

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号
特許第4308437号
(P4308437)

(45) 発行日 平成21年8月5日(2009.8.5)

(24) 登録日 平成21年5月15日(2009.5.15)

(51) Int.Cl.

F I

G O 5 B 23/02 (2006.01)

G O 1 D 21/00 (2006.01)

G O 5 B 23/02 3 O 2 V

G O 5 B 23/02 3 O 2 Y

G O 1 D 21/00 Q

請求項の数 4 (全 32 頁)

(21) 出願番号	特願2000-565441 (P2000-565441)	(73) 特許権者	500204511
(86) (22) 出願日	平成10年10月27日 (1998.10.27)		アスペン テクノロジー インコーポレイ
(65) 公表番号	特表2002-522837 (P2002-522837A)		テッド
(43) 公表日	平成14年7月23日 (2002.7.23)		アメリカ合衆国, マサチューセッツ州 O
(86) 国際出願番号	PCT/US1998/022772		1 8 0 3, バーリントン, ホイラー ロ
(87) 国際公開番号	W02000/010059		ード 2 0 0
(87) 国際公開日	平成12年2月24日 (2000.2.24)	(74) 代理人	100087941
審査請求日	平成17年8月24日 (2005.8.24)		弁理士 杉本 修司
(31) 優先権主張番号	60/096, 872	(74) 代理人	100086793
(32) 優先日	平成10年8月17日 (1998.8.17)		弁理士 野田 雅士
(33) 優先権主張国	米国 (US)	(74) 代理人	100112829
前置審査			弁理士 堤 健郎
		最終頁に続く	

(54) 【発明の名称】 センサの性能確認装置および方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

外部のプロセスで使用される複数のセンサについて1つまたは複数の故障を検出する装置であって、

前記プロセスからの外部入力として、前記センサのそれぞれによる時系列的に変化する測定値が個々の要素となっている、測定値のベクトルを受け取り、前記センサのそれぞれについて前記測定値の履歴から求められる平均値および標準偏差に基づいて前記測定値を正規化することにより、前記測定値を正規化した値が個々の要素となっている、前処理されたセンサ値のベクトルを生成するとともに、前記センサのそれぞれについての前記測定値と前記測定値を正規化した値との間の変換のための拡大縮小値およびオフセット値を生成する前処理ユニットと、

その前処理ユニットに結合され、前記前処理されたセンサ値のベクトルに、前記測定値を正規化した値の履歴から主成分分析を用いて求められるモデル行列を乗じることにより、等式エラー値のベクトルに変換するモデルユニットと、

そのモデルユニットに結合され、前記等式エラー値のベクトルに、各行が前記モデル行列の対応する行に直交する変換行列を乗じることにより、前記センサのうちのある1つのセンサの故障を感知せず、他のすべてのセンサの故障を最大限感知する構造化残差値が個々の要素となっている、構造化残差値のベクトルを生成する構造化残差ユニットと、

前記モデルユニットに結合され、前記等式エラー値のベクトルの大きさを自乗して検出インデックスを計算し、その検出インデックスが、検出インデックスに対する信頼限界で

10

20

ある検出しきい値を越える場合に、前記センサに故障のおそれありと検出して検出イベントを生成する検出ユニットと、

前記構造化残差ユニットおよび検出ユニットに結合され、前記検出イベントにより起動されて、前記構造化残差値のそれぞれに対して、正規化され自乗されフィルタ処理された構造化残差、一般化尤度比または正規化された累積寄与率を識別インデックスとして計算し、あるセンサについての識別インデックス以外のすべての識別インデックスが対応する識別しきい値を越える場合に、そのセンサが故障したと識別して識別イベントを生成する識別ユニットと、

前記前処理ユニット、構造化残差ユニットおよび識別ユニットに結合され、前記識別イベントにより起動されて、前記識別ユニットにより故障したと識別されたセンサのそれぞれについて、故障に起因して前記測定値を正規化した値に含まれる値である正規化した故障サイズを、前記識別ユニットにより識別された故障に対応する推定行列を前記等式エラー値のベクトルに適用することにより前記構造化残差ユニットに生成させ、得られた正規化した故障サイズを前記拡大縮小値およびオフセット値に基づいて前記測定値の単位に変換して、故障に起因して前記測定値に含まれる値である故障サイズを推定する推定ユニットと、

その推定ユニットに結合され、前記プロセスからの外部入力として前記測定値のベクトルを受け取り、前記測定値のベクトルから故障の影響を除去するために、前記識別ユニットにより故障したと識別されたセンサのそれぞれについて、前記測定値から前記推定ユニットにより推定された故障サイズを差し引くことにより、前記測定値の代替値を計算して前記プロセスへ供給する代替ユニットとを備え、

前記前処理ユニットが、 i 番目の前記センサについて、下式 (A) および (B) にしたがって前記平均値 μ_i および標準偏差 σ_i から前記拡大縮小値 S_i およびオフセット値 O_i を生成し、下式 (C) にしたがって前記測定値 u_i を前記測定値を正規化した値 x_i に変換する装置。

$$S_i = 1 / \sigma_i \quad (A)$$

$$O_i = \mu_i \quad (B)$$

$$u_i = S_i (x_i - O_i) \quad (C)$$

【請求項 2】

請求項 1 に記載の装置において、

前記推定ユニットに結合され、前記推定ユニットが起動しているときに起動して、前記プロセスからの外部入力として前記測定値のベクトルを受け取り、前記識別ユニットにより故障したと識別されたセンサのそれぞれについて、前記測定値に関する回帰分析および前記推定ユニットにより推定された故障サイズに関する回帰分析を行い、その分析結果に基づいて故障のタイプを分類し、分類した結果を診断情報として当該装置の外部へ供給する分類ユニットを備えた装置。

【請求項 3】

コンピュータを用いて、外部のプロセスで使用される複数のセンサについて 1 つまたは複数の故障を検出する方法であって、

前記プロセスからの外部入力として、前記センサのそれぞれによる時系列的に変化する測定値が個々の要素となっている、測定値のベクトルを受け取り、前記センサのそれぞれについて前記測定値の履歴から求められる平均値および標準偏差に基づいて前記測定値を正規化することにより、前記測定値を正規化した値が個々の要素となっている、前処理されたセンサ値のベクトルを生成するとともに、前記センサのそれぞれについての前記測定値と前記測定値を正規化した値との間の変換のための拡大縮小値およびオフセット値を生成するステップと、

前記前処理されたセンサ値のベクトルに、前記測定値を正規化した値の履歴から主成分分析を用いて求められるモデル行列を乗じることにより、等式エラー値のベクトルに変換するステップと、

前記等式エラー値のベクトルに、各行が前記モデル行列の対応する行に直交する変換行

列を乗じることにより、前記センサのうちのある1つのセンサの故障を感知せず、他のすべてのセンサの故障を最大限感知する構造化残差値が個々の要素となっている、構造化残差値のベクトルを生成するステップと、

前記等式エラー値のベクトルの大きさを自乗して検出インデックスを計算し、その検出インデックスが、検出インデックスに対する信頼限界である検出しきい値を越える場合に、前記センサに故障のおそれありと検出して検出イベントを生成するステップと、

前記検出イベントが発生した場合に、前記構造化残差値のそれぞれに対して、正規化され自乗されフィルタ処理された構造化残差、一般化尤度比または正規化された累積寄与率を識別インデックスとして計算し、あるセンサについての識別インデックス以外のすべての識別インデックスが対応する識別しきい値を越える場合に、そのセンサが故障したと識別して識別イベントを生成するステップと、

10

前記識別イベントが発生した場合に、前記識別イベントを生成するステップで故障したと識別されたセンサのそれぞれについて、故障に起因して前記測定値を正規化した値に含まれる値である正規化した故障サイズを、前記識別イベントを生成するステップで識別された故障に対応する推定行列を前記等式エラー値のベクトルに適用することにより生成し、得られた正規化した故障サイズを前記拡大縮小値およびオフセット値に基づいて前記測定値の単位に変換して、故障に起因して前記測定値に含まれる値である故障サイズを推定するステップと、

前記識別イベントが発生した場合に、前記プロセスからの外部入力として前記測定値のベクトルを受け取り、前記測定値のベクトルから故障の影響を除去するために、前記識別イベントを生成するステップで故障したと識別されたセンサのそれぞれについて、前記測定値から前記故障サイズを推定するステップで推定された故障サイズを差し引くことにより、前記測定値の代替値を計算して前記プロセスへ供給するステップとを備え、

20

前記前処理されたセンサ値のベクトルを生成するとともに、前記拡大縮小値およびオフセット値を生成するステップにおいて、 i 番目の前記センサについて、下式 (A) および (B) にしたがって前記平均値 μ_i および標準偏差 σ_i から前記拡大縮小値 S_i およびオフセット値 O_i を生成し、下式 (C) にしたがって前記測定値 u_i を前記測定値を正規化した値 x_i に変換する方法。

$$S_i = 1 / \sigma_i \quad (A)$$

$$O_i = \mu_i \quad (B)$$

$$u_i = S_i (x_i - O_i) \quad (C)$$

30

【請求項 4】

請求項 3 に記載の方法において、

前記識別イベントが発生した場合に、前記プロセスからの外部入力として前記測定値のベクトルを受け取り、前記識別イベントを生成するステップで故障したと識別されたセンサのそれぞれについて、前記測定値に関する回帰分析および前記故障サイズを推定するステップで推定された故障サイズに関する回帰分析を行い、その分析結果に基づいて故障のタイプを分類し、分類した結果を診断情報として当該方法を使用する装置の外部へ供給するステップを備えた方法。

【発明の詳細な説明】

40

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、一般にプロセス変数を測定するためにセンサを使用するプロセスコントローラおよびプロセス監視システムに関するものである。特に本発明は、1つまたは複数のセンサの故障を検出・識別し、センサの故障のタイプを分類し、エラーのあるセンサ値を正しいプロセス変数値の推定値に代替するシステムに関するものである。

【0002】

【発明の背景】

センサの性能確認は、プロセス工業における多くのモデルをベースとする用途に対する重要なステップである。典型的なモデルをベースとする用途には、モデル予測制御用途 (M

50

P C) および、実験室サンプルまたはハードウェアアナライザから得られるコストがかかるか頻度の少ない測定を、モデルから定期的に得られる推定値に代替する推定検知利用が含まれる。

