ロジックコントローラによって制御される システムの故障診断

正員 残間 忠直* 非会員 宮林 司**
正員 石田 宗秋*

Fault Diagnosis for System Controlled by Logic Controller

Tadanao Zanna*, Member, Tsukasa Miyabayashi**, Non-member, Muneaki Ishida*, Member

This paper concerns fault diagnosis for sequential control systems controlled by logic controllers. Incompleteness of the system model is regarded as nondeterministic. The considered systems are modeled by set-valued functions. Thus, the system model has more than one transition in each state of it. We propose a state space generation algorithm of the closed loop system of the plant model and the corresponding logic controller. Then, we show that the proposed algorithm yields only expected normal operation. Finally, we apply it to fault diagnosis for sequential control systems based on an idea that a nonexistent state and/or transition is faulty.

キーワード：故障検出，故障特定，ロジックコントローラ

Keywords: fault detection, fault identification, logic controller.

1. はじめに

離散事象システム (Discrete Event System: DES) とは，事象が離散的かつ非同期的に生起することにより状態が不連続に変化するようなシステムの総称である⁽¹⁾。DES に関する制御・解析等は，有限状態オートマトンを主とした言語理論⁽²⁾を中心に，グラフ的モデル⁽³⁾⁽⁴⁾，代数的モデル⁽⁵⁾⁽⁶⁾，論理モデル⁽⁷⁾⁽⁸⁾等さまざまな形式的モデルを用いて盛んに研究されている。

DES として捉えられるシステムは，計算機システム，通信ネットワークシステム，航空機運行システム，生産システムなど多岐に及ぶ。なかでも生産システムでは，あらかじめ定められた順序に従ってプロセスを逐次進めるシーケンス制御が産業界において広く用いられている。シーケンス制御を実行するための代表的な機器にはプログラマブルロジックコントローラ (Programmable Logic Controller: PLC) があり，そのプログラミング言語として，ラダー図 (Ladder Diagram) が挙げられる。ラダー図は信号の論理組合

せを視覚的に捉えることができ，従来からのシーケンス制御回路の知識をそのまま活かすことができる。しかしながら，ラダー図には信号の組合せのみしか表現されておらず，制御対象の状態の遷移関係が記述できていないため，仕様とシーケンスの対応がわかりづらいという欠点を持つ。このため，ラダー図によって制御される生産システムにおいて故障が生じたとき，その故障の検出・特定は一般には困難であるといえる。また，生産システムに限らず，システムにおける故障は，操作性，生産性および安全性の低下を招く，とりわけ，システムや人命の安全を確保する上で，事故の未然防止対策や故障の検出・特定・除去は，極めて重要な要素技術である。

DES の故障診断に関する研究として，Ozveren および Willsky らによる可観測性とフォールトトレランスの概念の導入が挙げられる⁽⁹⁾。これは，DES の出力系列に基づいて状態を推定し，想定しない観測出力を故障とする立場である。また，Sampath および Sinnamohideen は，故障事象が組み込まれた DES モデルに対して可診断性の概念を導入し，診断器の構成手続きと可診断性に関する必要十分条件を導出した⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾。

シーケンス制御系における故障診断問題に限定すると，藤本は制御対象モデルを離散時間多項式非線形システムの特別な場合と捉え，一般化した離散時間多項式非線形システムに対する制御器および観測器の設計法を提案し，制御対象の異常を検出することが可能であることを示した⁽¹²⁾。

* 三重大学工学部

〒514-8507 三重県津市栗真町屋町 1577

Faculty of Engineering, Mie University

1577 Kurimamachiya, Tsu, Mie 514-8507

** (株) 京三製作所

〒230-0031 神奈川県横浜市鶴見区平安町 2-29-1

Kyosan Electric Mfg. Co., Ltd.

2-29-1 Heian, Tsurumi, Yokohama, Kanagawa 230-0031

また、伊藤、南里らは、ペトリネットを用いて故障許容技術すなわちフォールトトレランスを考慮した故障診断法を開発し、棟間台車システムモデルに適用した⁽¹³⁾。

上述の故障診断は、想定された故障があらかじめ故障事象として組み込まれたオートマトンあるいはペトリネットなどでモデル化されたDESの状態推定に基づいている。したがって、想定される故障状態を含む制御対象の完全なモデルが必要となる。しかしながら、そのようなモデルは一般に得ることが困難であるばかりでなく、仮に得られたとしてもモデルの状態数が多くなり、結果的にモデルが複雑になるという問題が生じる。

そこで本稿では、故障の状態や事象を陽に含まないDESモデルに対する故障診断問題を考察する。具体的には、PLCとしてラダー図によって制御されるシーケンス制御系を例にとり、プラントモデルの不完全性を等価的に非決定的に捉え、プラントモデルの状態遷移を集合値関数として表現する。また、ラダー図とプラントモデルの閉ループ系を構成し、状態空間および状態遷移を与えるアルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムによって得られる閉ループ系の状態遷移図は、与えられた初期状態より生成し得る状態および状態遷移であることを示し、状態遷移図から逸脱した状態および状態遷移を故障状態とみなす。なお本稿では、リミットセンサなどのような2値状態のみ取り得る機器が何らかの原因で正常に動作していない状況を故障と想定する。次に、提案手法によって抽出された故障状態に対し、その状態の故障箇所を特定する手法を提案する。最後に、提案手法を具体例に適用し、その有効性を明らかにする。

2. 準備

本節では、準備として、プラントモデルを定式化し、ラダー図の形式的表現を与える。そして、両者の閉ループ系を構成する。

以下、 $\mathbb{Z}_+$ は0以上の整数の集合、 $\mathbb{Q}_+$ は0以上の有理数の集合、 $\mathbb{B}$ は二値変数（ブール変数）の集合を表す。また、任意の $b_1, b_2 \in \mathbb{B}$ に対し、 $\bar{b}_1$ は b_1 の論理否定を、 $b_1 \cdot b_2$ および $b_1 + b_2$ は、それぞれ b_1, b_2 の論理積および論理和を表す。

2.1 プラントモデル 本研究で扱うプラントモデルは、

$$x_p(k+1) \in f_p(x_p(k), u(k), w(k)) \dots\dots\dots (1)$$

$$y(k) = g_p(x_p(k), w(k)) \dots\dots\dots (2)$$

と記述されるものとする。ここで、 $k \in \mathbb{Z}_+$ は離散時間、 $x_p \in X_p \subseteq \mathbb{B}^{n_p}$, $u \in U \subseteq \mathbb{B}^m$, $w \in W \subseteq \mathbb{B}^q$ および $y \in Y \subseteq \mathbb{B}^r$ はそれぞれ、状態、内部入力、外部入力および出力である。また、 $f_p: \mathbb{B}^{n_p} \times \mathbb{B}^m \times \mathbb{B}^q \rightarrow 2^{\mathbb{B}^{n_p}} \setminus \emptyset$ は集合値関数とする。

2.2 ラダー図

2.2.1 ラダー図の動作 PLCの言語としてのラダー図を、図1⁽¹⁹⁾を例にとって説明する。ラダー図とは、シー

図 1 ラダー図の例

Fig. 1. Example of ladder diagram.

