CE 行列を用いた異常診断[†]

濱口孝司^{1††}・三浦秀都¹・米谷昭彦¹・橋本芳宏²・戸茱吉孝¹

¹ 名古屋工業大学工学部 生産システム工学科, 466-8555 名古屋市昭和区御器所町

² 名古屋工業大学工学部 システムマネジメント工学科, 466-8555 名古屋市昭和区御器所町

本論文ではオンラインリアルタイムに異常源を診断できる容易なアルゴリズムを提案する。この方法は、一方向的な変化だけでなく、正常に復帰する変化や振動的な変化に対しても異常源診断が可能という点で単層の符号付き有向グラフより優れ、異常進行に伴い階層数が急増する多層アルゴリズムに比べて、必要とする記憶容量がきわめて少ないという特徴をもつ。また、CE 行列の利用により、異常経路をブール代数で算出でき、経路をいちいち探索する必要がない。

緒 言

従来の符号付き有向グラフを用いた異常診断法(Shiozaki *et al.*, 1988; Shiozaki *et al.*, 1985; Shiozaki *et al.*, 1989)は、対象プラントの状態変数間の因果関係とセンサから得られるアラーム情報を用いて定性的に異常原因の同定を行っていた。しかし、瞬間的な情報しか用いていないので、プラント内の制御系動作や対応操作などにより状態変数の一部が正常値に復帰した場合、異常の伝播路(パス)が分断され異常原因を探索できなくなるという問題がある。ほとんどのプラントには制御系が存在するし、オペレータがマニュアルで何らかの対処療法的な対策を取りながら異常原因を探ることも多いと考えられるため、状態変数の一部が正常値に復帰したり、オーバーシュートや振動現象が生じた場合でも異常原因を探索できるシステムが望まれる。この要請に対応して、動的に変化するデータを利用できる多層グラフを用いた異常診断法(Umeda *et al.*, 1980)が提案されているが、グラフ構造が複雑になり状態変数の変化とともに層の数が増えるため、必要な記憶情報も非常に多くなるという宿命を抱えている。また、制御系部分の符号付き有向グラフを特殊化し、PV を測定値と真の値の2つに分け MV が正の場合、PV の測定値が零でも真の値は負であるとして外乱から MV へのパスを成立させる異常診断法(Tsuge *et al.*, 1984)が提案されている。この手法では PV の真の値の設定に別のルールを導入することにより、正常値への復帰は表現できるようにしているが、振動現象は表現できない。3層表現有向グラフを用いた診断法では PID コントローラの場合、過去の PV のノードは積分値に対応する。

前報(Hashimoto *et al.*, 1991)では符号付き有向グラフの概念を用いて、制御系動作や対応操作などによる状態変数の挙動を説明できる3層表現有向グラフを提案した。3層表現有向グラフは現在の層とは別に、過去の状態変数層である '+'、'-' という過去ノードを持ち、過去に '+'(−)' になったという情報を記憶する。その結果、過去ノードにより異常の伝播路であるパスの分断を防ぎ、異常原因を探索することが可能になる。この3層表現有向グラフには、符号付き有向グラフに見られる '+'、'-' の枝という概念がなく、全て '+' の枝のみで構成される。ゆえに、3層表現有向グラフは要素 0, 1 のみの行列で表現することが可能になる。本論文

では、状態変数間の因果関係を表す CE 行列(Cause-Effect 行列)を用いて3層表現有向グラフを表し、異常原因を高速探索する手法を提案する。

1. 3層表現有向グラフ

1.1 符号付き有向グラフ

Fig. 1 の例題プラントとその符号付き有向グラフ Fig. 2 を用いて従来の符号付き有向グラフを用いた異常診断法の問題点を説明する。Fig. 1 のシステムにおいて、タンクへの流入量(F_i)とタンクの水位(L)は測定できるが、流出量(F_o)は測定できないとする。このシステムで Fig. 3 にて示した L と F_i の変化が生じたと想定する。Fig. 3 における番号は以下の stage を意味する。

- stage 1 流出量(F_o)が増えて水位(L)低下。
- stage 2 水位低下のため流入量(F_i)を増やした。
- stage 3 水位が基準値に戻った。
- stage 4 水位が上がりすぎた。