【 0 0 0 3 】

一般的な M P C 用途では、定常状態最適化を実行して、制御また操作される変数に対する最適目標値を見出す。センサが故障している場合は、最適化した目標値は無効になる。したがって有効なセンサは、たとえ故障しても最良の再構成により制御システムをオンラインに維持する。

【 0 0 0 4 】

代表的な推定センサ用途は、予測排出監視システム (P E M S) の分野である。連邦および / または州の法規は、大気汚染プラントに対し窒素酸化物 (N O x)、酸素 (O ₂) および一酸化炭素 (C O) などの排出を監視することを要求することができる。ハードウェア連続排出監視システム (C E M S) は、イニシャルコストとメンテナンスコストの両者において高い負担が必要である。P E M S に十分に精度と信頼性があることが明らかならば、C E M S を P E M S に置き換えることができる。P E M S に対する品質保証要求事項の一つは、P E M S モデルに使用している各センサの故障の有無を監視すること、およびセンサの故障を処理する方策をもち運転の中断時間を最小にすることである。

【 0 0 0 5 】

センサの性能確認の用語は、本特許出願中では多変量モデルベースのセンサの性能確認を指す。これは、プラントの測定に冗長度を使用する方法である。通常センサの測定値は、収集されたまたは過去のデータを用いる訓練手順法により確立できる相関構造を示す。この相関構造はオンラインで監視でき、相関構造が破壊されたときは、センサ故障が既に発生している可能性がある。しかし、この相関構造の破壊は、プロセスの反転、プロセスの過渡現象、またはセンサの故障に関係のない他の理由によることもある。主たる目的は、これが真にセンサの故障であるかどうかを判断し、故障であれば異常センサを識別することである。センサの性能確認の各種の段階は、以下のように要約できる。

【 0 0 0 6 】

- ・ 検出 この段階は、相関構造における変化を検出する。これは、センサの故障によるか、またはそうでないこともある
- ・ 識別 この段階は、これがセンサの故障であるかどうかを判断し、特定のセンサを識別する
- ・ 推定 この段階は、真の値の再構成ができ、故障値の置換ができる故障のサイズを推定する。
- ・ 分類 この段階は、センサの故障のタイプ 完全な故障、バイアス、ドリフト、または精度劣化 を分類する。

特定の方法によっては、これらの段階はオーバーラップすることもある。多変量モデルをベースとするセンサの性能確認の主題を対象とするいくつかの特許が交付されている。その主要なものは次の通りである：

- ・ Qinその他、米国特許第 5 , 6 8 0 , 4 0 9 号、“Method and Apparatus for detecting and identifying faulty sensors in a process (プロセス中の故障センサ検出および識別の方法と装置) ”
- ・ Keelerその他、米国特許第 5 , 5 4 8 , 5 2 8 号、“Virtual Continuous Emission Monitoring System (仮想連続排出監視システム) ”
- ・ Hopkinsその他、米国特許第 5 , 4 4 2 , 5 6 2 号、“Method of controlling a manufacturing process using multivariate analysis (多変量解析を利用した製造プロセス制御の方法) ”

【 0 0 0 7 】

Qinその他は、プロセス制御におけるセンサの性能確認を扱っている。好ましい実施形態は P C A (主要コンポーネント分析) を基本にしており、最適の再構成手順により識別を実施する。各センサ値は、それが故障しているとの仮定に基づいて再構成され、次に識別

10

20

30

40

50

および分類が再構成エラーから算出した追跡インデックスにより行なわれる。

【0008】

Keelerその他は、P E M Sにおけるセンサの性能確認を扱っている。開示されたシステムは、推定センサテクノロジーおよびP E M Sに対するニューラルネットワークの使用に焦点を置く。センサの性能確認テクノロジーは、識別のための準最適再構成手順を使用し、分類を扱わず、P C Aの非線型バージョンである“エンコーダ”ニューラルネットワークを使用する。エンコーダネットワークは、Marker Kramer “Nonlinear principal component analysis using autoassociative neural networks (自動結合ニューラルネットワークを使用する非線型主要コンポーネント解析)”, AIChE Journal, 37(2), pp. 233-243(1991)にも記載されている。

10

【0009】

Hopkinsその他は、プロセス監視(多変量統計プロセス制御)記述中でセンサの性能確認を扱っており、P C AまたはP L S(部分最小自乗法)を使用する。識別は寄与率分析により行なわれる。検出は、主要コンポーネント“得点”または得点統計を監視し、標準信頼間隔と比較することにより行なわれる。識別は、異常得点に対する各オリジナル測定の寄与率を調べることにより行なわれる。この方法は故障タイプを分類するものではない。

【0010】

【発明の概要】

本発明は、故障センサの検出、識別、推定、再構成および分類のための新しい装置と方法を提供する。このアプローチは、部分最小自乗(P L S)または主要コンポーネント分析のような統計法を用いて、第1原則またはデータから作ることのできる標準プロセスモデルを使用する。好ましい実施形態においては、プロセスモデルは、主要コンポーネント数を選択して故障センサ値の再構成を最適化しているP C Aモデルを基本にしており、これについてはQinおよびDuniaの“Determining the number of principal components for best reconstruction(最適再構成のための主要コンポーネント数の決定)”, Proc. Of the 5-th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process System, 359-364, Corfu, Greece, June 8-10, 1998に記載されている。

20

【0011】

検出段階は、モデル等式エラーに基づく検出インデックスを使用する。指数関数的に重み付けした移動平均(E W M A)フィルタを、検出インデックスに適用して一時的な過渡現象による誤ったアラームを減少させる。フィルタ処理された検出インデックス(F D I)は、統計的に算出したしきい値と比較され、予想される故障を検出する。予想される故障状況の検出により、本発明の識別段階を起動する。

30

【0012】

本発明の主要なコンポーネントは識別段階である。検出アラームが1つまたは複数の故障センサに起因するかどうかを判定し、さらに異常センサ(複数もあり)を識別するために、故障の一つのサブセットに影響されないが、他に対しては最大感度をもつ一連の検出器を構成する。これらの検出器は、最大感度をもつ構造化残差方法(S R A M S)と称される新しい方法により構成された構造化残差(S R)を基本にする。構造化残差は、一般にGertlerとSinger, “A new structural framework for parity equation based failure detection and isolation(故障検出と分離を基にしたパリティ等式に対する新しい構造フレームワーク)”, Automatica 26:381-388, 1990に記載されている。指数関数的に重み付けされた移動平均(E W M A)フィルタをS Rに適用し、一時的な過渡現象による誤ったアラームを減少させる。またS Rも自乗および正規化して、各S Rを公平に比較する。識別は、これらの正規化した自乗フィルタ処理構造化残差(N S F S R)を、統計的に推定した信頼限界と比較することにより行なわれる。N S F S Rに加え、検出の時点から累積加算した正規化構造化残差(N S R)に基づくインデックスを監視し、比較して、故障センサの識別に使用する。この2つの指数が普遍化された公算比(G L R)インデックスであり、また正規化した累積分散(N C U M V A R)インデックスある。N C U M V A Rインデックスは、精度の劣化したセンサを識別するために主として用いることができる。

40

50

【 0 0 1 3 】

この時、故障の大きさは、モデル、故障データ、および故障センサが正しく識別されたとの仮定に基づいて最適の形で推定される。これは、例えばMartensおよびNaes “Multivariate Calibration”, John Wiley and Sons, New York, 1989に記載された公開されている既存の技術を使用する。故障方向の知識（故障センサの識別から知る）および推定される故障の大きさを使用し、正しいセンサ値を再構成する。

【 0 0 1 4 】

故障分類段階は、センサ故障のタイプに関する診断情報を提供する。特に4つのタイプの故障が考えられる、つまり、完全な故障、バイアス、ドリフトおよび精度の劣化である。完全な故障は、識別した故障センサ測定値に関する回帰分析を行うことにより求められ、回帰線がゼロの傾きをもつことを統計的に推定して表わされる。他の3つの故障タイプを分類するには、識別時点以降の推定される故障サイズに関する回帰分析を行う。バイアスは、推定される故障サイズ回帰線がゼロの傾きおよびゼロでないオフセットをもつとする統計推定により示され、わずかな残差エラーをもつ。ドリフトは、推定される故障サイズ回帰線がゼロでない傾きをもつことを統計的に推定して示され、わずかな残差エラーをもつ。精度劣化は、推定された故障サイズ回帰線がゼロの傾き、ゼロのオフセットおよび有意な残差エラーをもつことを統計的に推定して示される。また精度の劣化は、故障がNCUMVARインデックスによってのみ識別可能な場合にも、示される。

【 0 0 1 5 】

【 発明の実施の形態 】

本発明の上記およびその他の目的、特徴および利点は、添付の図面に図示された本発明の好ましい実施形態のさらに詳しい記述で明らかとなるであろう。図中では一貫して同一部分に対しては同一符号を用いている。図面は必ずしも縮尺通りでなく、本発明の原理を示するために強調が加えられている。

【 0 0 1 6 】

図1は、本発明のセンサの性能確認装置を示している。センサ確認装置の外部入力センサ測定値108から成り、その測定値には、例えば製造プラントにおける分散制御システム(DCS)50から得られる状態情報を含む。本発明の目的は、センサ測定値の冗長情報を用いて、センサがいつ故障したかを検出し、故障したセンサに選択的に代替値を提供することである。センサ測定値を使用するプロセスコントローラ60または推定センサ70のような他の装置は、この時必要に応じ代替値を使用できる。これにより、これらの装置は、故障したセンサの存在下で引き続き動作を続行できる。

【 0 0 1 7 】

再び図1によれば、センサの性能確認装置100は、センサ確認の各種の段階を実行する8つの演算ユニットから構成される。マイクロプロセッサ、または他の所望のタイプのコンピュータを用いて実行できる演算ユニットは、次の通りである。

【 0 0 1 8 】

・前処理ユニット110、これは拡大縮小とオフセット情報112を維持して、DCS50からのセンサ値108のベクトルを正規化した値118のベクトルに変換する。これらの正規化した値は、標準化ユニットをもち、好ましい実施形態においては、そのユニットに対し、その値を平均値0と標準偏差1をもつように設計する。これは、故障センサを識別するために、有効なモデル行列122、検出インデックス142および構造化残差変換132を形成するのに必要である。拡大縮小およびオフセット情報は、好ましい実施形態においてはセンサの過去のデータセットの統計分析から求められる。