ケンス制御回路を構成する有接点リレーなどの制御装置を記号化したものであり、図1のように信号の論理組合せを視覚的に表した形状が梯子形であることからそう呼ばれる。ラダー図中の二重縦線で描かれている記号は入力値が1であるときに導通することを表し、二重縦線に斜線があるものは入力値が0のときに導通することを表す。前者をa接点、後者をb接点という。また、長方形または円で描かれているシンボルは出力を表している。ラダー図において、各入力と出力の組を段と呼び、ラダー図の上から数えて第n番目の段を l_n と記述する。本研究ではこれ以降、入出力は二値変数を持つものとする。 N 段からなるラダー図は出力値を $l_1, l_2, \dots$ と順に l_N まで計算（スキャン）することによって、各段に対応している値を出力する。制御対象は1回のスキャンの最終段の出力値を出力した時点での出力値に従って動作する。ラダー図に用いられる記号については以下のとおりである。 $\Sigma_X = \{x_1, x_2, \dots, x_{n_x}\}$,

$\Sigma_U = \{u_1, u_2, \dots, u_{n_u}\}$, $\Sigma_T = \{t_1, t_2, \dots, t_{n_t}\}$ および $\Sigma_M = \{m_1, m_2, \dots, m_{n_m}\}$ はそれぞれ、制御対象の出力 (センサ値) シンボルの有限集合 (空ではない) 入力シンボルの集合、タイマシンボルの有限集合およびリレーおよびメモリシンボルの有限集合である。

次に上記のシンボルで表現される機能を図 1 を用いて述べる。

Σ_X 内のシンボルは位置情報・部品の有無・起動スイッチなど制御対象の状態を表す。

Σ_U 内のシンボルは上昇・前進・回転など制御対象への素動作を表し、セット・リセット (自己保持機能) を持たないものと持つものに分けられる。前者を Σ_U^1 , 後者を Σ_U^2 で表すと, $\Sigma_U = \Sigma_U^1 \cup \Sigma_U^2$ である。ここで, $\cup$ は互いに素な結合を表す。図 1 では $\Sigma_U^1 = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_6, u_7\}$, $\Sigma_U^2 = \{u_5, u_8\}$ である。 l_3 において x_4 と x_1 がともにオンのときに $u_5 \in \Sigma_U^2$ がセットされる。一旦 u_5 がセットされると x_4 または x_1 のうちいずれかがオフになっても u_5 はオフとはならず, l_{11} で x_2 と x_4 がともにオンとならない限りオフにはならない。一方, l_6 の $u_1 \in \Sigma_U^1$ は $x_3 \cdot u_5 \cdot \bar{x}_2 \cdot \bar{u}_2$ の論理値が 1 のときオンになり一旦オンになると $x_2 \cdot u_2$ の論理値が 1 であればオンとなるが, $\bar{x}_2$ または $\bar{u}_2$ のいずれかがオフになれば, u_1 はオフとなる。

Σ_T 内のシンボルはタイマを表す。それに関する入力の条件が成立しても, 対応する時間が経過するまではオンとはならない。図 1 では, l_4 において x_4 と x_1 がともにオンになれば, タイマ t_1 がオンとなる条件が成立するが, その後 t_1 に対応する時間 τ_1 が経過しないと t_1 はオンしない。

Σ_M 内のシンボルはラダー図の内部の入出力の値をラダー図内で伝達する役割を果たし, それ自体が制御対象への動作指令にはならない。 Σ_U と同様に, $\Sigma_M = \Sigma_M^1 \cup \Sigma_M^2$ と分割される。図 1 では $\Sigma_M^1 = \{m_2, m_3, m_4, m_5\}$, $\Sigma_M^2 = \{m_1\}$ である。たとえば, 図 1 において, l_2 の出力 m_2 が l_{20} の入力に伝達されている。

2・2・2 ラダー図の形式的表現 プラントモデル (1) および (2) 式に対する N 段から構成されるラダー図の形式的表現を与えるために, いくつかの定義を与える。

セット・リセット型のシンボルに関して, $\sigma \in \Sigma_U^2 \cup \Sigma_M^2$ ならば補助変数の集合として $\hat{\sigma} := \{\sigma^1, \sigma^0\} \subseteq \mathbb{B}^2$ を定義する。また,

$$\hat{\Sigma}_U^2 := \bigcup_{\sigma \in \Sigma_U^2} \hat{\sigma}, \quad \hat{\Sigma}_M^2 := \bigcup_{\sigma \in \Sigma_M^2} \hat{\sigma} \dots \dots \dots (3)$$

と定義する。

ラダー図の段 l_i ($i = 1, 2, \dots, N$) の出力部に注目する。ラダー図に現れる出力シンボルを段の昇順に $\hat{x}_c^1 \prec \hat{x}_c^2 \prec \dots \prec \hat{x}_c^N$ と順序づける。ここで, $\hat{x}_c^i \in \Sigma := \Sigma_U^1 \cup \Sigma_M^1 \cup \hat{\Sigma}_U^2 \cup \hat{\Sigma}_M^2 \cup \Sigma_T$ ($i = 1, 2, \dots, N$) である。さらに表記の簡単化のため, l_i の出力シンボル $\hat{x}_c^i$ ($i = 1, 2, \dots, N$) が $\sigma \in \Sigma$ であることを $\hat{x}_c^i \sim \sigma$ と記述する。

セット・リセット型のシンボルに関して, 以下を仮定する。

〔仮定 1〕 $(\forall \sigma \in \Sigma_U^2 \cup \Sigma_M^2) \sigma^1 \prec \sigma^0$

仮定 1 では, セット・リセット型のシンボル σ に対し, σ^1 がセット, σ^0 がリセットを表している。また, 仮定 1 は, 後の説明を簡単にするためだけに必要とされ, 本質的に重要な仮定ではないことに注意されたい。

ここで, 記述の簡単化のため, いくつかの表記法を定義する。ある実ベクトル $q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_m]'$, $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_m]'$ と $i \in \{1, 2, \dots, m\}$ およびスカラー z に対し, 次の表記と 3 つのオペレータを定義する。

$$\begin{aligned} q_{(i:j)} &:= [q_i \ q_{i+1} \ \dots \ q_j]' \text{ for } 1 \leq i \leq j \leq m \\ P(q, i, z) &:= [q_1 \ q_2 \ q_{i-1} \ z \ q_{i+1} \ \dots \ q_m]' \\ H(q, z)_i &:= \begin{cases} q_i + z & \text{if } q_i \geq 0 \\ q_i & \text{otherwise} \end{cases} \\ G(q, \tau)_i &:= \begin{cases} 0 & \text{if } q_i < \tau_i \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned}$$