各 stage での符号付き有向グラフは Fig. 4 のようになる。ノード内の '+' はしきい値上限を超えた場合、'-' はしきい値下限を超えた場合、'0' はしきい値内の場合である。

stage 1 では流出量(F_o)の増加が観測されず、水位(L)の減少だけが観測されるが、流出量の増加が水位低下の原因である可能性を示す有効なパスが成立する。

stage 2 では水位低下に対して流入量(F_i)へマニュアル介入を行なっているため、従来手法では有効なパスをつくることができない。そこで、マニュアル介入を示すリンクをオペレータに加えてもらうことで流入量を '+' とする。このマニュアル介入のリンクには複数の変化を基に決定した場合でも、どれか一つ変化したものから操作変数に結んでもらえばよく、変化しているどの変数から結んでもらってもかまわない。その操作した変数へのリンクであれば、複数結んだとしても問題は生じないので、オペレータがどれを操作したか指定してさえくれば、コンピュータが勝手に変化した変数のうちの一つからリンクを結ぶことにしても診断は問題なく行える。

stage 3 では水位(L)が正常値 '0' に戻っているため、流出量(F_o) '+' が原因で流入量(F_i) '+' になった可能性を示す有効なパスをつくることができない。

stage 4 では流入量(F_i)を '+' にした影響がオーバーシュートとして現れ、水位(L)が逆に '+' になる事態が生じている。stage 4 においては、流出量(F_o)が根本原因であることを示す有効なパ

[†] 1997 年 11 月 14 日受理

^{††} tom@system.nitech.ac.jp

Fig. 1 Simple example plant

Fig. 2 Single stage signed directed graph

Fig. 3 Trend in abnormal states

スをつくり出すことができないだけでなく、流入量が原因であるというパスを生じてしまう。

1.2 3層表現有向グラフ

前述の stage 3, stage 4 のような場合にも、真の異常原因を探索できる 3 層表現有向グラフについて説明する。3 層表現有向グラフでは、現在の状態変数の層以外に、'+'、'-' の符号を割り当てた過去の状態変数の層を 1 層ずつ用意する。状態変数のうち、測定変数に対しては現在の点と過去の '+'、'-' 各 1 点の合計 3 点を用意し、非測定変数には過去の '+'、'-' の履歴を示す計 2 点を用意する。現在の層は、現在の測定値の状態を表示するための層である。測定変数の状態は '+'、'-'、'0' で表現する。現在層にある点の符号をすべて説明できれば、プラントの診断時の状態を説明できたことになる。

過去の層は、すべての状態変数を 2 組持ち、それぞれの層にあらかじめ '+' と '-' の符号を割り当てる。'+' ('-') を記憶する点を過去+ (過去-) と呼ぶ。測定変数の初期状態は '0' で、現在層が '+' ('-') になったら、過去+ ('-') のノードは '+' ('-') の記号を記憶する。したがって 1 度測定値が '+' ('-') になれば、その後測定値が '0' に戻っても '+' ('-') の情報が記憶され続ける。現在層は現在の状態を表示するためのノードであり、診断には利用しない。

現在層と過去層の間のリンクは同一変数間のみで設定し、リンクの方向は過去から現在への 1 方向のみである。異常原因の探索は過去層で行う。異常診断では、単一原因にて全ての測定異常が説明できるように、被測定点に対して都合のよい符号を '0'、'+', '-' から選んで割りあてる。そのため、非測定変数のノードは、診断する度に未定義の状態に戻され、都合のよい符号が割りあて直される。

3 層表現有向グラフにより前述の例題 stage を図示すると Fig. 5 のようになる。Fig. 5 において過去ノードの変数には先頭に文字 "I" を付けており、1 番上が過去+層、2 番目が現在層、3 番目が過去-層である。この過去層のノードはコントローラにおいて

Fig. 4 Problem of single-stage directed graph

Fig. 5 Expression using a three-layer directed graph

は積分要素に対応する。被制御量自体が大きな偏差を持たなくても操作量が大きくなる現象もこの過去のノードにより説明する。

3 層表現有向グラフを用いた異常診断法では、プラントが定常状態に復帰した場合、全ての過去層を '0' に復帰させ、マニュアル介入したリンクを抹消することで初期化を行なう。

1.3 3層表現有向グラフの効能

3 層表現有向グラフを用いると測定変数の過去の状態を記憶できるので、Fig. 4 の stage 3, stage 4 で示した測定点の符号 '0' が引き起こすパスの分断を Fig. 5 のように防止できる。