【 0 0 1 9 】

・モデルユニット120、これはモデル行列122を維持して、所定の時点で前処理されたセンサ値118のベクトルを等式エラー128と称されるエラーベクトルに変換する。等式エラーは、構造化残差ユニット130で使用する構造化残差値138および故障サイズ136を算定し、また検出ユニット140で使用する検出インデックス142を計算する。また構造化残差ユニットもモデル行列を使用し、構造化残差変換132およびその対

応する故障推定変換 1 3 4 を設計する。好ましい実施形態においては、モデル行列は、主要コンポーネント分析を使用してセンサの過去のデータセットから形成される。

【 0 0 2 0 】

・構造化残差ユニット 1 3 0、これは構造化残差変換 1 3 2 の使用セットを維持し、現在の等式エラー 1 2 8 を 1 セットの構造化残差値 1 3 8 に変換する。識別ユニット 1 5 0 はこれらの構造化残差値を用いて、故障センサの同一性を判定する。構造化残差ユニットもまた推定ユニット 1 6 0 により使用される 1 セットの故障推定変換 1 3 4 を維持し、識別した故障に対する正規化した故障サイズ 1 3 6 を得る。

【 0 0 2 1 】

・検出ユニット 1 4 0、これは等式エラー 1 2 8 から検出インデックス 1 4 2 を計算し、検出インデックスを検出しきい値 1 4 4 と比較する。検出インデックスが検出しきい値を上回る場合は、検出イベント 1 4 8 を発生する。この検出イベントを使用して識別ユニット 1 5 0 を起動し、また、例えばオペレータアラーム発生、またはオペレータコンソール 9 0 もしくは格納装置 9 2 へのイベント記録に、センサ確認装置の外部で利用できる。

10

【 0 0 2 2 】

・識別ユニット 1 5 0、これは構造化残差値 1 3 8 を使用して、識別インデックスのいくつかのセット 1 5 2 を計算する。検出イベント 1 4 8 が発生した場合は、識別ユニットは、後述の特定のロジックに従って、識別インデックスをしきい値 1 5 4 の対応するセットと比較して故障特性を識別する。識別に成功すると、識別イベント 1 5 8 を発生し、それを使用して推定ユニットを起動する。この識別イベントは、どのセンサが故障しているかに関する情報を含み、例えばオペレータアラーム発生、またはオペレータコンソール 9 0 もしくは格納装置 9 2 へのイベント記録に、センサ確認装置の外部で利用できる。

20

【 0 0 2 3 】

・推定ユニット 1 6 0、これは識別イベント 1 5 8 により起動される。推定ユニットは、構造化残差ユニット 1 3 0 に、等式エラー 1 2 8 に適正な故障推定変換 1 3 4 (識別情報に基づいて選択される) を適用するよう要求し、その結果正規化した故障サイズ情報 1 3 6 を生成する。次に推定ユニットは、適切な拡大縮小 1 1 6 を 1 3 6 に適用して、オリジナルセンサ値の単位に対し拡大縮小された故障サイズ推定 1 6 8 を生成する。

【 0 0 2 4 】

・代替ユニット 1 7 0、これは、対応する故障センサ測定値 1 0 8 から推定された故障サイズ 1 6 8 を差し引き、1 セットの代替値を得る。これらの代替値をセンサ確認装置の外部で利用できる。例えばそれらを D C S 5 0 に書込み、他の装置で利用する。代替ユニットは、推定ユニット 1 6 0 が起動しているときだけ機能する。代替ユニットは、オペレータ 1 7 2 の要求によっても機能を停止することができる。この場合には、代替ユニットの出力 1 7 8 はセンサ確認装置に対するオリジナル入力 1 0 8 と同一である。

30

【 0 0 2 5 】

・分類ユニット 1 8 0、これはセンサ故障のタイプに関する分析情報を計算する。特に 4 種の故障 - 完全な故障、バイアス、ドリフトおよび精度劣化 - が考えられる。分類ユニットは、推定ユニット 1 6 0 が起動している時だけ機能し、また識別イベント 1 5 8 が発生したときだけ機能する。分類は、識別時点以降のセンサデータ 1 0 8 の分析および故障サイズ推定 1 6 8 に基づく。分類ユニットにより生成される分類情報 1 8 8 は、センサ確認装置の外部で利用できる。例えばオペレータアラーム発生、またはオペレータコンソール 9 0 もしくは格納装置 9 2 へのイベント記録に使用できる。

40

これらの演算ユニットのそれぞれの好ましい実施形態を以下に詳しく述べる。

【 0 0 2 6 】

1. 前処理ユニット

前処理ユニット 1 1 0 は、拡大縮小およびオフセット情報を計算および維持して、D C S からの測定されたセンサ値 1 0 8 と正規化された値 1 1 8 との間で変換を行い、それをモデルユニットおよび構造化残差ユニットに入力する。i 番目のセンサに対する拡大縮小値 S_i およびオフセット値 O_i は、好ましい実施形態においては、i 番目のセンサの平均値 μ

50

σ_i および標準偏差 σ_i から下記のように計算される。

【 0 0 2 7 】

【数 1】

$$s_i = \frac{1}{\sigma_i} \quad (1)$$

$$o_i = \mu_i$$

【 0 0 2 8 】

次に i 番目のセンサの測定された値 u_i は、次の式により標準化された値 x_i に変換される。

【 0 0 2 9 】

【数 2】

$$u_i = s_i(x_i - o_i) \quad (2)$$

【 0 0 3 0 】

μ_i および σ_i は、代表的なサンプルデータから、当業者にとって公知の標準法により推定される。

【 0 0 3 1 】

2. モデルユニット

モデルユニット 1 2 0 は、下記の式で表わされる標準プロセスモデルを維持する。

【 0 0 3 2 】

【数 3】

$$\mathbf{B}\mathbf{x}^*(t) = \mathbf{e}^*(t) \quad (3)$$

【 0 0 3 3 】

ここで $\mathbf{x}^* \in \mathbb{R}^n$ は、前処理されたセンサ値のベクトルであり、 $\mathbf{B} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ はモデル行列 1 2 2 であり、 $\mathbf{e}^* \in \mathbb{R}^m$ は等式エラー 1 2 8 である。行列 \mathbf{B} は、プロセスの質量バランスもしくはエネルギーバランスから算出するか、または主要コンポーネント解析 (PCA) もしくは部分最小自乗 (PLS) のような統計法を用いてプロセスデータから算出できる。

【 0 0 3 4 】

2. 1 PCA に基づくモデルユニット

好ましい実施形態においては、標準プロセスモデルは PCA を用いてプロセスデータから求められる。PCA は、一般に例えば J. Edward Jackson "A User's Guide to Principal Components (主要コンポーネントに対するユーザズガイド)"、John Wiley 1991 に記載されている。PCA においては、センサ値 $\mathbf{x}^*(t) \in \mathbb{R}^n$ は、次の形に分解される。

【 0 0 3 5 】

【数 4】

$$\mathbf{x}^*(t) = \mathbf{P}\mathbf{P}^T\mathbf{x}^*(t) + \tilde{\mathbf{P}}\tilde{\mathbf{P}}^T\mathbf{x}^*(t) \quad (4)$$

【 0 0 3 6 】

ここで $\mathbf{P} \in \mathbb{R}^{n \times (n-m)}$ は、 $\mathbf{x}^*(t)$ の相関行列の主たる固有値 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-m}$ に関連する固有ベクトルである。この場合には、モデル等式エラー $\mathbf{e}^*(t)$ は、残差コンポーネント ($\mathbf{e}^*(t) \in \mathbb{R}^m$) に対応し、また Gertler, Li, Huang と McAvoy "Isolation enhanced principal component analysis (分離拡張主要コンポーネント解析)" Proc. IFAC Workshop

10

20

30

40

50

on On-line Fault Detection and Supervision in the Chemical Process Industry, 4-5 June, 1998に記載されているように次の式が成り立つ。

【 0 0 3 7 】

【数 5】

$$\mathbf{B} = \tilde{\mathbf{P}}^T \quad (5)$$

【 0 0 3 8 】

好ましい実施形態においては、最適数の主要コンポーネントを選択して最適再構成機能を達成する、これについてはQinおよびDuniaの“Determining the number of principal components for best reconstruction (最適再構成のための主要コンポーネント数の決定)”、Proc. Of the 5-th IFAC Symposium on Dynamics and Control of Process System, 359-364, Corfu, Greece, June 8-10, 1998に詳述されている。

【 0 0 3 9 】

3. 構造化残差ユニット

構造化残差ユニット 130 は、特定方向の故障を感知するかまたは感知しない変換を維持する。これらの変換は、以下の故障表現の中で説明する。

【 0 0 4 0 】

3.1 故障の表現

正常な条件下では、等式エラー $e^*(t)$ 128 は主とし測定雑音を含み、この雑音はゼロの平均ガウス雑音と仮定できる。センサ故障が発生すると、センサ測定はプロセス変数の正常値と故障値を含み、次式のようになる。

【 0 0 4 1 】

【数 6】

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{x}^*(t) + \Xi_i \mathbf{f}_i(t) \quad (6)$$

【 0 0 4 2 】

ここで $\mathbf{f}_i(t) \in \mathbb{R}^{1 \times 1}$ は故障の大きさのベクトルであり、 $\Xi_i \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ は故障方向の行列である。 i 番目のセンサの単一センサ故障を表わすと次式になる

【 0 0 4 3 】

【数 7】

$$\Xi_i = [0 \quad 0 \quad \Lambda \quad 1 \quad \Lambda \quad 0]^T \quad (7)$$

【 0 0 4 4 】

上記の式は、単位行列の i 番目の列である。複数センサ故障を同時に表わすには、 Ξ_i は単位行列の対応する列を単に含むだけでよい。センサ故障を含む式 6 の測定値関係を用いると、等式エラー 128 は下記のように表わすことができる。

【 0 0 4 5 】

【数 8】

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{B}\mathbf{x}(t) = \mathbf{B}\mathbf{x}^*(t) + \mathbf{B}\Xi_i \mathbf{f}_i(t) = \mathbf{e}^*(t) + \mathbf{B}\Xi_i \mathbf{f}_i(t) \quad (8)$$

【 0 0 4 6 】

故障は、一般に等式エラー $\mathbf{e}(t)$ を増大させる。等式エラーの大きさは、後述のようなセンサ故障を検出するのに用いられる。個別のベクトルまたは行列 Ξ_i が各センサ故障を表わすため、故障の識別は方向ベクトルを用いることにより達成できる。