ここで, オペレータ G は後述するラダー図の状態更新則に用いられる。たとえば, $\tau = [3 \ 4]'$ を定ベクトルとする。いま, $q = [2 \ 3]'$ とすると, $G(q, \tau) = [0, 0]'$ となる。このようにオペレータ G は, ラダー図のタイマの状態があらかじめ定められた時刻に達しない限りはオンとならないことを表すために用いられる。また, あるベクトル $q = [q_1 \ q_2 \ \dots \ q_{n_u+n_m+n_t}]'$ に対して, q_{JU} , q_{JM} および q_{JT} をそれぞれ, q の 1 番目から n_u 番目まで, $n_u + 1$ 番目から $n_u + n_m$ 番目までおよび $n_u + n_m + 1$ 番目から $n_u + n_m + n_t$ 番目までの成分からなるベクトルを表すものとする。ただし, $\Sigma_M = \emptyset$ ($\Sigma_T = \emptyset$) のときは J_M (J_T) は未定義とする。これらの表記を用いて, ラダー図の状態を $x_c := [x_{cJU}' \ x_{cJM}' \ x_{cJT}']'$ と定義する。ただし, $x_{cJU} \in \mathbb{B}^{n_u}$, $x_{cJM} \in \mathbb{B}^{n_m}$, $x_{cJT} \in \mathbb{Q}^{n_t}$ とする。さらに, ラダー図のスキャンを考慮するために, 補助状態を $\hat{x}_c = [\hat{x}_{cJU}' \ \hat{x}_{cJM}' \ \hat{x}_{cJT}']'$ と定義する。ただし, $\hat{x}_{cJU} \in \mathbb{B}^{n_u}$, $\hat{x}_{cJM} \in \mathbb{B}^{n_m}$, $\hat{x}_{cJT} \in \mathbb{Q}^{n_t}$ とする。

$\hat{x}_c$ および $\tau = [\tau_1 \ \tau_2 \ \dots \ \tau_{n_t}]'$ ただし, $\tau_i \in \mathbb{Q}_+$ ($i = 1, 2, \dots, n_t$) に関して, 補助関数 $\hat{g}(\hat{x}_c, \tau) := [\hat{x}_{cJU}' \ \hat{x}_{cJM}' \ G(\hat{x}_{cJT}, \tau)']'$ を定義する。

ラダー図の l_i ($i = 1, 2, \dots, N$) に注目する。 l_i を論理関数と捉えると, $l_i : \mathbb{B}^{n_c} \times \mathbb{B}^r \rightarrow \mathbb{B}$, ただし $n_c := n_u + n_m + n_t$ と書ける。ラダー図の $k+1$ ($k \in \mathbb{Z}_+$) 回目の i ($i = 1, 2, \dots, N$) 段目までのスキャン時のラダー図の状態を $\hat{x}_c(k + \frac{i}{N})$ と記述する。このとき, $k+1$ 回目の i 段目のラダー図の出力値は, $\hat{x}_c(k + \frac{i-1}{N})$ および $y(k)$ を用いて, $l_i(\hat{g}_c(\hat{x}_c(k + \frac{i-1}{N}), \tau), y(k))$ と記述できる。 $b \in \mathbb{B}$ に対して, $l_i(\hat{g}_c(\hat{x}_c(k + \frac{i-1}{N}), \tau), y(k)) = b$ であることを, N と τ は固定されているので, 記述の簡単化のため論理命題 $p_{i,k,y} = b$ と記述する。

以上の表記を用いて, ラダー図の状態更新則を再帰的に記述する。はじめに, $x_c(0)$ をラダー図の初期状態とする。また, k ($k \in \mathbb{Z}_+$) 回目のラダー図のスキャン終了後のラ

ダー図の状態を $x_c(k)$ とする。このとき, $x_c(k)$ を用いて, $\hat{x}_c(k + \frac{i}{N})$ ($i = 0, 1, 2, \dots, N$) を次のように再帰的に定義する。

$$\hat{x}_c(k + \frac{i}{N}) := \begin{cases} x_c(k) & i = 0 \\ f_c^i(\hat{x}_c(k + \frac{i-1}{N}), y(k)) & i = 1, 2, \dots, N \end{cases} \quad (4)$$

ここで,

$$f_c^i(\hat{x}_c, y)_{JU} := \begin{cases} P(\hat{x}_c, j, b)_{JU} & \text{if } [p_U] \\ \hat{x}_{cJU} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

$$f_c^i(\hat{x}_c, y)_{JM} := \begin{cases} P(\hat{x}_c, j, b)_{JM} & \text{if } [p_M] \\ \hat{x}_{cJM} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

$$f_c^i(\hat{x}_c, y)_{JT} := \begin{cases} P(H(\hat{x}_{cJT}, \Delta), j, 0) & \text{if } [p_T] \\ H(\hat{x}_{cJT}, \Delta) & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

であり,

$$\begin{aligned} [p_U] &\leftrightarrow ([\tilde{x}_c^i \sim y_j] \wedge [p_{i,k,y} = 1]) \\ &\quad \vee ([\tilde{x}_c^i \sim y_j^b] \wedge [p_{i,k,y} = b]) \\ [p_M] &\leftrightarrow ([\tilde{x}_c^i \sim m_j] \wedge [p_{i,k,y} = 1]) \\ &\quad \vee ([\tilde{x}_c^i \sim m_j^b] \wedge [p_{i,k,y} = b]) \\ [p_T] &\leftrightarrow [\tilde{x}_c^i \sim t_j] \wedge [\hat{x}_{cJT} < 0] \wedge [p_{i,k,y} = 1] \end{aligned}$$

である。ただし, $\Delta \in \mathbb{Q}_+$ は時間経過を表す。ラダー図の $k+1$ ($k \in \mathbb{Z}_+$) 回目の N 段目スキャン終了後の状態は, 補助状態を用いて,

$$x_c(k+1) := \hat{x}_c(k + \frac{N}{N}) = \hat{x}_c(k+1) \quad (8)$$

とする。以上より, プラントモデル (1) および (2) 式に対するラダー図の状態の更新則は,

$$\begin{aligned} x_c(k+1) &= \hat{x}_c(k+1) \\ &= f_c^N(\hat{x}_c(k + \frac{N-1}{N}), y(k)) \\ &= f_c^N(f_c^{N-1}(\hat{x}_c(k + \frac{N-2}{N}), y(k)), y(k)) \\ &\vdots \\ &= f_c^N(f_c^{N-1} \dots (f_c^1(\hat{x}_c(k), y(k)), y(k)) \dots y(k)) \\ &= f_c^N(f_c^{N-1} \dots (f_c^1(x_c(k), y(k)), y(k)) \dots y(k)) \end{aligned} \quad (9)$$

と記述できる。(9) 式より, プラントモデル (1) および (2) 式に対するラダー図は適切な $f_c: \mathbb{B}^{n_c} \times \mathbb{B}^r \rightarrow \mathbb{B}^{n_c}$ を用いて,

$$x_c(k+1) = f_c(x_c(k), y(k)) \quad (10)$$

$$u(k) = g_c(x_c(k)) = [I_{n_u} \ O_{n_u \times n_m} \ O_{n_u \times n_t}] x_c(k) \quad (11)$$