Fig. 5 の stage 3 では水位 (\$L\$) が '0' に戻っているが (\$IL-\$) に水位低下が過去に生じていたことが記憶されており、流入量 (\$F_i\$) が現在増えている状態を (\$IF_o+\$) \$\rightarrow\$ (\$IL-\$) \$\rightarrow\$ (\$IF_i+\$) \$\rightarrow\$ (\$F_i+\$) というパスで説明できる。

Fig. 5 の stage 4 では水位 (\$L\$) が '+' になってしまっているが、このとき (\$IL-\$) が '-' であり続けているため、(\$IF_o+\$) \$\rightarrow\$ (\$IL-\$) \$\rightarrow\$ (\$IF_i+\$) \$\rightarrow\$ (\$IL+\$) \$\rightarrow\$ (\$L+\$) というパスをつくることができ、最初に流出が増えた (\$IF_o+\$) こそが真の異常原因であると指摘できる。

3 層表現有向グラフは上記のように、制御系動作や対応操作によって状態変数の一部が正常値に復帰したり、オーバーシュートが生じた場合だけでなく、振動現象が生じた場合でも異常を示すパスの分断を防ぐことができる。また、従来の符号付き有向グラフの約 2 倍程度の構成要素 (ノードとリンク) 数で表現できるため、測定変数の過去の履歴をすべて記憶する多層グラフに比べ、記憶容量も少なくグラフ構造もそれほど複雑にはならない利点をもつ。

2. 行列演算による高速探索法

2.1 基本アルゴリズム

本論文では3層表現有向グラフを用いた異常原因の探索方法にCE行列(Cause-Effect行列)を利用することで、ひとつひとつの枝を探索する必要のない高速な探索方法を提案する。

CE行列とは変数間に存在する影響の因果関係を「有:1」「無:0」にて示した行列である。各ノードの影響が隣接ノードへ到達するのに要する動作を1ステップと呼ぶ。行列 A をCE行列とすると、行列 A の成分 a_{ij} はj番目変数の変化がi番目変数へ1ステップで到達することを示す。 A^k ではkステップで到達できる変数間の関係を表す。CE行列の例をTable 1に示す。

異常原因を探索するためには、全てのノードの到達可能ノードを把握しておく必要がある。そこで、任意のノードから到達可能なノードの情報を持つ行列を可到達行列 $\tilde{A}$ とする。 $\tilde{A}$ の導出はブール代数演算を利用すると式(1)で定義できる。式(1)はブール代数の無限級数であるが A の次元以下の有限の級数である。

$$\tilde{A} = \sum_{i=0}^{\infty} A^i = \sum_{i=0}^n A^i \quad (1)$$

この行列は経路の存在を示すもので、その経路上のノードが0か1かは関係しない。経路の途中で正常のノードがあると、異常の伝播経路としては不適切である。そのため、経路上には状態が不明な非測定点と異常が観測された測定点だけが並ぶようにCE行列の演算を考える。非測定点か測定点かにより、まず、CE行列を次のように4つの部分に分割する。

$$A = \left(\begin{array}{c|c} A_{11} & A_{12} \\ \hline A_{21} & A_{22} \end{array} \right) \quad (2)$$

A_{11} : 非測定点から非測定点への枝に相当する行列

A_{12} : 測定点から非測定点への枝に相当する行列

A_{21} : 非測定点から測定点への枝に相当する行列

A_{22} : 測定点から測定点への枝に相当する行列

非測定点間の可到達行列を $\tilde{A}_0$ とし、式(3)を用いて異常原因を探索する前に予め計算しておくことでオンラインの計算量を減らすことができる。

$$\tilde{A}_0 = \sum_{i=0}^{\infty} A_{11}^i = \sum_{i=0}^{n_0} A_{11}^i \quad (3)$$

測定点に異常が観測されると、式(4)を用いて異常を示した測定点を含む可到達行列 $\tilde{A}_1$ を計算する。 b_1 は異常を観測した変数から $\tilde{A}_0$ 内の変数への影響の有無、 c_1 は $\tilde{A}_0$ 内の変数から異常を観測した変数への影響の有無を表す。測定点の状態が変化する度に、変化した測定点を含む可到達行列を計算する。可到達行列の一般式 $\tilde{A}_k$ を式(5)に示す。

$$\tilde{A}_1 = \left(\begin{array}{c|c} \tilde{A}_0 + \tilde{A}_0 \cdot b_1 \cdot c_1 \cdot \tilde{A}_0 & \tilde{A}_0 \cdot b_1 \\ \hline c_1 \cdot \tilde{A}_0 & 1 \end{array} \right) \quad (4)$$

$$\tilde{A}_k = \left(\begin{array}{c|c} \tilde{A}_{k-1} + \tilde{A}_{k-1} \cdot b_k \cdot c_k \cdot \tilde{A}_{k-1} & \tilde{A}_{k-1} \cdot b_k \\ \hline c_k \cdot \tilde{A}_{k-1} & 1 \end{array} \right) \quad (5)$$