【 0 0 4 7 】

3.2 単一故障に対する構造化残差変換

10

20

30

40

50

構造化残差ユニット 1 3 0 は、構造化残差と呼ばれる 1 セットの変換を維持する。後述する識別ユニット 1 5 0 は、故障センサを識別するために構造化残差変換を用いる。

【 0 0 4 8 】

構造化残差は、一般にGertlerとSinger、“A new structural framework for parity equation based failure detection and isolation (故障検出と分離を基にしたパリティ等式に対する新しい構造フレームワーク)”、Automatica 26:381-388, 1990に記載されている。本発明においては、構造化残差に対する新しい設計法を開示しており、“Structured Residual Approach with Maximized Sensitivity (最大感度をもつ構造化残差アプローチ)”またはS R A M Sと呼ばれる。

j 番目のセンサにおける単一センサ故障の場合に対しては、次の式が成り立つ。

10

【 0 0 4 9 】

【数 9】

$$\mathbf{B}\mathbf{E}_j = \mathbf{b}_j \quad (9)$$

【 0 0 5 0 】

ここで \mathbf{b}_j は行列 \mathbf{B} の j 列である。したがってモデル等式エラーは次式となる。

【 0 0 5 1 】

【数 1 0】

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{e}^*(t) + \mathbf{b}_j f_j(t) \quad (10)$$

20

【 0 0 5 2 】

選択された残差構造を用いると、1 セットの構造化残差 $\mathbf{r}(t)$ は、等式エラーベクトル $\mathbf{e}(t)$ に変換行列 \mathbf{W} をあらかじめ乗じることにより生成できる。

【 0 0 5 3 】

【数 1 1】

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{W}\mathbf{e}(t) \quad (11)$$

30

【 0 0 5 4 】

$\mathbf{r}(t)$ の各エレメントを一つの特定のセンサ故障に対して関与するが、他の故障に対して関与しないように設計することが望ましい。j 番目センサが故障している $\mathbf{r}(t)$ の i 番目のエレメントは、次式で表わされる。

【 0 0 5 5 】

【数 1 2】

$$r_{ij}(t) = \mathbf{w}_i^T \mathbf{e}(t) = \mathbf{w}_i^T \mathbf{e}^*(t) + \mathbf{w}_i^T \mathbf{b}_j f_j(t) \quad i, j = 1, 2, \Lambda, n \quad (12)$$

【 0 0 5 6 】

40

ここで \mathbf{w}_i^T は行列 \mathbf{W} $R^{n \times m}$ の i 行である。 $\mathbf{e}(t)$ がランダム雑音であるため、残差 $r_{ij}(t)$ を故障方向ベクトル \mathbf{b}_j に対して感知するかまたはしないようにだけ設計できる。S R A M S デザイン基準は次のように記述される。

\mathbf{w}_i を $r_{ij}(t)$ が i 番目センサ故障を感知しないが、他のものは最大感度で感知するように選ぶ。数学的には次の形と同一である。

【 0 0 5 7 】

【数 1 3】

$$\max_{\mathbf{w}_i} \sum_{j \neq i} \frac{(\mathbf{w}_i^T \mathbf{b}_j)^2}{\|\mathbf{w}_i\|^2 \|\mathbf{b}_j\|^2}$$

【 0 0 5 8 】

ただし、

【 0 0 5 9 】

【 数 1 4 】

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{b}_i = 0$$

10

【 0 0 6 0 】

幾何学的には、 \mathbf{w}_i は \mathbf{b}_i に対して直角であるように選択し、他の故障方向 \mathbf{b}_j ($j \neq i$) に対するその角度は最小に選択する。この問題は、次のようにも表現することができる。

【 0 0 6 1 】

【 数 1 5 】

$$\max_{\mathbf{w}_i} \sum_{j \neq i} (\mathbf{w}_i^T \mathbf{b}_j^o)^2 \quad (13)$$

20

【 0 0 6 2 】

ただし、

【 0 0 6 3 】

【 数 1 6 】

$$\mathbf{w}_i^T \mathbf{b}_i^o = 0$$

$$\|\mathbf{w}_i\| = 1$$

【 0 0 6 4 】

30

が条件である。ここで、

【 0 0 6 5 】

【 数 1 7 】

$$\mathbf{b}_j^o = \frac{\mathbf{b}_j}{\|\mathbf{b}_j\|} \quad j = 1, 2, \Lambda, n \quad (14)$$

【 0 0 6 6 】

制約 $\mathbf{w}_i^T \mathbf{b}_i^o = 0$ を満足するために、ベクトル \mathbf{w}_i は下記のように選択する必要がある。

【 0 0 6 7 】

40

【 数 1 8 】

$$\mathbf{w}_i = \left(\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT} \right) \mathbf{z}_i \in S_{\mathbf{w}_i}, \quad \mathbf{z}_i \in \mathfrak{R}^m \quad (15)$$

なお、 \mathfrak{R} は、文中では R と表記している。

【 0 0 6 8 】

50

ここで S_{w_i} は b_i の 90° 直交補空間である。したがって w_i の解は z_i の解に変換される。
ラグランジュ乗数を用いて、 z_i の解は下記の値を最大とすることにより見出せる。

【 0 0 6 9 】

【 数 1 9 】

$$\begin{aligned} J &= \max_{z_i} \left(\sum_{j \neq i} \left(z_i^T (\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}) \mathbf{b}_j^o \right)^2 + \lambda \left(1 - z_i^T (\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}) \mathbf{z}_i \right) \right) \\ &= \max_{z_i} \left(\sum_{j=1}^N \left(z_i^T (\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}) \mathbf{b}_j^o \right)^2 + \lambda \left(1 - z_i^T (\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}) \mathbf{z}_i \right) \right) \end{aligned} \quad (16)$$

10

【 0 0 7 0 】

$(\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}) \mathbf{b}_i^o = 0$ であるから上の式は成り立つ。次のように表わす。

【 0 0 7 1 】

【 数 2 0 】

$$[\mathbf{b}_1^o \quad \Lambda \quad \mathbf{b}_n^o] \equiv \mathbf{B}^o \quad (17)$$

【 0 0 7 2 】

20

および

【 0 0 7 3 】

【 数 2 1 】

$$(\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}) [\mathbf{b}_1^o \quad \Lambda \quad \mathbf{b}_n^o] = (\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}) \mathbf{B}^o \equiv \mathbf{B}_i^o \quad (18)$$

【 0 0 7 4 】

上式は \mathbf{B}^o の S_{w_i} への投影であり、最大化の問題は次のように書き換えることができる。

【 0 0 7 5 】

【 数 2 2 】

30

$$J = \max_{z_i} \left(\left\| \mathbf{B}_i^o z_i \right\|^2 + \lambda \left(1 - z_i^T (\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}) \mathbf{z}_i \right) \right) \quad (19)$$

【 0 0 7 6 】

J を z_i に関して微分すると次の値が得られる。

【 0 0 7 7 】

【 数 2 3 】

$$\mathbf{B}_i^o \mathbf{B}_i^{oT} z_i = \lambda (\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}) \mathbf{z}_i \quad (20) \quad 40$$

【 0 0 7 8 】

ただし、次の関係に注意が必要である

【 0 0 7 9 】

【 数 2 4 】

$$\begin{aligned}
 \mathbf{B}_i^o &= (\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}) \mathbf{B}^o \\
 &= (\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT})^2 \mathbf{B}^o \\
 &= (\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}) \mathbf{B}_i^o
 \end{aligned} \tag{21}$$

【 0 0 8 0 】

式 2 0 は次のように変形できる

【 0 0 8 1 】

10

【 数 2 5 】

$$(\mathbf{I} - \mathbf{b}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}) (\mathbf{B}_i^o \mathbf{B}_i^o \mathbf{z}_i - \lambda \mathbf{z}_i) = 0$$

【 0 0 8 2 】

または

【 0 0 8 3 】

【 数 2 6 】

20

$$\mathbf{B}_i^o \mathbf{B}_i^{oT} \mathbf{z}_i - \lambda \mathbf{z}_i = 0 \tag{22}$$

【 0 0 8 4 】

したがって \mathbf{z}_i は、最大の固有ベクトルに相当する $\mathbf{B}_i^o \mathbf{b}_i^{oT}$ の固有ベクトルである。 \mathbf{z}_i が判明すると、 \mathbf{w}_i は式 1 5 から容易に計算できる。

【 0 0 8 5 】

3 . 3 複数故障に対する構造化残差変換

S R A M S 設計法は、複数センサが同時に故障するケースに応用することができる。複数センサ故障に対する等式エラーベクトルは、次の式で表わされる。

30

【 0 0 8 6 】

【 数 2 7 】

$$\mathbf{e}(t) = \mathbf{e}^*(t) + \mathbf{b}_i \Xi_i \mathbf{f}_i(t) \tag{23}$$

【 0 0 8 7 】

ここで $\mathbf{B}_i \in \mathbf{R}^{m \times q}$ は、故障したセンサに対応する \mathbf{B} の q 個の列を含み、また $\mathbf{f}_i(t) \in \mathbf{R}^q$ は故障の大きさのベクトルである。 \mathbf{B}_i の列は線型関係をもつことに留意が必要である。 \mathbf{B}_i に単一値分解 (当業者によく知られている行列分解) を実施し、ゼロでない単独値のみを維持することにより次の式が得られる

40

【 0 0 8 8 】

【 数 2 8 】

$$\begin{aligned}
 \mathbf{e}(t) &= \mathbf{e}^*(t) + \mathbf{U}_q \mathbf{D}_q \mathbf{V}_q^T \mathbf{f}_i(t) \\
 &= \mathbf{e}^*(t) + \mathbf{U}_q \mathbf{f}_q(t)
 \end{aligned} \tag{24}$$

【 0 0 8 9 】

ここで、

【 0 0 9 0 】

50

【数 2 9】

$$\mathbf{f}_q(t) = \mathbf{D}_q \mathbf{V}_q^T \mathbf{f}_i(t) \quad (25)$$

【0 0 9 1】

複数センサ故障に対して \mathbf{W}_q を設計するために、 \mathbf{W}_q は \mathbf{U}_q の直交補空間内に選択する。即ち、

【0 0 9 2】

【数 3 0】

$$\mathbf{w}_q = (\mathbf{I} - \mathbf{U}_q \mathbf{U}_q^T) \mathbf{z}_q \in S_{\mathbf{w}_q} \quad (26)$$