と記述できる。ここで, I_{n_u} は n_u 次の単位行列であり, $O_{n_u \times n_m}$ および $O_{n_u \times n_t}$ は, それぞれ $n_u \times n_m$ および $n_u \times n_t$ の零行列を表す。なお, n_u, n_m および n_t は, それぞれ, 入力シンボルの有限集合の要素数, リレーおよびメモシンボルの有限集合の要素数およびタイマシンボルの有限集合の要素数であることに注意されたい。

2.3 閉ループシステムの構成 前節までに得られたプラントモデル (1) および (2) 式とそのラダー図 (10) および (11) 式から構成される閉ループ系の状態変数を $x := [x'_p \ x'_c]'$ とすると, 閉ループ系は,

$$x(k+1) \in f(x(k), w(k)) \quad (12)$$

$$y(k) = g(x(k)) \quad (13)$$

と非決定性を有するシステムとして記述できる。

なお, 制御対象への外部入力 $w \in \mathbb{B}^q$ は, “起動スイッチが押される” という事象や “部品が置かれる” という事象のように, ラダー図による動作指令では実現できない事象を表現する入力である。

3. 状態空間抽出アルゴリズムと故障診断

本節では, プラントモデルとそのラダー図から構成される閉ループ系の状態空間を抽出するアルゴリズムを提案する。次に, 得られた状態空間に存在しない状態および状態遷移により生じられない状態は与えられた初期状態から生成されないことから故障状態であるとみなし, 故障診断手法を提案する。

3.1 状態空間抽出

3.1.1 ラダー図の状態空間 ラダー図 (10) および (11) 式によって与えられるラダー図の取り得る状態は, ラダー図の初期状態とプラントモデルの出力空間によって制限される。そこで, 閉ループ系の状態空間を考慮する前に, ラダー図の状態空間 X_c を与える。ラダー図の状態空間を抽出することにより, ラダー図によって生じない状態を削除することができる。ラダー図の取り得る状態空間を抽出するアルゴリズムを Algorithm1 に示す。なお, アルゴリズム中の注釈部は後の説明にて引用する。

[Algorithm1] ラダー図の状態空間 X_c

Step 1 (Initialization)

data $L \subseteq \mathbb{B}^{n_c}, Y \subseteq \mathbb{B}^r$;

output X_c ;

$k := 0$;

$L_0 := L$;

Step 2 (Successor)

$L_{k+1} := L_k$;

for $x_c \in L_k$ **do**

```

    for  $y \in Y$  do
         $x^* := f_c(x_c, y);^{(1-2-1)}$ 
         $L_{k+1} := L_{k+1} \cup \{x^*\};^{(1-2-2)}$ 
    end for
end for
Step 3 (Termination)
if  $L_{k+1} = L_k$  then
     $X_c := L_k$ ;
    STOP;  $^{(1-3-1)}$ 
else
     $k := k + 1$ ;
    GO TO Step 2;  $^{(1-3-2)}$ 
end if
end

```

Algorithm1 について以下に説明する。

Step 1 (Initialization) では、初期状態の単集合 L_0 を与える。

Step 2 (Successor) では、ラダー図の取り得る状態を新たに抽出し、ラダー図の状態空間を拡張する。ラダー図の状態集合 L_k に含まれる各状態とプラントモデルの出力との関数から新たなラダー図の状態を抽出し（注釈 $^{(1-2-1)}$ ）、ラダー図の状態集合に加え、新たなラダー図の状態集合を得る（注釈 $^{(1-2-2)}$ ）。

Step 3 (Termination) では、Algorithm1 の終了条件、つまり、ラダー図の状態空間抽出終了条件を与える（注釈 $^{(1-3-1)}$ ）。終了条件を満たさないときは Step 2 から繰り返し実行する（注釈 $^{(1-3-2)}$ ）。本ステップは、 $L_k \neq L_{k+1}$ である限り、繰り返し実行されることに注意されたい。

また、Algorithm1 に対し、以下の補題が成立する。

〔補題 1〕 Algorithm1 において、 $L_{k^*+1} = L_{k^*}$ となる $k^* < \infty$ が存在し、そのとき Algorithm1 は終了する。

〔証明〕 全ての $k \in \mathbb{Z}_+$ に対し、 $L_k \subset L_{k+1} \subseteq \mathbb{B}^{n_c}$ と仮定する。このとき、 k は単調増加するので、ある $\tilde{k} < \infty$ が存在し、 $\mathbb{B}^{n_c} \subset L_{\tilde{k}}$ となり、仮定に矛盾する。

3・1・2 閉ループ系の状態空間と状態遷移 Algorithm1 によってラダー図の状態空間 X_c が得られた後、(12) および (13) 式で与えられる閉ループ系の状態空間および状態遷移を抽出するアルゴリズムを Algorithm2 に示す。なお、アルゴリズム中の注釈部は後の説明にて引用する。

〔Algorithm2〕 閉ループ系の状態空間 X

```

Step 1 (Initialization)
data  $x_p \in \mathbb{B}^n$ ,  $x_c \in X_c$ ,  $W \subseteq \mathbb{B}^q$ ;
output  $X$ ;
 $k := 0$ ;
 $X_0 := \{[x_p' \ x_c']'\}$ ;
 $X_0^\dagger := X_0$ ;
Step 2 (Successor)
 $X_{k+1} := X_k$ ;
for  $x^\dagger \in X_k^\dagger$  do

```

```

    for  $w \in W$  do
         $X^* := f(x^\dagger, w);^{(2-2-1)}$ 
        for  $x^* \in X^*$  do
            if  $x^* \notin X_{k+1}$  then
                 $X_{k+1} := X_{k+1} \cup x^*;$   $^{(2-2-2)}$ 
            end if
        end for
    end for
end for
Step 3 (Termination)
if  $X_{k+1} = X_k$  then
     $X := X_k$ ;
    STOP;  $^{(2-3-1)}$ 
else
     $X_{k+1}^\dagger := X_{k+1} \setminus X_k$ ;
     $k := k + 1$ ;
    GO TO Step 2;  $^{(2-3-2)}$ 
end if
end

```

end

Algorithm2 について以下に説明する。

Step 1 (Initialization) では、閉ループ系の初期状態の単集合 X_0 を与える。

Step 2 (Successor) では、閉ループ系の取り得る状態を新たに抽出し、閉ループ系の状態空間を拡張する。抽出された閉ループ系の状態空間 $X_k^\dagger$ の各状態 $x^\dagger$ から遷移先の状態集合 X^* を抽出する（注釈 $^{(2-2-1)}$ ）。 $x^* \in X^*$ が新たに抽出された状態であれば、それを状態空間 X_{k+1} に加える（注釈 $^{(2-2-2)}$ ）。一方、 $x^* \in X^*$ が既に X_{k+1} 内に存在し

図 2 遷移先の変更その 1

Fig. 2. Modification of transition #1.

図 3 遷移先の変更その 2

Fig. 3. Modification of transition #2.