$\tilde{A}_k$ のj列は列項目j番目の変数から影響を受ける変数を示す。よって、j列内の測定変数に対応する行項目の要素が全て1であれば、観測された異常が単一の異常原因で説明できたことになり、列項目j番目の変数が異常原因となる。

前の可到達行列がすでに算出されているので複数ステップで到達するパスが1回の行列演算で算出できる。 b_k , c_k の要素の数が多く、 b_k , c_k が零の多いベクトルであれば、1の要素の分だけ(5)に相当する演算をすることにより、さらに計算量を減らせる可能

Table 1 Cause-Effect matrix

	IF_0+	IF_0-	$IL+$	$IL-$	IF_1+	IF_1-
IF_0+	1	0	1	0	0	0
IF_0-	0	1	0	1	0	0
$IL+$	0	1	1	0	1	0
$IL-$	1	0	0	1	0	1
IF_1+	0	0	0	(1)	1	0
IF_1-	0	0	0	0	0	1

Table 2 Trend in abnormal states

stage	F_1	$[L_1]$	$[F_2]$	$[A]$	$[L_2]$	F_4	$[F_5]$	異常原因
0	0	[0]	[0]	[0]	[0]	0	[0]	—
1	0	[0]	[0]	[0]	[0]	—	[0]	—
2	0	[0]	[0]	[+ ?]	[0]	—	[0]	—
3	0	[0]	[0]	[+ ?]	[− ?]	—	[0]	—
4	0	[0]	[+ ?]	[+]	[− ?]	—	[0]	$A+$, F_4-
5	+ ?	[0]	[+ ?]	[+]	[−]	—	[0]	F_4-
6	+ ?	[− ?]	[+]	[+]	[− ?]	—	[0]	F_4-
7	+ ?	[− ?]	[+]	[+]	[0]	—	[0]	F_4-
8	+	[0]	[+]	[+]	[0]	—	[0]	F_4-
9	+	[+ ?]	[+]	[+]	[0]	—	[0]	F_4-
10	+	[0]	[+]	[+]	[0]	—	[0]	F_4-

性もある。

2.2 行列演算の例題

Fig. 1のプロセスを例に説明する。Fig. 5のCE行列をTable 1に示す。

Table 1において IF_0+ , IF_0- は非測定点であり、 $IL+$, $IL-$, IF_1+ , IF_1- は測定点なので小行列は以下になる。なお、 A_{22} 行列内の(1)はマニュアル操作を意味し、これ以降の行列では通常の伝播要素1として扱う。

$$A_{11} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad A_{12} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$A_{21} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix}, \quad A_{22} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & (1) & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

最初、すべての測定変数は正常であり、 $\tilde{A}_0$ は非測定変数のみで構成される。

$$\tilde{A}_0 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} IF_0+ \\ IF_0- \end{pmatrix}$$

stage 1では L の減少が観測されるので、 $IL-$ から IF_0+ , IF_0- への影響を表す b_1 , IF_0+ , IF_0- から $IL-$ への影響を表す c_1 を用いて $\tilde{A}_1$ を求める。 $\tilde{A}_1$ では要素 $[(3, 1), (3, 3)]$ が1である。よって、 IF_0+ と $IL-$ が $IL-$ をひきおこした異常原因の候補となる。

$$b_1 = (0 \ 1)^T, \quad c_1 = (1 \ 0)$$

$$\tilde{A}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad \begin{pmatrix} IF_0+ \\ IF_0- \\ IL- \end{pmatrix}$$

stage 2ではマニュアル操作によって入力流量が増加したので、 IF_1+ に対応する b_2 , c_2 を用いて $\tilde{A}_2$ を求める。 $\tilde{A}_2$ では要素 $[(3, 1), (4, 1)], [(3, 3), (4, 3)]$ が1であり、 IF_0+ と $IL-$ が異常原因の候補となる。