10

【0 0 9 3】

単一センサ故障ケースに類似の次式となる。さらに、次式が最大とされる。

【0 0 9 4】

【数 3 1】

$$\max_{\mathbf{z}_q} \left\| \mathbf{z}_q^T (\mathbf{I} - \mathbf{U}_q \mathbf{U}_q^T) \mathbf{B}^o \right\|^2 = \max_{\mathbf{z}_q} \left\| \mathbf{z}_q^T \mathbf{B}_q^o \right\|^2 \quad (27)$$

【0 0 9 5】

20

ただし、

【0 0 9 6】

【数 3 2】

$$\left\| (\mathbf{I} - \mathbf{U}_q \mathbf{U}_q^T) \mathbf{z}_q \right\| = 1 \quad (28)$$

【0 0 9 7】

ここで、

【0 0 9 8】

【数 3 3】

30

$$\mathbf{B}_q^o = (\mathbf{I} - \mathbf{U}_q \mathbf{U}_q^T) \mathbf{B}^o \quad (29)$$

【0 0 9 9】

ラグランジュ乗数を用いた後、 \mathbf{z}_q は次式の解であることが明らかになる。

【0 1 0 0】

【数 3 4】

$$\mathbf{B}_q^o \mathbf{B}_q^{oT} \mathbf{z}_q = \lambda (\mathbf{I} - \mathbf{U}_q \mathbf{U}_q^T) \mathbf{z}_q \quad (30)$$

40

【0 1 0 1】

式 2 9 から次の関係式が得られる。

【0 1 0 2】

【数 3 5】

$$(\mathbf{I} - \mathbf{U}_q \mathbf{U}_q^T) (\mathbf{B}_q^o \mathbf{B}_q^{oT} \mathbf{z}_q - \lambda \mathbf{z}_q) = \mathbf{0}$$

【0 1 0 3】

または

50

【 0 1 0 4 】

【 数 3 6 】

$$\mathbf{B}_q^o \mathbf{B}_q^{oT} \mathbf{z}_q = \lambda \mathbf{z}_q \quad (31)$$

【 0 1 0 5 】

したがって、 \mathbf{z}_q は、単に、最大固有値に関連する $\mathbf{B}_q^o \mathbf{B}_q^{oT}$ の固有ベクトルである。

【 0 1 0 6 】

3 . 4 従来の構造化残差方法との比較

10

従来の構造化残差方法（一般にGertlerとSinger、“A new structural framework for parity equation based failure detection and isolation（故障検出と分離を基にしたパリティ等式に対する新しい構造フレームワーク）”，Automatica 26:381-388, 1990、およびGerterとSinger、“Augmented models for statistical fault isolation in complex dynamic systems（複雑動的システムにおける統計的故障分離に対する拡張モデル）”，Proceeding of the American Control Conference, pp317-322, 1985）は、 w_i を対象とする特定の故障に対して感知しないものを選択するが、他の故障に対する感度を最大にすることはない。代表的な構造化残差設計では、 w_i の選択は、特有のものではなく、ある程度任意である。この設計における任意性により、故障を分離する可能性を最大にしない準最適解を導く。本発明のSRAMS方法は、 w_i の特有の設計を実現して、他の故障に

20

【 0 1 0 7 】

3 . 5 構造化残差ユニットにより維持される変換

本発明の好ましい実施形態において、構造化残差ユニットは、先のセクション3 . 2に記載の単一センサ故障に対応する構造化残差変換の中核セットを維持する。これらの中核構造化残差変換は、構造化残差変換132の初期動作セットおよび関連の故障推定変換134を形成する。

【 0 1 0 8 】

DSICからの1つまたは複数のセンサ測定値108が、センサ確認装置への入力において不良と表示されるときは、構造化残差変換および関連の故障推定変換の新しい動作セットが、構造化残差ユニットにより形成される。これらは次の通りである。b個のセンサが入力において不良と表示されると、 $n - b + 1$ の新しい構造化残差変換が設計される。第1構造化残差変換が、不良のb個のセンサに対応する恒式行列の列を選択する を用いて設計される。この構造化残差変換は、これらの不良センサ値を感知しないが、他のセンサのいずれの故障も感知する。残りの $n - b$ の構造化残差変換は、不良のb個のセンサに対応する恒式行列の列に加え、相互のセンサに対応するさらにもう1つの列を選択する により設計される。これにより入力で不良と表示されるセンサの外にも、別の故障センサを識別することが可能になる。

30

【 0 1 0 9 】

その他の構造化残差変換は、選択的に設計して、動作セットに加えることができる。例えば に基づく1セットの変換を、恒式行列からのすべてのペアの列から選択する。これにより、同時に故障しているペアを識別できる。しかし、複数故障を検出する好ましい方法は、いくつかのセンサ確認装置を用いることである。例えば図1において、プロセスコントローラ60が入力として5つのセンサ値を使用する場合は、最高5つのセンサ確認装置100を使用できる。各センサ確認装置は、入力の1つおよびプロセスコントローラに入力されない他の冗長センサ測定値を使用する。

40

【 0 1 1 0 】

別の方法は、いくつかのセンサ確認装置をもつものであり、そのそれぞれは特定のセンサの故障の検出および識別に最適化され、再構成のために最適化される別のセンサ確認装置に信号供給する。

50

【 0 1 1 1 】

4 . 検出ユニット

検出ユニット 1 4 0 は、現在の等式エラーに基づいて検出インデックス 1 4 2 を計算することにより、前処理されたセンサ値の相関構造を監視する。この検出インデックスが、統計的に推定された信頼限界に基づくしきい値 1 4 4 を越える場合には、検出イベント 1 4 8 が発生し、識別ユニットが起動される。好ましい実施形態では、正規化され、フィルタ処理された故障検出インデックス (N F F D I) は、以下のように使用される。

【 0 1 1 2 】

4 . 1 故障検出インデックス

故障検出インデックス (F D I) は、下記のように定義される。

10

【 0 1 1 3 】

【数 3 7 】

$$FDI = \|e(t)\|^2 = \|e^*(t) + B \Xi_i f_i(t)\|^2$$

【 0 1 1 4 】

故障が存在しないときは、 $FDI = \|e^*(t)\|^2 = \|B x^*(t)\|^2$ である。したがって、 FDI に対する検出アラームしきい値は、実際には $\|e^*(t)\|^2$ に対する信頼限界である。

【 0 1 1 5 】

20

4 . 2 正規化故障検出インデックス

実際の工業プロセスにおいて、プロセス変数 $x^*(t)$ は、一般には正規分布していない。しかし、等式エラー $e^*(t)$ 1 2 8 は、主として測定雑音を含み、したがってゼロの平均ガウス雑音と考えることができる。したがって、 $e^*(t)^T R_e^{-1} e^*(t)$ は、 m の自由度をもつ χ^2 分布を満足する、ここで、 $R_e = E[e(t) e^T(t)]$ は等式エラー共分散行列である。このように正規化された故障検出インデックスを、

【 0 1 1 6 】

【数 3 8 】

$$NFDI \equiv e(t)^T R_e^{-1} e(t)$$

30

【 0 1 1 7 】

と定義することにより、 $NFDI$ に対する d_a の検出アラームしきい値は、当業者には既知の方法で、 χ^2 分布を用い任意の有意水準 α に対し求めることができる。

【 0 1 1 8 】

$NFDI(t)^2$ 、ここで $\tilde{e}(t) = R_e^{-1/2} e(t)$ および $R_e^{-1/2}$ は逆等式エラー共分散行列の行列平方根であることに留意すること。 $R_e^{-1/2}$ は等式エラーの相関性解除の効果をもつ。

【 0 1 1 9 】

4 . 3 正規化され、フィルタ処理された故障検出インデックス

40

好ましい実施形態においては、指数関数的に重み付けされた移動平均 (E W M A) フィルタを等式エラーに適用して、測定データ中の過渡現象および雑音の効果を減少させる。

【 0 1 2 0 】

【数 3 9 】

$$\bar{e}(t) = \gamma \bar{e}(t-1) + (1-\gamma) e(t) \quad 0 \leq \gamma < 1 \quad (32)$$

なお、記号の上に付した線、例えば $\bar{\eta}$ は、文中では η と表記している。

【 0 1 2 1 】

したがって次式が成り立つ。

【 0 1 2 2 】

【 数 4 0 】

$$\bar{e}(t) = (1 - \gamma) \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k e(t - k)$$

【 0 1 2 3 】

および

【 0 1 2 4 】

【 数 4 1 】

$$\bar{\eta}(t) = (1 - \gamma) \sum_{k=0}^{\infty} \gamma^k \eta(t - k) \quad (33)$$

【 0 1 2 5 】

ここで、

【 0 1 2 6 】

【 数 4 2 】

$$\bar{\eta}(t) \equiv \mathbf{R}_e^{-\frac{1}{2}} \bar{e}(t) \quad (34)$$

【 0 1 2 7 】

正規化され、フィルタ処理された故障検出インデックス 1 4 2 は、次のように定義される。

【 0 1 2 8 】

【 数 4 3 】

$$NFFDI = \|\bar{\eta}(t)\|^2 \quad (35)$$

【 0 1 2 9 】

故障がなければ、 $\eta(t)$ は正規分布するため、 $\bar{\eta}(t)$ はまた正規分布し、 $E[\bar{\eta}(t)] = E[\eta(t)] = 0$ である。しかし、EWMA フィルタは、 $\eta(t)$ の分散を大幅に減少させるため、信頼限界 d_a を直接 $\bar{\eta}(t)$ に適用することはできない。 $\eta(t)$ の分散は次の式により表わされる。

【 0 1 3 0 】

【 数 4 4 】

$$\begin{aligned} \text{var}(\bar{\eta}(t)) &= E\{\bar{\eta}^T(t) \bar{\eta}(t)\} \\ &= \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma} E\{\eta^T(t) \eta(t)\} \left(1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \gamma^k \rho(k) \right) \\ &= \text{var}(\eta(t)) \frac{1 - \gamma}{1 + \gamma} \left(1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \gamma^k \rho(k) \right) \end{aligned} \quad (36)$$

10

20

30

40

50

【 0 1 3 1 】

ここで、

【 0 1 3 2 】

【数 4 5 】

$$\rho(k) = \frac{E\{\eta^T(t)\eta(t-k)\}}{E\{\eta^T(t)\eta(t)\}} \quad (37)$$

【 0 1 3 3 】

10

は自己相関関数である。(t)が独立的かつ同一分布している場合は、(k)は任意の $k > 0$ に対して 0 である。しかし、実際のデータに対しては、動的な過渡現象のためにこの条件を満足することは不可能である。式 3 6 の右辺のゼロでない (k) は、 \bar{d}_a に対する検出アラームしきい値の決定に寄与する。(t)² に対するしきい値が d_a であるから、式 3 6 から、(t)² に対する検出アラームしきい値 1 4 4 が下記の式であることは、容易に知ることができる：

