

モデルに基づく故障診断システム

吉瀬 隆 村田 真人
キヤノン (株) 情報システム研究所

症状と故障原因とを直接結び付ける経験的ルールから作られた故障診断システムでは、知識の獲得・保守が難しいという問題があり、これを解決するためにルールより深い知識である装置のモデルに基づいて診断を行なう方法がある。

従来の研究ではモデル化が容易な電気回路等を対象としていたが、我々は複写機という複雑な装置のモデル化を試みプロセスモデルを考案した。また、故障診断においては、部品の信頼性、検査コストの概念を導入して、熟練したサービスマン並の効率の良い診断手順を実現した。

尚、同じ装置のモデルからシミュレーション、故障診断の両方を行う汎用的なシステムを NeXT コンピュータ上に作成した。

Model-based diagnosis system

Takashi KISE Makoto MURATA
CANON INC. Information Systems Research Center

Shin-Kawasaki Mitsui BLDG. 890-12, Kashimada, Saiwai-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 211, Japan

Many expert systems were built by heuristic rules. But, it's difficult to acquire and maintain a knowledge for such systems. Lately, model-based systems attract attention because object model is deeper knowledge than rules. The former researches have been done on electric circuits etc., relatively easy domain. We proposed process model which has ability to model a complex mechanism, like a copier. And our diagnosis algorithm performs like an expert troubleshooter by using the parts-reliability and the checking-cost. Our system on NeXT computer can generally do both simulation and diagnosis from the same object model.

1 はじめに

新しい機器を次々と開発、製品化するに従って、同時にそれを保守サービスする体制も整備しなければならない。そこでコンピュータを使った故障診断システムがこれまでも作られているが、従来のエキスパートシステムで作られたものでは症状と故障原因を直接対応付けるようなルールで経験的知識を蓄積したものであり、知識に抜けが生じ易く、知識の保守も容易でないという問題があった。

そこでルールという形の浅い知識でなく、より汎用的な深い知識を使ったもので設計時の知識である装置のモデルに基づいて診断を行なう方法が提案されている^{[3][4]}。

しかし、それらは主として電気回路を対象としており、モデル化が比較的容易なものであった。我々は複雑な装置である複写機を実例にしてモデルに基づく推論についての研究を行なった。

本論文ではモデル化の手法としてプロセスモデルを、そしてシミュレーション、故障診断方式を提案する。故障診断では部品の信頼性、検査コストの概念を導入して熟練したサービスマン並の診断手順を実現した。

なお、本システムはNeXTコンピュータ上でInterface Builder, Lisp, エキスパートシステムCHORUS^[6]の推論部を用いて作成した。

2 モデルに基づく推論

モデルに基づく推論とは、装置の動作を記述したモデルを用いて、装置のシミュレーションや診断を行なう技術である。

本章では、モデルに基づく推論の一般的な説明を行なう。まず、モデル記述に必要な要件を述べ、次にモデルに基づく故障診断を説明する。

2.1 モデル

モデルとは現実の世界を抽象化したものである。ここで使うモデルとは装置のシミュレーションと故障診断の両方が可能なモデルであり、部品の動作規則と装置の構造とから成る。

部品Aの入力 (i_1, \dots, i_m) に対して、出力が $(o_1, \dots, o_n) = F_A(i_1, \dots, i_m)$ で表される時、 F_A が部品Aの動作規則である。また、部品Aの出力 o_x と部品Bの入力 i_y が接続されている時、 $Connect(A(o_x), B(i_y))$ となる接続関係 $Connect$ や、部品Aが部品Cの一部分であるといったような部品の階層関係が装置の構造である。

電気回路のモデルの例を図1に示す。

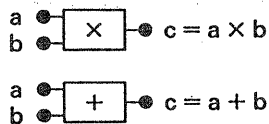
このモデルを使って、図2に示すようにシミュレーションを行なって装置の入力値から出力の予測値を導き出すことができる。

2.2 モデルに基づく故障診断

モデルに基づく故障診断は、故障の症状の発生からスタートする。故障の症状とは装置の出力として予測と異なる値が観測されたものであり、その観測と予測との間の矛盾を手がかりにして診断を行なう。

まず、故障原因候補の生成を行なう。次に、故障原因候補のチェックを行なう。これによって観測と予測との間の矛盾を説明できない故障原因候補を除外する。複数の故障原因候補が可能性として残った場合

部品の動作規則



装置の構造

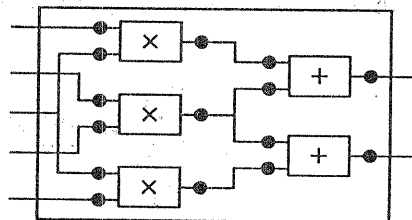


図 1: モデル

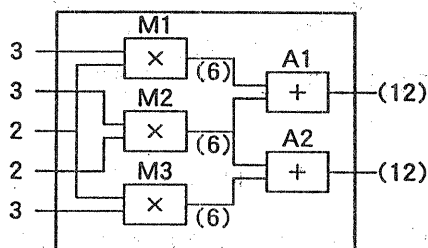


図 2: シミュレーション

には、候補の絞り込みとして回路内の地点の値を測定したり、入力値を変えて出力値の変化を見るテストを行なう。実際の診断では、生成、チェック、絞り込みの3つの処理に完全に分離されるとは限らない。