てれば、遷移はその状態に適切に変更される。そのような場合の例として、図 2 および図 3 を用いて説明する。図 2 に示すように、 $f(x_0, w) = \{x_0, x_1, x_2\}$ が得られたとき、 x_0 が重複して抽出されている（図 2 左図の網掛けの状態）。このとき、 x_0 から x_0 への遷移は図 2 右図のように変更される。また、図 3 に示すように、 $f(x_2, w) = \{x_0, x_1, x_3\}$ が得られたとき、 x_0 および x_1 が重複して抽出されている（図 3 左図の網掛けの状態）。このとき、 x_2 から x_0, x_2 から x_1 への遷移はそれぞれ図 3 右図のように変更される。

Step 3 (Termination) では、Algorithm2 の終了条件、つまり、閉ループ系の状態空間抽出終了条件を与える（注釈⁽²⁻³⁻¹⁾）。終了条件を満たさないときは Step 2 から繰り返し実行する（注釈⁽²⁻³⁻²⁾）。本ステップは、 $X_{k+1} \neq X_k$ である限り、繰り返し実行されることに注意されたい。

〔補題 2〕 Algorithm2 において、 $X_{k^*+1} = X_{k^*}$ となる $k^* < \infty$ が存在し、そのとき Algorithm2 は終了する。

〔証明〕 全ての $k \in \mathbb{Z}_+$ に対し、 $X_k \subset X_{k+1} \subseteq X_p \times X_c$ と仮定する。このとき、 k は単調増加するので、ある $\tilde{k} < \infty$ が存在し、 $X_p \times X_c \subset X_{\tilde{k}}$ となり、仮定に矛盾する。

Algorithm1 および Algorithm2 について次の定理を得る。

〔定理 1〕 与えられた $x_p \in X_p$ および $x_c \in X_c$ とラダー図の状態空間 X_c を与える Algorithm1 および Algorithm2 を用いて得られた X に対して、 $x \in \mathbb{B}^{n_p+n_c}$ が閉ループ系の状態 $[x'_p, x'_c]'$ から到達可能な状態であるための必要十分条件は $x \in X$ である。

〔証明〕 $(\Rightarrow)$ $x \in \mathbb{B}^{n_p+n_c}$ を、Algorithm1 および Algorithm2 では生成されないが $[x'_p, x'_c]'$ から到達可能な状態であると仮定する。このとき、 $x \in \{x | f(x_\alpha, w), w \in W\}$ である x_α が存在する。また、ある k が存在し、 $x_\alpha \in X_k$ とすると $x \in X_{k+1}$ となるので、全ての k に対して、 $x_\alpha \notin X_k$ でなくてはならない。同様に x に到達可能な任意の状態 x_β に対して、 $x_\beta \notin X_k (k \leq k^*)$ でなくてはならない。これは、 $[x'_p, x'_c]' \in X_k$ であることに矛盾する。

$(\Leftarrow)$ x が Algorithm1 および Algorithm2 で生成されれば、 $x \in X$ は明らか。

3.2 故障診断 与えられた初期状態に対して Algorithm1 および Algorithm2 により生成し得る状態空間および状態遷移に基づき、閉ループ系の故障診断手法を提案する。

定理 1 より、 $x_f \notin X$ となるような x_f は、与えられた閉ループ系の初期状態から生成されないことがわかる。したがって、閉ループ系において、状態 $x_f \notin X$ が観測されたとき、 x_f は正常な状態ではない、すなわち故障状態であるとみなすことができる。また、閉ループ系において存在しない状態遷移により得られる状態 $x_f \in X$ も故障状態とみなすことができる。

そこで、まず、本稿における閉ループ系の故障状態を以

図 4 閉ループ系の状態空間 X の例

Fig. 4. Example of state space of closed loop system, X .

図 5 故障状態の例（存在しない状態）

Fig. 5. Example of fault state (nonexistent state).

図 6 故障状態の例（存在しない状態遷移）

Fig. 6. Example of fault state (nonexistent transition).

下のように定義する。

〔定義 1〕 閉ループ系 (12) および (13) 式に対して、以下のいずれかのとき x_f を故障状態という。

(1) $x_f \notin X$ 。

(2) $x_f \in X$ かつ $(\nexists x) x_f = f(x, w)$ 。

図 4 に示す閉ループ系の状態遷移図を用いて、故障状態の一例を示す。図 4 において、閉ループ系の状態空間は $X = \{x_0, x_1, x_2, x_3\}$ であるが、図 5 に示すような状態 $x_f \notin X$ が観測されたとき、閉ループ系の状態空間に存在しない状態 x_f は故障状態である。また、図 6 に示すように図 4 の閉ループ系に存在しない状態遷移により状態 $x_0 \in X$ が観測されたとき、この遷移により観測された状態 x_0 は故障状態である。

ここで、以下の仮定を与える。

〔仮定 2〕 閉ループ系 (12) および (13) 式に対して、

- (1) 状態および状態遷移はすべて可観測とする。
 (2) プラントモデルの状態, すなわち x_p が何らかの不具合によって正常に動作していない状況のみを考え, プラントモデルへの入力, すなわち u はラダー図の動作指令に従って正常に動作しているものとする。

仮定 2 の (2) より, 以下ではプラントモデルの状態, たとえばリミットセンサなどの破損・動作不良などに起因する誤動作のみを想定する。

さて, 以下では故障状態 x_f に対し, x_{fi} ($i = 1, \dots, n_p$) の要素に着目し, 故障箇所の特定手法について述べる。

故障箇所の特定にあたり, 故障箇所の可特定性を定義する。ここで, 故障状態 x_f の要素 x_{fi} ($i = 1, \dots, n_p$), に対して, 以下のように可特定性を定義する。

〔定義 2〕 故障状態 x_f の要素 x_{fi} ($i = 1, \dots, n_p$) が, 直前に観測された状態 x から遷移可能な全ての状態の i 番目の要素と異なっていれば, x_f の要素 x_{fi} ($i = 1, \dots, n_p$) は, $(x, x_f)_i$ -可特定 ($i = 1, \dots, n_p$) であるという。

定義 2 の可特定性は, 故障状態の i 番目の要素が, 故障状態が観測される直前の状態から生起可能な全ての状態の i 番目の要素と異なることをいう。

後の表記を簡単にするために, 次の記述を導入する。

$$X^N(x) := \{x^* | x^* = f(x, w), w \in W\} \dots\dots\dots (14)$$

$$F(x, x_f) :=$$

$$[x_{(1:n_p)}^{N_1} \oplus x_{f(1:n_p)} \dots x_{(1:n_p)}^{N_{|X^N(x)|}} \oplus x_{f(1:n_p)}] \dots\dots\dots (15)$$

ここで, $x^{N_j} \in X^N(x)$ ($j = 1, \dots, |X^N(x)|$) である。また $x_{f(1:n_p)}$ は, 仮定 2 より, プラントモデルの状態にのみ故障が生じることを反映しているが, 以降単に x_f と記述する。

以上の表記を用いて, $(x, x_f)_i$ -可特定 ($i = 1, \dots, n_p$) に関して次の定理を得る。

〔定理 2〕 故障状態 x_f と故障状態の直前の状態 $x \in X$ に対し, $F(x, x_f)$ の成分 f_{ij} に関して $\forall j$ ($f_{ij} = 1$) ($i = 1, \dots, n_p$) であれば, $(x, x_f)_i$ -可特定 ($i = 1, \dots, n_p$) である。

〔証明〕 $(x, x_f)_i$ -可特定 ($i = 1, \dots, n_p$) でないならば, i ($i = 1, \dots, n_p$) に対し, $\forall j$ ($f_{ij} = 1$) が成立しないことを示す。

$(x, x_f)_i$ -可特定 ($i = 1, \dots, n_p$) ではないので, $X^N(x)$ の要素の i 番目の成分が x_{fi} と等しい状態が存在する。そのような状態を一般性を失うことなく x^{N_1} とすれば, $f_{i1} = x_i^{N_1} \oplus x_{fi} = 0$ となる。したがって, $\forall j$ ($f_{ij} = 1$) が成立しない。

4. 例 題

本節では, 前節までの提案法を具体例に適用し, その有効性を検証する。

図 7 中和タンクシステム

Fig. 7. Neutralization tank system.