【 0 1 3 4 】

【数 4 6 】

$$\bar{d}_a = d_a \left(1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \gamma^k \rho(k) \right) \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \quad (38) \quad 20$$

【 0 1 3 5 】

(k) 1、したがって次式が成り立つことに留意すること。

【 0 1 3 6 】

【数 4 7 】

$$\begin{aligned} \bar{d}_a &\leq d_a \left(1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \gamma^k |\rho(k)| \right) \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \\ &\leq d_a \left(1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \gamma^k \right) \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \\ &= d_a \left(1 + 2 \frac{\gamma}{1-\gamma} \right) \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \\ &= d_a \end{aligned} \quad (39) \quad 30$$

【 0 1 3 7 】

40

したがって、N F F D I に対するしきい値は、通常 N F D I に対するしきい値よりも小さい。実際に、p (k) は、一定の時間 k 後にはゼロに減少し、検出ユニットだけが固定数の項を維持して \bar{d}_a を計算する。有意性 は、検出ユニットの調節可能なパラメータである。

図 4 は N F F D I N が故障発生を急速に増加している様子を示す。

【 0 1 3 8 】

5 . 識別ユニット

識別ユニット 1 5 0 は、検出ユニットが検出イベントを発生する場合に、起動される。識別ユニットは、インデックス 1 5 2 のいくつかのセットを計算し、それを用いて、検出された故障を 1 つまたは複数のセンサの故障に識別できるかどうかを判定する。各セットの

50

インデックスは、構造化残差ユニット 1 3 0 により維持される有効セットの構造化残差から算出される。一般に 1 つのセットにおける単一インデックスがしきい値よりも小さく、一方でそのセットの中のすべての他のインデックスがしきい値よりも大きい場合には、既知の方向の故障が識別される。この故障の方向は、インデックスに関連する構造化残差を定義する方向に一致する。最も一般的な場合は、この故障は単一センサの故障に相当する。

【 0 1 3 9 】

本発明の好ましい実施形態において、識別ユニットは、3 セットのインデックス 1 5 2 およびそれらの関連しきい値 1 5 4 を維持する。これらのインデックスのセットは、正規化され、自乗され、フィルタ処理された構造化残差 (N S F S R)、一般化公算比 (G L R) インデックス、および正規化累積加算分散 (N C U M V A R) インデックスである。関連しきい値は、 g_{NSFSR} 、 g_{GLR} および $g_{NCUMVAR}$ により表わされる。図 2 に、故障識別プロセスを要約したフローダイアグラムを示す。

10

【 0 1 4 0 】

5 . 1 正規化され、自乗され、フィルタ処理された構造化残差

理論的には、各構造化残差 $r_i(t)$ は、センサが故障しないときはゼロであるか、またはゼロに近いと想定される。しかし、モデル化エラー、測定値ノイズおよび他の不確定性のために、 $r_i(t)$ はゼロに等しくない。したがって、各 $r_i(t)$ $i, j = 1, 2, \dots, n$ に対するゼロでない信頼限界は、統計技法を用いて求められる。

20

【 0 1 4 1 】

故障がないか、または i 番目の構造化残差が故障のセンサ (複数もある) では、 i 番目の構造化残差は正規分布に従う。

【 0 1 4 2 】

【 数 4 8 】

$$r_i(t) = w_i^T e(t) \sim \mathcal{N}(0, w_i^T R_e w_i) \quad i = 1, 2, \Lambda, n \quad (40)$$

なお、 \mathcal{N} は、文中では X と表記している。

30

【 0 1 4 3 】

ここで $R_e = E \{ e(t) e^T(t) \}$ は等式エラー共分散行列である。

したがって、

【 0 1 4 4 】

【 数 4 9 】

$$\frac{r_i^2(t)}{w_i^T R_e w_i} \sim \chi^2(1) \quad i = 1, 2, \Lambda, n \quad (41)$$

40

【 0 1 4 5 】

次に、 i 番目の正規化構造化残差 (N S R) を、

【 0 1 4 6 】

【 数 5 0 】

$$\nu_i(t) \equiv \frac{r_i(t)}{\sqrt{\mathbf{w}_i^T \mathbf{R}_e \mathbf{w}_i}} \sim \mathcal{N}(0,1) \quad (42)$$

【 0 1 4 7 】

として定義し、正規化され自乗された構造化残差 (N S S R) を $\nu_i^2(t)$ と定義することにより、N S S R に対する信頼限界は $\chi_a^2(1)$ になる、ここで、 α は有意水準である。

【 0 1 4 8 】

E W M A フィルタを N S R に適用すると、正規化されフィルタ処理された構造化残差 (N F S R) は、次式で表わされる。 10

【 0 1 4 9 】

【数 5 1】

$$\begin{aligned} \bar{\nu}_i(t) &= \gamma \bar{\nu}_{ii}(t-1) + (1-\gamma) \nu_i(t) \\ &= (1-\gamma) \sum \gamma^k \nu(t-k) \end{aligned} \quad (43)$$

【 0 1 5 0 】

故障がないか、または i 番目の構造化残差が故障のセンサ (複数もある) では、N F S R も次式による正規分布に従う。 20

【 0 1 5 1 】

【数 5 2】

$$E\{\bar{\nu}_i(t)\} = E\{\nu_i(t)\} = 0$$

【 0 1 5 2 】

および

【 0 1 5 3 】

【数 5 3】

$$\text{var}(\bar{\nu}_i(t)) = \text{var}(\nu_i(t)) \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \left(1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \gamma^k \psi_i(k) \right) \quad (44)$$

【 0 1 5 4 】

ここで

【 0 1 5 5 】

【数 5 4】

$$\psi_i(k) = \frac{E\{\nu_i(t) \nu_i(t-k)\}}{E\{\nu_i(t)^2\}}$$

【 0 1 5 6 】

は自己相関関数である。

【 0 1 5 7 】

したがって、 $\bar{\nu}_i^2(t)$ により定義された、正規化され自乗されフィルタ処理された構造化残差 (N S F S R) 、に対するアラームしきい値は、次の式により示されるアラームし 50

きい値をもつ。

【 0 1 5 8 】

【 数 5 5 】

$$\mathcal{G}_{NSFSR}^i \equiv \bar{\eta}_i^a(t) = \frac{1-\gamma}{1+\gamma} \left(1 + 2 \sum_{k=1}^{\infty} \gamma^k \psi_i(k) \right) \chi_a^2(1) \quad i=1,2,\Lambda,n \quad (45)$$

なお、 \mathcal{G} は、文中では g と表記している。

10

【 0 1 5 9 】

すべてのセンサが正常であれば、 $\bar{v}_i^2(t)$ は、次の式により示されるアラームしきい値を通常下回る。

【 0 1 6 0 】

【 数 5 6 】

$$P\{\bar{v}_i^2(t) > \mathcal{G}_{NSFSR}^i\} = \alpha$$

【 0 1 6 1 】

i 番目の構造化残差に関連するセンサ（複数もあり）が S R A M S 設計により故障の場合には、 $\bar{v}_i^2(t)$ は故障の影響を受けることはない。しかし他の残差 $\bar{v}_j^2(t)$ $j \neq i$ は大幅に増大する、なぜなら、それらの他のセンサの故障に対する感度は最大であるからである。

20

【 0 1 6 2 】

したがって、選択された有意水準 および時点 t を用いると、N S F S R s の中で、そのしきい値 g_{NSFSR}^i より小さい正確な1つの N S F S R が存在することにより、故障センサを識別し、識別イベント 1 5 8 を発生することになる。この例は図 7 に示され、その中で上のウインドウは故障センサ 5 に対応しない N S F S R は極めて大きくなるのに対し、下のウインドウはセンサ 5 に対する N S F S R はそのしきい値を下回ったままであることを示す。

30

【 0 1 6 3 】

多数のセンサの性能を確認することが多いため、たとえ各インデックスがそのしきい値を上回る確率が低くても、最低限 1 つの残差がそのしきい値を上回る確率をもつことは有意である。例えば 2 0 の残差があると仮定すると、 $r_i(t)$ $i = 1, 2, \dots, 20$ である。少なくとも一つの N S F S R がそのしきい値を上回る確率は ($\alpha = 0.05$ と仮定して)、

$$P = 1 - (1 - \alpha)^{20} = 1 - 0.95^{20} = 0.642$$

である。したがって、N S F S R は、故障検出に対して使用されない。代わりに、検出ユニットは、N F F D I を用いて検出イベントをトリガーし、その後に識別ユニットが、各種セットのインデックスを使用して、N S F S R から始めて、故障センサを識別する。

40

【 0 1 6 4 】

検出ユニットが検出イベントを発生しても、いなくても、選択的に N S F S R インデックスを各サイクルにおいて計算できる。しかし、次の 2 つのセクションに記載したインデックスセットは、故障検出の時点以降、構造化残差情報を累積加算する。したがって、それらは検出イベントの発生以降においてのみ有効である。

【 0 1 6 5 】

5.2 一般化された公算比インデックス

センサ故障が平均して有意な変化、例えば完全故障、バイアス、ドリフトを生じる場合は、一般化された公算比 (G L R) は、通常これを検出するのに適正な検定法である (Benveniste, Basseville および Moustakides “The asymptotic local approach to change det

50

ection and model validation (検出とモデル確認変化に対する漸近軌跡方法) ”、IEEE Trans. Auto. Cont. 32(7):538-592, July 1987)。

【0166】

以下の分析を明瞭に示すために、各構造化残差変換は、単一センサにおける故障に相当すると仮定する。しかし、一般には、GLRインデックスは、構造化残差設計には関係なく構成し、監視することができる。

【0167】

式42に示すように、センサが故障でなければ、 $v_i(t)$ はゼロの平均であり、単位分散をもつ正規分布を示す。しかしj番目のセンサが t_f の時点で故障を発生すると、次式

【0168】

【数57】

$$v_i(t) = \frac{\mathbf{w}_i^T \mathbf{e}^*(t)}{\sqrt{\mathbf{w}_i^T \mathbf{R}_e \mathbf{w}_i}} + \frac{\mathbf{w}_i^T \mathbf{b}_j f_j(t)}{\sqrt{\mathbf{w}_i^T \mathbf{R}_e \mathbf{w}_i}} \quad (46)$$