Table 3 Cause-Effect matrix

	IF ₁ +	IF ₁ -	IF ₄ +	IF ₄ -	IF ₂ +	IF ₂ -	IL ₁ +	IL ₁ -	IL ₂ +	IL ₂ -	IA+	IA-	IF ₅ +	IF ₅ -
IF ₁ +	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
IF ₁ -	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
IF ₄ +	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
IF ₄ -	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
IF ₂ +	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0
IF ₂ -	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0
IL ₁ +	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
IL ₁ -	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0
IL ₂ +	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0	1
IL ₂ -	0	0	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	1	0
IA+	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
IA-	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
IF ₅ +	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0
IF ₅ -	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1

$$\mathbf{b}_2 = (0 \ 0 \ 0)^T, \quad \mathbf{c}_2 = (0 \ 0 \ 1)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_2 = \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right), \quad \left(\begin{array}{c} IF_0+ \\ IF_0- \\ IL- \\ IF_1+ \end{array} \right)$$

stage 3 では水位 L が 0 になる。しかし、過去の層に変化がないので $\tilde{\mathbf{A}}_3$ は $\tilde{\mathbf{A}}_2$ と等しい。

$$\tilde{\mathbf{A}}_3 = \left(\begin{array}{ccc|ccc} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{array} \right), \quad \left(\begin{array}{c} IF_0+ \\ IF_0- \\ IL- \\ IF_1+ \end{array} \right)$$

stage 4 では $IL+$ に対応する $\mathbf{b}_4, \mathbf{c}_4$ を用いて $\tilde{\mathbf{A}}_4$ を求める。この状態では $IF_0+, IF_0-, IL-, IF_1+, IL+$ とすべての変数が異常原因の候補となりうる事がわかる。

$$\mathbf{b}_4 = (1 \ 0 \ 0 \ 0)^T, \quad \mathbf{c}_4 = (0 \ 1 \ 0 \ 1)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_4 = \left(\begin{array}{ccc|ccccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right), \quad \left(\begin{array}{c} IF_0+ \\ IF_0- \\ IL- \\ IF_1+ \\ IL+ \end{array} \right)$$

2.3 異常発現時刻を用いた絞り込み

2.2 で探索された異常原因候補の中には、異常を観測した順序を考慮すると起こり得ない異常原因候補が存在する。そこで、異常発現時刻を用いて不適当な異常原因候補を削除する。

2.2 の $\tilde{\mathbf{A}}_4$ では要素 (3, 5), (4, 5) が 1 であり、 $IL+$ の影響で $IL-, IF_1+$ になることを示している。しかし、異常発現時刻を考慮すると、最も遅く異常を示した $IL+$ から $IL-, IF_1+$ が影響を受けるとは考えられない。そこで、 $IL+$ からの影響を示す式 (6) から $IL-, IF_1+$ に関する要素を 0 にして式 (7) のように変更する。

$$\tilde{\mathbf{A}}_3 \cdot \mathbf{b}_4 = (1 \ 1 \ 1 \ 1)^T \quad (6)$$

$$\tilde{\mathbf{A}}_3 \cdot \mathbf{b}_4 = (1 \ 1 \ 0 \ 0)^T \quad (7)$$

式 (7) を用いて求めた $\tilde{\mathbf{A}}_4$ では、異常発現時刻に関して不適当な異常原因候補が削除され、 $F_0+, L-$ が異常原因の候補として絞り込まれるようになっている。

$$\tilde{\mathbf{A}}_4 = \left(\begin{array}{ccc|ccccc} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{array} \right), \quad \left(\begin{array}{c} IF_0+ \\ IF_0- \\ IL- \\ IF_1+ \\ IL+ \end{array} \right)$$

Fig. 6 Example plant

Fig. 7 A three-layer directed graph

2.4 5段階パターン

有向グラフを用いて異常診断を行なう場合、状態が正常か異常かを区別するしきい値の設定が重要である。しきい値の設定が不適当であると、異常を見逃したり、正常であるのに異常と判定して誤診や診断不能を引き起こす。この問題を解決するため潮崎ら (Shiozaki *et al.*, 1988) は、状態を以下の 5 段階に分類する方法を提案している。

$$+, +?, 0, -, -?$$

ノードが 0 でなくれば異常伝播経路を確保するため、可到達行列に組み込まれる。しかし、ノードが $+, -?$ もしくは $-?$ で異常として確定していない場合には根本異常になり得ないと仮定し、診断対象の行には用いない。確定している変数すべてに影響を与える変数が異常原因としてリストアップされる。したがって、診断結果は $+$ あるいは $-$ が観測された時点で初めて出力される。

