzeigemittel 7 sichtbar gemacht.

Obwohl der Signal-Analysator nach Beispiel 2 für einen real-time-Modus ausgelegt ist, kann es aber auch in einem off-line-Modus betrieben werden.

Obwohl der Signal-Analysator gemäss Beispiel 2, das heisst ein Fehlerdiagnosesystem, im Eisenbahnwagen untergebracht ist, kann er auch ausserhalb desselben angeordnet sein, wobei der Beschleunigungssensor 30 und der Akustiksensoren 31 auf dem Gleis angebracht sind.

Beispiel 3

Ein Signal-Analysator nach der Erfindung wird im Beispiel 3 als allgemeines Fehler-Diagnosesystem verwendet, um Fehler in einem allgemeinen zu überwachenden Objekt zu analysieren. Er wird im Folgenden anhand der Fig. 18 bis 21 beschrieben. Der Signal-Analysator für ein sich änderndes Signal gemäss Beispiel 3 ist ein tragbares Analysegerät oder ein tragbares Fehlerdiagnosegerät, welche mit Sensoren, arithmetischen Mitteln und einem Anzeigemittel versehen sind.

Fig. 18 ist eine perspektivische Darstellung des Signal-Analysators 40 nach Beispiel 3, das heisst eines allgemein einsetzbaren Diagnosegerätes, und Fig. 19 ist ein Blockdiagramm der inneren Konfiguration des Signal-Analysators 40. Bezug nehmend auf die Fig. 18 und 19 weist der Signal-Analysator 40 eine Anzeigeeinheit 41 für die Anzeige eines erweiterten, durch die Analyse erhaltenen Wavelet-Spektrums auf. Die Bedienungsperson kann mithilfe eines Anzeigeelementes 42 in Form einer elektronischen Feder oder einer Maus einen bestimmten Teil des Bildschirms spezifizieren.

Der Signal-Analysator 40 ist mit einem internen Beschleunigungssensor 43, d.h. einem Antwortdaten-Messmittel, und mit einem Input-Terminal 44 für externe Signale versehen. Ein Beschleunigungssignal aus Beschleunigungssensor 43 und ein durch das Input-Terminal 44 erhaltene externe Signal werden einer zentralen Prozesseinheit (central processing unit: CPU) 45 zugeleitet. Die von den Sensoren gelieferten Informationen werden in einem Speicher 46, der mit dem CPU 45 verbunden ist, gespeichert. Der CPU 45 führt Operationen für eine erweiterte Wavelet-Transformation durch.

Fig. 20 zeigt anhand eines Beispiels ein erweitertes Wavelet-Spektrum, wie es auf dem Bildschirm der Anzeigeeinheit 41 erscheint. Die spezifische Zustandsvariable, wie die Position oder die Geschwindigkeit des überwachten Objekts ist auf der horizontalen Achse angegeben, die Frequenz auf der vertikalen Achse und die Grösse der Potenz des erweiterten Wavelet-Spektrums durch Umrisslinien darge-

stellt ist. Die Grösse der Potenz des erweiterten Wavelet-Spektrums kann durch Farben angegeben sein.

Die Bedienungsperson bestimmt mithilfe der elektronischen Feder oder mit einer Maus Umrisslinien, um einen spezifischen Bereich einer optionalen Form auf dem Bildschirm abzugrenzen. Anschliessend wird ein Wert, welcher durch das abgegrenzte Gebiet des erweiterten Wavelet-Spektrums dargestellt wird, herausgenommen und einem Fehlererkennungsverfahren unterworfen. Das Fehler-Erkennungsverfahren kann unter der Annahme durchgeführt werden, dass die Werte der übrigen Gebiete des Spektrums gleich null sind.

Das Fehler-Erkennungsverfahren wird anhand der Fig. 21 erläutert, wobei 47 das Gebietsdefinitionsmit-
tel inklusive dem Anzeigeelement 42 ist und 48 das Daten-Extraktionsmittel zur Extraktion der Daten
des abgegrenzten Gebietes der erweiterten Wavelet-Transformation oder zur Nullsetzung von Teilen
des erweiterten Wavelet-Spektrums in Gebieten, welche nicht das abgegrenzte Gebiet sind.

Die so behandelten Daten werden dem Fehlererkennungsmit-
tel 8 zugeleitet, welches die Operationen
gemäss den Formeln (12) und (13) durchführt, um zu entscheiden, ob ein Fehler beim überwachten Ob-
jekt vorliegt oder nicht. Das Anzeigemittel 7 zeigt das Resultat der Entscheidung des Fehlererkennungs-
mittels 8 an. An Stelle des Anzeigemittels 7 kann auch die Anzeigeeinheit 41 benützt werden.