4.1 プラントモデル 具体例として, 図 7 に示す 4 つのセンサ, 4 つのバルブおよび液体を攪拌する 1 つのミキサからなる中和タンクシステムを考える。以下, 対応するシンボルの集合は, $\Sigma_X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ および $\Sigma_U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ である。ここで, x_i ($i = 1, 2, 3$) は, タンクの水位を測定する離散的なセンサ i を表しており, センサ i の位置より液面が高い (低い) 場合にオン (オフ) となる。 x_4 は, タンク内の液体の pH を測定するセンサを表しており, 規定の pH 値に達したら (達しなかったら) オン (オフ) となる。また, x_5 は起動スイッチの状態を表しており, 起動スイッチが押されているとき (押されていないとき) オン (オフ) となる。一方, u_i ($i = 1, 2, 3, 4$) はバルブ i への動作指令を表し, バルブ i を開く (閉じる) ときオン (オフ) となる。 u_5 は攪拌ミキサへの動作指令を表し, 攪拌ミキサを回転 (停止) させるときオン (オフ) となる。以下, 任意の $\sigma \in \Sigma_X \cup \Sigma_U$ に対して, σ で示されるシンボルがオン (オフ) であることを $\sigma = 1$ ($\sigma = 0$) で表し, 1 または 0 が一意に決定できないことを, 記号 * で表すものとする。

図 7 の制御対象に関して, 以下の仮定を与える。

〔仮定 3〕 図 7 の制御対象に関して, オンである上部のバルブ (バルブ 1, 2) の数および下部のバルブ (バルブ 3, 4) の数をそれぞれ, α および β とする。このとき,

- (1) $\alpha \neq 0$ かつ $\alpha \geq \beta$ のとき, 液面は上昇する。
- (2) $\beta \neq 0$ かつ $\alpha < \beta$ のとき, 液面は下降する。
- (3) $\alpha = \beta = 0$ のとき, 液面は変化しない。

仮定 3 では, 図 7 の上部のバルブ一箇所からの流量は下部のバルブ一箇所からの流量よりも多いこと, 下部のバルブ二箇所からの流量は上部のバルブ一箇所からの流量よりも多いことを示している。

プラントモデルの状態を $x_p := [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5] \in \mathbb{B}^4$ とし, プラントモデルの状態空間 $X_p \subseteq \mathbb{B}^4$ を考える。ある液面測定センサがオンとなっているとき, センサが正常であれば, そのセンサより低位置に設置された液面測定センサはオンとなる。液面測定センサを低位置から x_1, x_2 および x_3 の順で設置されているとき, センサの位置に関して, “ x_2 が 1 ならば x_1 が 1 である” および “ x_3 が 1 ならば x_2 が 1 であ

る”という論理的条件が得られる。これにより，プラントモデルの状態空間 X_p は $X_p := \mathbb{B}^4 \setminus \{[01 * *]', [*01 *]'\}$ となる。

次に制御対象への制御入力を $u = [u_1 u_2 u_3 u_4 u_5]' \in \mathbb{B}^5$ とし，プラントモデルの状態更新則および出力方程式を考える。たとえば，任意の $k \in \mathbb{Z}_+$ において， $x_p(k) = [000 *]'$ とし，バルブ 1 または 2 のいずれか一方がオンで，バルブ 3 および 4 がオンではない場合を考える。このとき，仮定 3 より液面は上昇するので， $x_p(k+1) \in \{[000 *]', [100 x_{p4}(k)]'\}$ となる。同様に，図 7 のプラントモデルは，任意の $k \in \mathbb{Z}^+$ に対して，

$$\begin{aligned} x_p(k+1) &\in f_p(x_p(k), u(k), w(k)) := \\ &\{[000 *]', [100 x_{p4}(k)]'\} \\ &\quad \text{if } [x_p(k) \in \{[000 *]'\} \wedge [p_1] \\ &\quad [100 *]', [110 x_{p4}(k)]'\} \\ &\quad \text{if } [x_p(k) \in \{[100 *]'\} \wedge [p_1] \\ &\quad [110 *]', [111 x_{p4}(k)]'\} \\ &\quad \text{if } [x_p(k) \in \{[110 *]'\} \wedge [p_1] \\ &\quad [110 *]', [111 x_{p4}(k)]'\} \\ &\quad \text{if } [x_p(k) \in \{[111 *]'\} \wedge [p_2] \\ &\quad [100 *]', [110 x_{p4}(k)]'\} \\ &\quad \text{if } [x_p(k) \in \{[110 *]'\} \wedge [p_2] \\ &\quad [000 *]', [100 x_{p4}(k)]'\} \\ &\quad \text{if } [x_p(k) \in \{[100 *]'\} \wedge [p_2] \\ &\quad x_p(k) \\ &\quad \text{if } [u(k) = \{[0000 *]'\}] \\ &\quad \{[x_{p1}(k) x_{p2}(k) x_{p3}(k) *]'\} \\ &\quad \text{otherwise} \dots\dots\dots (16) \\ y(k) &:= g_p(x_p(k), w(k)) := [x_p(k)' w(k)]' \\ &\dots\dots\dots (17) \end{aligned}$$

と与えられる。ただし，記述の簡単のため， $u(k) \in \mathbb{B}^5 \setminus \{[00 * * *]', [1011 *]', [0111 *]'\}$ および $u(k) \in \{[00 * * *]', [* * 11 *]'\} \setminus \{[0000 *]', [1111 *]'\}$ であることを，論理命題によってそれぞれ p_1 および p_2 と表している。ここで， p_1 および p_2 は，それぞれタンク内の液面が上昇することおよび下降することを意味する。また， $w \in \mathbb{B}$ は，起動スイッチの状態を変化させる外部入力である。

4.2 ラダー図 図 7 の制御対象に対して，制御仕様を以下のように与える。

- (1) 初期状態では，すべてのバルブが閉じられており，タンクには液体はないものとする。また，ミキサ u_5 はオフである。
- (2) 起動スイッチが押されたらバルブ u_1 を開き，センサ x_2 が 1 になるまでバルブ u_1 から液体 A が注入される。