【0169】

となり、ゼロの平均ではなく、分散は変化しないことが明らかである。言い換えれば次式が成り立つ。

【0170】

【数58】

$$v_i(t) \sim \begin{cases} \mathcal{N}(0,1) & \text{if } t < t_f \\ \mathcal{N}(\mu_{ij},1) & \text{if } t \geq t_f \end{cases} \quad (47)$$

【0171】

ここで

【0172】

【数59】

$$\mu_{ij}(t) \equiv \frac{\mathbf{w}_i^T \mathbf{b}_j f_j(t)}{\sqrt{\mathbf{w}_i^T \mathbf{R}_e \mathbf{w}_i}} \quad (48)$$

【0173】

SRAMS設計より、 $\mu_{ij} = 0$ である。

【0174】

$v_i(t)$ の平均変化を検出するために、下記のGLR関数を定義する。

【0175】

【数60】

$$S_{t_f}^t(\mu_{ij}) = \frac{\sum_{k=t_f}^t v_i^2(k) - \sum_{k=t_f}^t (v_i(k) - \mu_{ij})^2}{t - t_f + 1} \quad (49)$$

【0176】

μ_{ij} に関して $S_{t_f}^t(\mu_{ij})$ を微分することにより、 μ_{ij} の最適の推定値が求められる。

【0177】

【数61】

10

20

30

40

50

$$\hat{\mu}_{ij} = \frac{\sum_{k=t_f} \nu_i(k)}{t - t_f + 1} \quad (50)$$

なお、記号の上に付した山型、例えば $\hat{\mu}$ は、文中では μ と表記している。

【 0 1 7 8 】

μ_{ij} を用いると、 $S_{tf}(\mu_{ij})$ は最大となり次式が成り立つ。

10

【 0 1 7 9 】

【数 6 2】

$$S'_{t_f}(\hat{\mu}_{ij}) = \hat{\mu}_{ij}^2 \quad (51)$$

【 0 1 8 0 】

j 番目のセンサが故障であれば、 $\mu_{jj} = 0$ 、および $\nu_j(t) \sim X(0, 1)$ である。式 50 から次式が成り立つ。

【 0 1 8 1 】

【数 6 3】

20

$$\hat{\mu}_{jj}(t) \sim N(0, 1)$$

【 0 1 8 2 】

または

【 0 1 8 3 】

【数 6 4】

$$S'_{t_f}(\hat{\mu}_{jj}) = \hat{\mu}_{jj}^2 \sim \chi^2(1)$$

30

【 0 1 8 4 】

したがって、選択された有意水準 および時点 t を用いると、次の n G L R s の中で、

【 0 1 8 5 】

【数 6 5】

$$S'_{t_f}(\hat{\mu}_{1j}), S'_{t_f}(\hat{\mu}_{2j}), \dots, S'_{t_f}(\hat{\mu}_{nj})$$

【 0 1 8 6 】

しきい値 $g_{GLR} = a^2(1)$ よりも小さい確実に 1 つの G L R が存在することにより、故障したセンサを特定し、識別イベント 1 5 8 を発生する。

40

【 0 1 8 7 】

5 . 3 正規化された累積加算分散インデックス

センサが精度劣化故障を生じた場合、G L R インデックスセットはそれを識別するのが困難である。精度劣化故障の位置を識別するため、N S R の平均および分散が、故障の生じた時点以降計算される。

【 0 1 8 8 】

【数 6 6】

$$NCUMMEAN_i(t) = \frac{1}{t - t_f + 1} \sum_{k=t_f}^t v_i(k)$$

$$NCUMVAR_i(t) = \frac{1}{t - t_f} \sum_{k=t_f}^t (v_i(k) - NCUMMEAN_i(t))^2$$

【 0 1 8 9 】

説明を判りやすくするために、各構造化残差変換が単一センサの故障に相当すると仮定すれば、故障のセンサがないか、または i 番目のセンサが故障のときは、次式が成り立つ。

【 0 1 9 0 】

【 数 6 7 】

$$NCUMVAR_i(t) \sim \frac{1}{t - t_f} \chi^2(t - t_f - 1)$$

【 0 1 9 1 】

したがって、選択された有意水準 および時点 t を用いると、n 個の NCUMVARs 間で、しきい値 $g_{NCUMVAR} = [1 / (t - t_f)] \chi_a^2(t - t_f - 1)$ よりも小さい確実に 1 つの NCUMVAR が存在すると、精度故障をもつセンサを識別定し、識別イベント 1 5 8 を発生する。

【 0 1 9 2 】

6 . 推定ユニット

推定ユニット 1 6 0 は、識別ユニット 1 5 0 が識別イベント 1 5 8 を発生した場合だけ、起動される。この時、推定ユニットは、識別イベントを発生するのに機能した構造化残差変換に対応するモデルに基づく故障の大きさ、故障データおよび行列 U_q を最適の形で推定する。この最適推定は、例えば Martens と Naes “Multivariate Calibration (多変量キャリブレーション)”、John Wiley and Sons, New York, 1989 に記載された公開されている既知の方法に基づくものである。

【 0 1 9 3 】

最適推定は、方向 U_q での時間関数 $f_q(t)$ を選択することにより得られる。ここでは、式 2 4 と同様に、 U_q が非単一値だけをその中に維持する B_q における単一値分解の直交左側行列である。言い換えれば、次式を最小にすることである。

【 0 1 9 4 】

【 数 6 8 】

$$J = \|e^*(t)\|^2 = \|e(t) - U_q f_q(t)\|^2 \quad (52)$$

【 0 1 9 5 】

この問題の少なくとも 1 つの自乗解は次式になる。

【 0 1 9 6 】

【 数 6 9 】

$$\hat{f}_q(t) = U_q^T e(t) \quad (53)$$

【 0 1 9 7 】

最初の故障の大きさ $f_q(t)$ は、式 2 5 を用いて推定できる。

【 0 1 9 8 】

【 数 7 0 】

10

20

30

40

50

$$\hat{\mathbf{f}}_i(t) = (\mathbf{D}_q \mathbf{V}_q^T)^+ \hat{\mathbf{f}}_q(t) \quad (54)$$

【 0 1 9 9 】

ここで ()⁺ は、当業者には既知の Moore-Penrose 疑似逆関数である。構造化残差ユニット 1 3 0 は、それが維持する各構造化残差に対して推定行列 1 3 4

【 0 2 0 0 】

【 数 7 1 】

$$\Xi_i (\mathbf{D}_q \mathbf{V}_q^T)^+ \mathbf{U}_q^T \quad (55) \quad 10$$

【 0 2 0 1 】

を維持する。故障を識別した構造化残差に対応する推定行列を使用して、等式エラー 1 2 8 を、前処理されたセンサ値スペース 1 3 6 内の故障ベクトルの推定に写像する。次に、推定ユニットは、前処理ユニットからの逆拡大縮小化 1 1 6 を適用して、最初のセンサスペース 1 6 8 内に故障ベクトルの推定を得る。

【 0 2 0 2 】

【 数 7 2 】

$$\hat{\mathbf{f}}_u(t) = \text{diag} \left(\frac{1}{s_1} \quad \frac{1}{s_2} \quad \Lambda \quad \frac{1}{s_2} \right) \Xi_i (\mathbf{D}_q \mathbf{V}_q^T)^+ \mathbf{U}_q^T \mathbf{e}(t) \quad (56) \quad 20$$

【 0 2 0 3 】

図 5 は、センサ 2 のバイアス故障に対する推定ユニットの出力を示す。図 6 は、センサ 5 のドリフト故障に対する推定ユニットの出力を示す。両者の場合、故障サイズは正確に推定される。

【 0 2 0 4 】

7. 代替ユニット

代替ユニット 1 7 0 は、推定ユニットにより推定された (式 5 6) 最初のセンサスペース 1 6 8 における故障ベクトルの推定を単純に行い、センサ値 1 0 8 の測定されたベクトルから、推定された故障を差し引いて代替値 1 7 8 のベクトルを生成する。 30

【 0 2 0 5 】

【 数 7 3 】

$$\hat{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{u}(t) - \hat{\mathbf{f}}_u(t) \quad (57)$$

【 0 2 0 6 】

代替ユニットは、推定ユニット 1 6 0 が機能するときだけ機能し、また識別ユニット 1 5 0 が識別イベント 1 5 8 を発生した場合だけ機能する。さらに安全機能として、装置のオペレータは、代替ユニットの機能を確実に無効にできる。 40

【 0 2 0 7 】

8. 分類ユニット

分類ユニット 1 8 0 は、センサの故障のタイプに関する診断情報を計算する。特に 4 タイプの故障、すなわち完全故障、バイアス、ドリフトおよび精度劣化が考慮される。

【 0 2 0 8 】

分類ユニットは、分類イベント 1 5 8 が発生しているときだけ機能する。センサが最初に故障であると識別された時点から、測定されたセンサ値のバッファを維持し、当該センサに対する推定故障サイズのバッファもまた維持する。これらの 2 つのバッファにおける情報を分析し、それを用いて該当センサに対する故障のタイプを分類する。分析は主として 50

統計的推定を使用し、したがって分類ユニットの調節可能なパラメータである有意水準を必要とする。

【 0 2 0 9 】

説明を判りやすくするために、単一センサ故障が、識別ユニット 1 5 0 により識別されていることを前提とする。分類ロジックのフローダイアグラムは、図 3 に示されている。

【 0 2 1 0 】

8 . 1 分類タイプ：完全故障

完全故障は、故障センサの測定値 1 0 8 に関する回帰分析を実施することにより求められ、回帰線が良く一致し、ゼロの傾きをもつ統計推定により表示される。

【 0 2 1 1 】

$\{k, u_i(k) \mid k = t_{id}, \Lambda, t\}$ を回帰線が計算される点のシーケンスとする

ここで、 t_{id} はセンサが故障と識別された点であり、また t は現在の時点である。

【 0 2 1 2 】

標準最小自乗回帰を用いて、点と最良の一致線との間の残差値を最小にすることにより、傾き および y - 切片 が次のように推定される。

【 0 2 1 3 】

【数 7 4】

$$\hat{\beta} = \frac{\sum_{k=t_{id}}^t (k - \bar{k})(u_i(k) - \bar{u}_i)}{\sum_{k=t_{id}}^t (k - \bar{k})^2} \quad (58)$$

$$\hat{\alpha} = \bar{u}_i - \hat{\beta} \bar{k}$$

【 0 2 1 4 】

ここで

【 0 2 1 5 】

【数 7 5】

$$\bar{k} = \frac{1}{t - t_{id} + 1} \sum_{k=t_{id}}^t k$$

$$\bar{x}_i = \frac{1}{t - t_{id} + 1} \sum_{k=t_{id}}^t u_i(k) \quad (59)$$

【 0 2 1 6 】

傾きが統計的にゼロに等しいかどうかを調べるために、下記の統計値を作成する。

【 0 2 1 7 】

【数 7 6】

$$|t_{\beta}| = \frac{|\hat{\beta}|}{SD(\hat{\beta})} \quad (60)$$

【 0 2 1 8 】

ここで $\hat{\beta}$ の標準偏差は次式で求められる。

【 0 2 1 9 】

【数 7 7】

$$SD(\hat{\beta}) = \frac{\sigma}{\sqrt{\sum_{k=t_{id}}^t (k - \bar{k})^2}} \quad (61)$$