3. 例題

3.1 例題プラント

Fig. 6 のプラントを対象として 3 層表現有向グラフによる異常診断を行う。このプラントを 3 層表現有向グラフで表すと Fig. 7 のようになる。Fig. 7 の CE 行列を Table 3 に示す。

3.2 診断結果

F_4- を異常原因としてプラント内に異常が伝播していくことを想定する。その場合のノードの状態変化と 3 層表現有向グラフ

から探索される異常原因を **Table 2** に示す。[] は測定変数を表す。異常原因の探索は $A+$ を観測した stage 4 から始まる。stage 4 では $A+$, F_4- が異常原因として挙げられているが stage 5 以降では F_4- に絞られている。また, stage 7 以降では L_2 が制御系によって回復され, L_1 の値は振動しているが, 異常原因として F_4- を示し続けている。コントローラの性能によっては, 異常の伝播が被制御量に現れる前に操作により回復されてしまう場合もあるが, コントローラの誤差の積分を過去のノードとして用いることにより, 有向グラフの分断を防ぐことができる。

結 言

本論文では Cause-Effect 行列を用いて制御系動作や対応操作による一部状態変数の正常値への復帰などを説明できる 3 層表現有向グラフを表し, 異常原因を高速探索する手法を提案した。非測定点間のリンクを示す行列を診断前に予め計算しておくことで, オンライン計算量を減らして高速に異常原因を探索することができる。

[謝 辞] 本研究は河原克行, 田中良則, Stephane Booth の協力を得て行われた。研究に協力いただいた方々に感謝する。

Nomenclature

A	= CE-matrix	[—]
$\tilde{A}$	= the reachable nodes set	[—]
$A_{k-1} \cdot b_k$	= the existence of paths from the new node	[—]

$A_{k-1} \cdot b_k \cdot c_k \cdot A_{k-1}$	= the paths added by the new node	[—]
$c_k \cdot \tilde{A}_{k-1}$	= the existence of paths to the new node	[—]
F_k	= node corresponding to k-th flow rate	[—]
I^*	= previous state of the variable *	[e.g. IF_1]
L_k	= node corresponding to k-th liquid level of tank	[—]

Literature cited

- Hashimoto, Y., S. Yonezu, A. Yoneya and Y. Togari ; "Faults diagnosis utilizing a threelayer signed directed graph," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **17**, 810-815 (1991)
- Shiozaki, J., H. Matsuyama, K. Tano and E. O'Shima ; "Diagnosis of Chemical Processes by Use of Signed Directed Graphs-Extension to 5-Range Patterns of Abnormality-," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **10**, 233-239 (1988)
- Shiozaki, J., H. Matsuyama, E. O'Shima and M. Iri ; "An improved Algorithm for Diagnosis of System failures in the Chemical Processes," *Comput. and Chem. Eng.*, **9**, 285-293 (1985)
- Shiozaki, J., B. Shibata, H. Matsuyama and E. O'Shima ; "Fault Diagnosis of Chemical Processes Utilizing Signed Directed Graphs-Improvement by Using Temporal Information-," *IEEE Tr. Industrial Electronics*, **36**, 469-474 (1989)
- Tsuge, Y., J. Shiozaki, H. Matsuyama, E. O'Shima, Y. Iguchi, M. Fuchigami and M. Matsusita ; "Feasibility Study of Fault Diagnosis System for Chemical Plants," *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **10**, 240-248 (1984)
- Umeda, T., T. Kuriyama, E. O'Shima and H. Matsuyama ; "A graphical approach to cause and effect analysis of chemical processing systems," *Chem. Eng. Sci.*, **35**, 2379-2388 (1980)

Faults Diagnosis Utilizing CE-Matrices

TAKASHI HAMAGUCHI¹, HIDETO MIURA¹, AKIHIKO YONEYA¹,
YOSHIHIRO HASHIMOTO² and YOSHITAKA TOGARI¹

¹ Department of Systems Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466-8555

² Department of Systems Management and Engineering, Nagoya Institute of Technology, Nagoya 466-8555

Key words: fault diagnosis, signed directed graph, operation, control, cause-effect matrix.

In this paper, an algorithm is proposed for on-line real-time diagnosis of faults that cannot be diagnosed by conventional algorithms. Pulse-type failures or failures involving oscillating state variables, for example, can be diagnosed, and with far less memory than by a multistage algorithm in which the number of stages increases with fault proliferation. Through the use of a cause-effect matrix, possible fault proliferation paths can be rapidly calculated by a Boolean.

~~~~~