(a) 液体 A が注入され， x_2 がはじめて 1 になるとミキサ u_5 が稼働する。

(b) 液体 A の pH をセンサ x_4 により検出し，規定の値でないならば，バルブ u_2 を開き，液体 B を注入する。

(3) 液体 B を注入して，センサ x_3 が 1 になったらバルブ u_2 を閉じて液体 B の注入をやめ，バルブ u_4 を開いて液体を x_2 の位置まで排出する。そして再びバルブ u_4 を閉じ (2b) の処理を行う。

(4) 液体の pH が規定の値を満たしている (中和完了) ならば，バルブ u_2 を閉じ，液体をバルブ u_3 から排出する。その後，液面が下降し，センサ x_1 が 0 になったらバルブ u_3 を閉じ (1) の過程に戻る。

上記の制御仕様を満たすラダー図を図 8 に示す。ここで， $\Sigma_X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$ ， $\Sigma_U = \{u_1, u_2, u_3, u_4, u_5\}$ ， $\Sigma_T = \Sigma_M = \emptyset$ である。

4.3 閉ループ系の状態空間と状態遷移の構成 ラダー図の状態空間 X_c を求めるため， $Y = X_p \times \mathbb{B}$ とする。また，起動スイッチに関する仮定として， $w(k) = 1$ ($k \geq 0$) とし，ラダー図の初期状態を $x_c = [00000]'$ とする。このとき，Algorithm 1 によって，ラダー図の状態空間

$$\begin{aligned} X_c = &\{[00000]', [00001]', [00011]', [00101]', \\ &[01001]', [10000]', [10001]'\} \\ &\dots\dots\dots (18) \end{aligned}$$

を得る。また，制御対象の初期状態を $x_p = [0000]'$ とし，Algorithm 2 によって，閉ループ系の状態空間

$$\begin{aligned} X = &\{[0000|00000]', [0000|10000]', \\ &[0001|00000]', [0001|10000]', \\ &[1000|00101]', [1000|10000]', \\ &[1000|10001]', [1001|00101]', \\ &[1001|10000]', [1001|10001]', \\ &[1100|00011]', [1100|00101]', \\ &[1100|01001]', [1101|00011]', \\ &[1101|00101]', [1110|00011]', \\ &[1111|00011]'\} \\ &\dots\dots\dots (19) \end{aligned}$$

を得る。ただし，(19) 式において，表記の見やすさのため， $[x_p' x_c]'$ を $[x_p' | x_c]'$ としている。また，また，閉ループ系の状態遷移図を図 9 に示す。図 9 において，円は状態を表し，円内の上段および下段は，それぞれプラントモデルの状態 $x_p = [x_1 x_2 x_3 x_4]'$ およびラダー図の状態 $x_c = [u_1 u_2 u_3 u_4 u_5]'$ を表すものとする。

図 9 より，制御対象の状態 $x_p = [1001]'$ ，すなわち，図 7 の中和タンクシステムにおいて，センサ x_1 (x_2 および x_3) がオン (オフ) で， x_4 がオン，すなわち規定の pH 値を満足 (中和完了) している状態に対して，動作指令と

図 8 中和タンクシステムに対するラダー図

Fig.8. Ladder diagram for neutralization tank system.

図 9 閉ループ系の状態遷移図

Fig.9. State transition of closed loop.

して, $u = \{[10000]', [10001]', [00101]'\}$ であることが分かる。したがって, それら以外の状態が観測されたときは, 定義 1 から故障状態である。

4.4 故障診断 ここでは, 図 9 に示される閉ループ系の状態空間および状態遷移に対し, 故障箇所の特定の手順について述べる。

故障状態の例として, 以下に 3 つの具体例を示す。

1 つめの例として, $x = [0000|10000]'$ を観測した後, 図 9 に存在しない $x_{f1} = [0010|10000]'$ が故障状態として検出されたとする。このときの状況を図 10 に示す。このとき, x_{f1} の故障箇所を特定するため, x_{f1}

図 10 故障状態の例 1 (点線は存在しない状態および状態遷移)

Fig.10. Example of fault state #1 (dashed line: nonexsitent state and transition).

の直前の状態 x から遷移可能な状態集合は, $X^N(x) = \{[0000|10000]', [0001|10000]', [1000|10000]'\}$ として得られる。ここで (15) 式より $F(x, x_{f1})$ は,

$$F_p(x, x_{f1}) = \begin{bmatrix} x^{N1} \oplus x_{f1} & x^{N2} \oplus x_{f1} & x^{N3} \oplus x_{f1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \oplus 0 & 0 \oplus 0 & 1 \oplus 0 \\ 0 \oplus 0 & 0 \oplus 0 & 0 \oplus 0 \\ 0 \oplus 1 & 0 \oplus 1 & 0 \oplus 1 \\ 0 \oplus 0 & 1 \oplus 0 & 0 \oplus 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (20)$$

となる。(20) 式において, $i = 3$ のとき $\forall j (f_{ij} = 1)$ が成立することから, センサ x_3 の故障が特定される。

2 つめの例として, $x = [0000|10000]'$ を観測した後, $x_{f2} = [0110|10000]'$ が観測されたとする。 x_{f2} は図 9 に示す状態遷移図に存在しない状態であることから 1 つめの例と同様, 故障状態である。このときの状況を図 11 に示す。1 つめの例と同様に, $X^N(x) = \{[0000|10000]', [0001|10000]', [1000|10000]'\}$ が得られ,

$$F_p(x, x_{f2}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (21)$$

となる。ここで, $i = 2, 3$ において $\forall j (f_{ij} = 1)$ が成立することから, x_2 および x_3 の故障箇所が特定される。

3 つめの例として, $x = [1000|10000]'$ を観測した後, $x_{f3} = [1110|00011]'$ が観測されたとする。この状態 $\tilde{x}_{f3}$ は図 9 に示す状態遷移図に存在しない遷移により生じた状態であることから, 故障状態である。このときの状況を図 12 に示す。同様に $X^N(x) = \{[1000|10000]', [1001|10000]', [1101|01001]'\}$ が得られ,

図 11 故障状態の例 2 (点線は存在しない状態および状態遷移)

Fig.11. Example of fault state #2 (dashed line: nonexsistent state and transition).