Da ein Teil des erweiterten Wavelet-Spektrums, welches von der Anzeigeeinheit 41 angezeigt wird,
durch das Gebietsdefinitionsmit-
tel 47 und das Datenextraktionsmittel 48 spezifiziert und herausgezogen
werden kann, ist es der Bedienungsperson möglich, einen Teil des auf dem Bildschirm 41 dargestellten
Wavelet-Spektrums festzulegen, welcher sich vom Normalzustand unterscheidet, um diesen vom Fehler-
erkennungsmit-
tel 8 untersuchen zu lassen. Dementsprechend kann eine Fehlererkennung mit einer er-
höhten Genauigkeit erhalten werden, welche nicht von Rauschsignalen oder anderen Störungen aus
den nicht ausgewählten Gebieten beeinträchtigt ist.

Aus obiger Beschreibung geht hervor, dass der erfindungsgemässe Signal-Analysator im Stande ist,
durch Bestimmung der Abhängigkeit der Frequenzänderung der spezifischen Zustandsvariablen des
überwachten Objektes und der Korrelation zwischen der spezifischen Zustandsvariablen und der Fre-
quenzänderung, Fehler in einem überwachten Objekt mit Sicherheit festzustellen.

Die zweite Ausführung

In einer bevorzugten zweiten Ausführung ist ein Datenträger zur Speicherung eines erfindungsgemäs-
sen Analyseprogrammes für sich ändernde Signale anhand der Fig. 22 und 23 beschrieben.
Der Datenträger zur Speicherung des Signal-Analyseprogramms ist ein computerlesbares Speichermedi-
um.

Das Analyseprogramm für sich ändernde Signale sorgt dafür, dass der Computer die Funktionen des
Wavelet-Transformation-Berechnungsmittels 2, des Mittels 3 für die nichtlineare Zeitkoordinaten-Trans-
formation und das Zustandsvariationsfunktion-Festsetzungsmittel, nämlich die Zeit-Zustands-Umwand-
lungstabelle 4 und das Zustands-Schätzungsmittel 6, ausführt.

Das Analyseprogramm kann ein zusätzliches Programm enthalten, welches den Computer die Funkti-
on des Fehlerdetektions-Mittels 8 ausführen lässt.

Die bei dieser Ausführung vom Programm ausgeführten Analyse-Schritte, deren Modifikationen und die
oben erwähnten Beispiele 1 bis 3 sind dieselben, wie bei der ersten Ausführung beschrieben worden sind.

Fig. 22 zeigt eine perspektivische Darstellung eines Computersystems, welches zum Lesen des auf
dem Datenträger gespeicherten Analyseprogramms gemäss der zweiten Ausführung der Erfindung ver-
wendet wird. Das auf dem Datenträger gespeicherte Programm dieser Ausführung wird durch einen im
Computersystem 50 integrierten Treiber gelesen.

Wie in Fig. 22 gezeigt ist, umfasst das Computersystem 50 einen Computerkörper 51 in einem Gehä-
use 51, beispielsweise einen Minitower oder Ähnlichem, Anzeigemittel 52, wie beispielsweise ein CRT
(Kathodenstrahlröhre), ein Plasmabildschirm, ein LCD-Display (Liquid Crystal) oder Ähnliches, einen
Drucker 53 zum Aufzeichnen, eine Tastatur 54a und eine Maus 54b als Eingabemittel, ein Disket-
ten-Laufwerk 56 und ein CD-ROM-Laufwerk 57.

Fig. 23 ist ein Blockdiagramm des Computersystems, welches zum Lesen des Signal-Analysepro-
gramms gemäss der zweiten Ausführung dient. Das den Computerkörper 51 enthaltende Gehäuse ent-
hält ferner einen internen Speicher 55, beispielsweise einen RAM (Random Access Memory) oder Ähn-
liches, und einen externen Speicher, beispielsweise eine Harddisk-Einheit 58 oder Ähnliches.

Wie Fig. 22 zeigt, wird die Diskette 61 mit dem Analyseprogramm in den Schlitz des Laufwerkes 56
eingeschoben und anhand eines geeigneten Anwendungsprogramms gelesen. Der Datenträger ist nicht
auf eine Diskette 61 beschränkt und kann ein CD-ROM (Read Only Memory) 62 sein. Der Datenträger
kann auch ein MO (Magneto-Optical) Disc, eine Optical Disc, ein DVD (Digital Versatile Disc), eine Card
Memory, ein Magnetband oder etwas anderes sein.

Industrielle Anwendung

Der Signal-Analysator für sich ändernde Signale und der Datenträger mit dem Analyseprogramm ge-
mäss der Erfindung sind vielseitig anwendbar, um sich ändernde Zustände eines überwachten Objektes,