【 0 2 2 0 】

そして残差の標準偏差 は次式により推定される。

【 0 2 2 1 】

【 数 7 8 】

10

$$\hat{\sigma} = \sqrt{\frac{\sum_{k=t_{id}}^t \hat{e}_i^2(k)}{t - t_{id} - 1}} \quad (62)$$

【 0 2 2 2 】

ここで、

【 0 2 2 3 】

【 数 7 9 】

20

$$\hat{e}_i(k) = u_i(k) - (\beta k + \alpha)$$

【 0 2 2 4 】

は残差エラーである。

式 6 0 により得られる統計値は、 $t - t_{id} - 1$ の自由度をもつスチューデント t 分布を満足する（例えば Birkes および Dodge “Alternative Method of Regression (回帰の代替方法) ”、John Wiley & Sons 1993 を参照のこと）。

30

回帰線の一致度は、特定のしきい値を上回る線型相関係数により求められる。

【 0 2 2 5 】

8 . 2 分類タイプ：バイアス

バイアスは、推定ユニット 1 6 0 により計算された故障センサの故障サイズ推定 1 6 8 に関する回帰分析を実施することにより求められ、回帰線が良く一致し、ゼロの傾きをもち、ゼロでないバイアスをもつことを統計的に推定して示される。

$\{k, f_i(k) \mid k = t_{id}, \Delta, t\}$ を、回帰線を計算する一連の点とする。ここで t_{id} は、センサが故障と識別される点であり、 t は現時点である。ゼロの傾きに対する検定は、故障サイズシーケンス $f_i(k)$ がセンサ値シーケンス $u_i(k)$ に替わる以外は、完全欠陥の分類と同じである。回帰線の一致度は、特定のしきい値を越える線型相関係数により

40

求められる。

ゼロでないバイアスを検定するために次の統計値を用いる。

【 0 2 2 6 】

【 数 8 0 】

$$|t_\alpha| = \frac{|\bar{\alpha}|(t - t_{id} + 1)}{\sigma} \quad (63)$$

【 0 2 2 7 】

これは、 $t - t_{id} - 1$ の自由度をもつスチューデント t 分布をも満足する。

50

【 0 2 2 8 】

8 . 3 分類タイプ：ドリフト

ドリフトは、推定ユニット 1 6 0 により計算された故障センサの故障サイズ推定 1 6 8 に関する回帰分析を行うことにより求められ、回帰線が良く適合し、ゼロでない傾きをもつことを統計的に推定して示される。

【 0 2 2 9 】

8 . 4 分類タイプ：精度劣化

精度劣化は、推定ユニット 1 6 0 により計算された故障センサの故障サイズ推定 1 6 8 に関する回帰分析を実施することにより求められ、回帰線が良く適合せず、ゼロの傾きをもち、またゼロのバイアスをもつことを統計的に推定して示される。

10

【 0 2 3 0 】

精度劣化は、識別イベント 1 5 8 がセクション 5 . 3 の N C U M V A R 検定により発生した場合にも表示される。

【 0 2 3 1 】

9 . 均等物

上記の詳細は、本発明の好ましい実施形態に関するものである。本発明は、これらの詳細には限定されるものではないと理解されるべきである。当業者によって行われる代替および変更は、本発明の精神から逸脱することなく細部の実施形態に対して実施できる。これらの改変は、本発明の範囲内にあるものとする。

【図面の簡単な説明】

20

【図 1】 本発明の好ましい実施形態の 8 つの演算ユニットおよびこれらのユニット間の関係を示す。

【図 2】 図 1 の実施形態における識別プロセスのフローダイアグラムを示す。

【図 3 A】 図 1 の実施形態における分類プロセスのフローダイアグラムを示す。

【図 3 B】 図 1 の実施形態における分類プロセスのフローダイアグラムを示す。

【図 4】 ボイラプロセスでの故障の発生時に、急速に増大し、しきい値を上回る本発明の検出インデックスを示す。

【図 5】 ボイラプロセスのセンサ 2 におけるバイアス故障の発生時の推定ユニットの出力を示す。

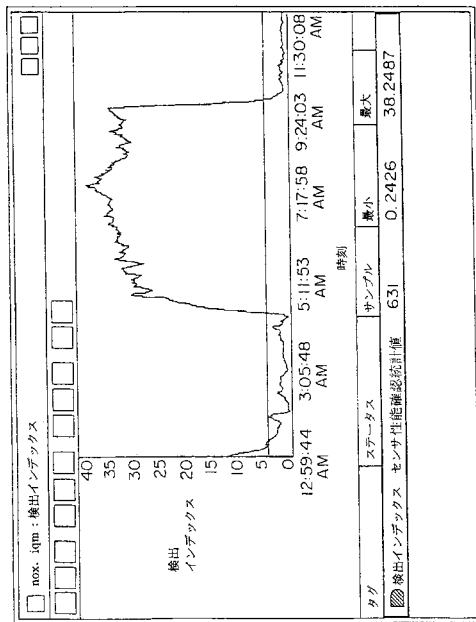
【図 6】 ボイラプロセスのセンサ 5 におけるドリフト故障の発生時の推定ユニットの出力を示す。

30

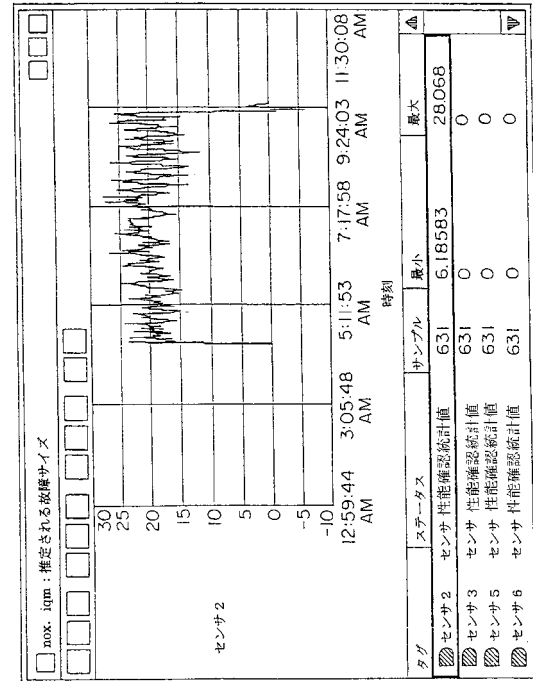
【図 7 A】 ボイラプロセスのセンサ 5 におけるドリフト故障の発生時に応答する本発明の N S F S R インデックスを示す。

【図 7 B】 ボイラプロセスのセンサ 5 におけるドリフト故障の発生時に応答する本発明の N S F S R インデックスを示す。

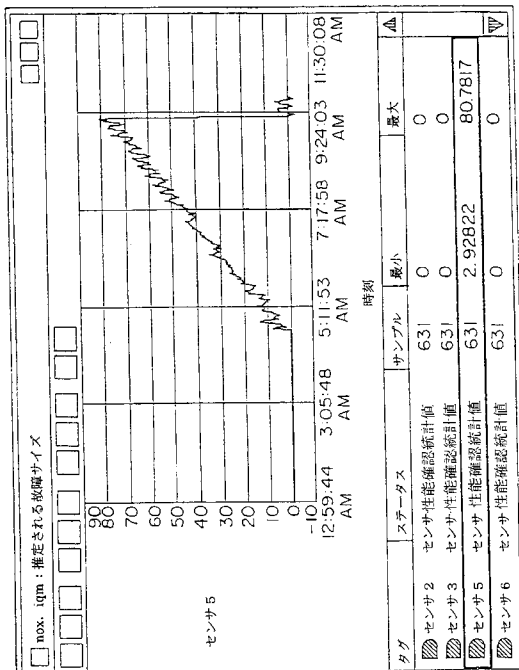
【図 4】



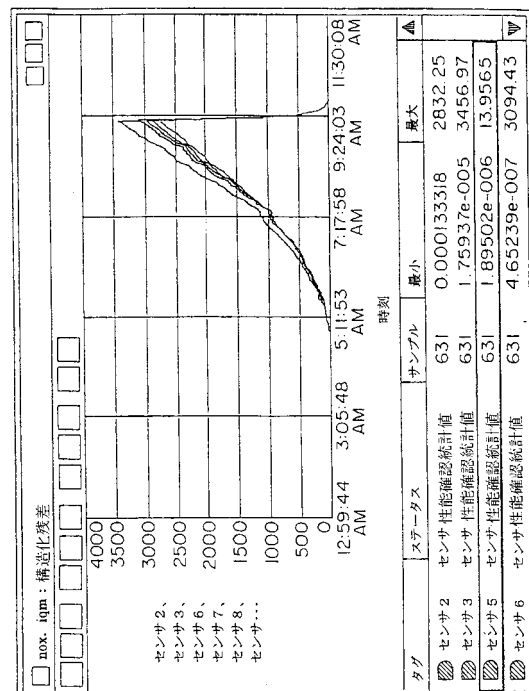
【図 5】



【図 6】



【図 7 A】



フロントページの続き

- (72)発明者 クイン・エス・ジョー
アメリカ合衆国，テキサス州 78750，オースチン，シーダークリフ ドライブ 11584
- (72)発明者 ガイバー・ジョン
アメリカ合衆国，ペンシルバニア州 15275，ピッツバーグ，パーク ウェスト ドライブ
202

審査官 二階堂 恭弘

- (56)参考文献 特開平08-320726(JP,A)
特開平10-094943(JP,A)
特開平06-208568(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl.，DB名)
G05B 23/00-23/02
G01D 21/00