図 12 故障状態の例 3 (点線は存在しない状態遷移)

Fig.12. Example of fault state #3 (dashed line: nonexsistent transition).

$$F_p(x, x_{f_3}) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \dots\dots\dots (22)$$

となる。ここで、 $i = 3$ において $\forall j (f_{ij} = 1)$ が成立することから、 x_3 の故障が特定される。

仮定 2 の (2) より、以下ではプラントモデルの状態、たとえばリミットセンサなどの破損・動作不良などに起因する

なお、ここでは仮定 2 の (2) より、プラントモデルの状態のみの故障を想定したが、仮定 2 の (2) を削除し、(15) 式における $(1 : n_p)$ および定理 2 における $(i = 1, \dots, n_p)$ をそれぞれ $(1 : n_p + n_c)$ および $(i = 1, \dots, n_p + n_c)$ と変更することで、プラントモデルと制御器の閉ループ系に故障が生じる場合に対しても適用することができる。

5. おわりに

本稿では、PLC としてラダー図によって制御されるシーケンス制御系を例にとり、制御対象のモデル化が完全ではないということを等価的に非決定性を有するシステムであるとみなし、状態遷移を集合値関数としてモデル化した。そして、与えられたラダー図とプラントモデルに対して閉ループ系を構成し、状態空間および状態遷移を与えるアル

ゴリズムを提案した。次に、得られる閉ループ系は生じし得る状態および状態遷移のみを生成することから、状態遷移図から逸脱した状態および状態遷移を観測したときの状態を故障状態とし、故障特定手法を提案した。最後に、具体例として中和タンクシステムに提案手法を適用し、閉ループ系の状態遷移図を構成し、故障特定手法の手順について述べた。以上より、提案手法がロジックコントローラによって制御されるシステムの故障診断へ有効であることを明らかにした。

今後の課題として、制御器の故障を考慮したときの故障診断への適用、制御対象と制御器のクラスを拡張した場合の考察、得られた閉ループ系の状態数に対する定量的な評価などが挙げられる。

(平成 17 年 3 月 14 日受付, 平成 17 年 7 月 1 日再受付)

文 献

- (1) P.J.G. Ramadge and W.M. Wonham: "The control of discrete event systems", *Proceedings of the IEEE*, Vol.77, No.1, pp.81-98 (1989)
- (2) S. Eilenberg: *Automata, Languages, and Machines*, Vol.A, Academic Press (1974)
- (3) L.S. Homen de Mello and A.C. Sanderson: "AND/OR graph representation of assembly plans", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.6, No.2, pp.180-199 (1990)
- (4) P. Freedman: "Time, Petri nets, and robotics", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.7, No.4, pp.417-433 (1991)
- (5) J.C.M. Baeten and W.P. Weijland: "Process algebra", *Cambridge Tracts in Theoretical Computer Science* Vol.18, Cambridge University Press (1990)
- (6) C.A.R. Hoare: "Communicating Sequential Processes", Prentice-Hall (1985)
- (7) K.T. Seow: "Temporal logic formulation of assembly sequence properties", *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, pp.1208-1213 (1992)
- (8) K.T. Seow: "A temporal framework for assembly sequence representation and analysis", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, Vol.10, No.2, pp.220-229 (1994)
- (9) C.M. Ozveren and A.S. Willsky: "Observability of Discrete Event Dynamical Systems", *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol.35, No.7, pp.797-806 (1990)
- (10) M. Sampath and K. Sinnamohideen: "Failure Diagnosis Using Discrete-Event Models", *IEEE Trans. on Control Systems Technology*, Vol.4, No.2, pp.105-124 (1995)
- (11) M. Sampath and K. Sinnamohideen: "Diagnosability of Discrete-Event Systems", *IEEE Trans. on Automatic Control*, Vol.40, No.9, pp.1555-1575 (1995)
- (12) Y. Fujimoto: "Design of Discrete Time Polynomial Nonlinear Systems and Its Application to Sequential Control", *T. IEE Japan*, Vol.122-D, No.9, pp.918-927, (2002-9) (in Japanese)
藤本康孝:「離散時間多項式非線形システムの制御系設計法とシーケンス制御への応用」, 電学論 D, **122**, 9, pp.918-927 (2002-9)
- (13) H. Ito and T. Nanri: "Fault Diagnosis and Operation Continuation of Sequential Control System Using Petri Net", *T. SICE*, Vol.33, No.9, pp.914-922 (1997-9) (in Japanese)
伊藤宏隆・南里孝行:「ペトリネットによりシーケンス制御システムの故障診断と運転継続」, 計測自動制御学会論文集, **33**, 9, pp.914-922 (1997-9)
- (14) S.H. Zad, R.H. Kwong, and W.M. Wonham: "Fault diagnosis in finite-state automata and timed discrete-event systems", *Topics in Control and its Appl.: A Tribute to Edward J. Davison*, D.E. Miller and L. Qiu, Eds. Springer-Verlag, pp.81-105 (1999)
- (15) S.H. Zad, R.H. Kwong, and W.M. Wonham: "Fault Diagnosis in Timed Discrete-Event Systems", in *Proc. 38th IEEE Conference on Decision and Control*, pp.1756-1761 (1999)
- (16) J.S. Ostroff: *Temporal Logic for Real-Time Systems*. Research Studies Press Ltd.

- (17) D.M. Gabbay and H.J. Ohlbach: Temporal Logic. LNAI 827 Springer-Verlag.
- (18) R. Kumar and V.K. Grag: Modeling and Control of Logical Discrete Event Systems. Kluwer Academic Publishers.
- (19) T. Zanma, T. Suzuki, A. Inaba, and S. Okuma: "Transformation Algorithm from Ladder Diagram to SFC Using Temporal Logic", *T. IEE Japan*, Vol.117-D, No.12, pp.1471-1479 (1997-12) (in Japanese)
残間忠直・鈴木達也・稲葉昭夫・大熊 繁:「時間論理によるラダー図から SFC への変換法」, 電学論 D, 117, 12, pp.1471-1479 (1997-12)
- (20) A. Falcione and B.H. Krogh: "Design Recovery for Relay Ladder Logic", *IEEE Control Systems Magazine*, April, pp.90-98 (1993)
- (21) 小倉久和: 情報の基礎離散数学, 近代科学社 (1999)

残 間 忠 直 (正員) 1972 年生。2000 年 3 月 名古屋大学大学院博士課程後期課程電気工学専攻修了。同年 4 月 三重大学工学部電気工学科助手。現在に至る。博士(工学)。離散事象システム, シーケンス制御, ハイブリッド動的システムとその応用, 混合論理動的システム論に基づくモーションコントロール・システム同定および電動機制御・パワーエレクトロニクス回路への応用に関する研究に従事。計測自動制御学会, システム/制御/情報学会, IEEE 各会員。

宮 林 司 (非会員) 1979 年生。2003 年 3 月 三重大学工学部電気電子工学科卒業。同年 4 月 三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻入学。2005 年 3 月 三重大学大学院工学研究科電気電子工学専攻修了。同年 4 月 (株)京三製作所に入社。現在に至る。在学中は, 離散事象システムの故障診断に関する研究に従事。

石 田 宗 秋 (正員) 1952 年生。1980 年 3 月 名古屋大学大学院工学研究科電気工学及び電子工学専攻博士課程後期課程修了。同年 4 月 同大学工学部電気工学科助手, 1987 年 6 月 三重大学工学部電気工学科助教授, 1996 年 10 月 同大学工学部電気工学科教授, 現在に至る。博士(工学)。主として, 電動機制御, パワーエレクトロニクスに関する研究に従事。1993 年および 2001 年電気学会論文賞, 1999 年電気学会著作賞, 2002 年計測自動制御学会論文賞, 2005 年溶接学会論文賞受賞, IEEE, パワーエレクトロニクス学会, 計測自動制御学会, 日本機械学会, 溶接学会各会員。