3 複写機のモデル化

一般的なモデルに基づく推論については電気回路を例として前章で述べた。しかし、これを複写機に適用しようとした時に様々な問題が生じる。

本章では、複写機のモデル化での課題を述べて、それを解決するためにプロセスモデルを提案する。

3.1 複写機のモデル化における課題

複写機の動作として、例えば、感光ドラムにコロナ放電するという現象を考えた時、単独の部品の動作としては記述できず、感光ドラムや帯電線などの複数の部品間の相互作用の結果として記述するしかない。

つまり、複写機の動作を部品単体の動作と部品間の接続関係だけで記述することはできない。次に、複写機の状態を定量的に扱おうと、ドラム表面の電荷分布を考えただけでも、膨大なデータ量となる。また、その動作規則を表現する方程式は複雑なものになり、シミュレーションや故障診断は容易ではない。

以上の2つの問題点を解決するために、装置の動作として部品間の影響関係を因果的に定義し、部品の状態値を定性的に表現した。この因果的定性的なモデルは設計者のメンタルモデル¹⁾ (人間が機械の動作などの現象を理解するモデル) と考えられる。次節から我々の提案するプロセスモデルについて説明する。

3.2 プロセスモデルの提案

複写機の動作は図3のようなドラムクリーニングから定着までの一連のプロセスの流れとして認識されている。

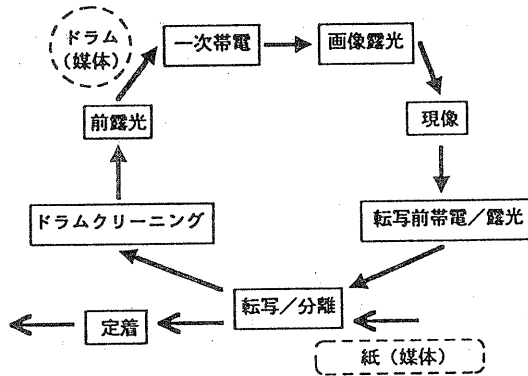


図3: 複写プロセス

このプロセスの関係を定式化したのがプロセスモデル(図4)である。プロセスとプロセスとの間は媒体によって情報が伝達される。プロセスを構成する部品の状態によってプロセスの動作が決定され、プロセスは入力された媒体に対しその動作を適用することによって媒体を出力する。

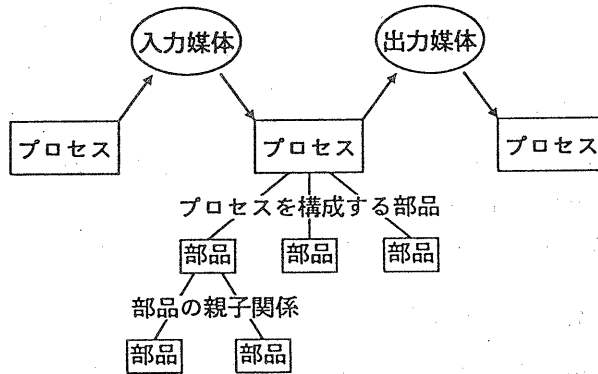


図4: プロセスモデル

形式的には次の式で表される。プロセスPにおける出力媒体の状態 M_P は、前プロセスP0の出力媒体の状態 M_{P0} とプロセスPの構成部品の状態 X_P に依存し、プロセスPの動作 F_P によって決定する。

$$M_P = F_P(M_{P0}, X_P)$$

また、プロセス内において部品Yの属性aの状態 $Y(a)$ は、影響元である部品 Y_i の属性 a_i に依存し、 $Y(a)$ の動作 $F_{Y(a)}$ によって決定する。

$$Y(a) = F_{Y(a)}(Y_1(a_1), \dots, Y_m(a_m))$$

接続関係はこれの特殊ケース $Y(a) = Y_1(a_1)$ となっている。

3.3 モデル記述形式

実際のモデル化に際しては、プロセス、媒体、部品の3種類のフレームによって記述する。

〈プロセスの記述〉

```
(def-process-class プロセス名
  (has-components {構成部品名})
  (previous-process {前プロセス名})
  (next-process {後プロセス名})
  (input {(入力媒体名 {<属性名>})})
  (output {(出力媒体名 {<属性名>})})
  (pass {(通過媒体名 {<属性名>})})
  (verification {出力媒体の検査})
  (factor {要因})
  (behavior {動作規則})) {}:繰り返し可
```

[複写機の一次帯電プロセスにおける動作記述の一例]

```
(behavior
  (ドラム<暗部帯電電位>
    ((rule (一次帯電部<帯電能力> ドラム<暗部帯電電位>)
      ((適度 *) → V d)
      ((過多 *) → V d + δ))
```

〈媒体の記述〉

```
(def-media-class 媒体名
  (attribute {属性定義}))
```

〈部品の記述〉

```
(def-parts-class 部品名
  (super-classes {上位クラス部品名})
  (component-of {所属プロセス名})
  (part-of {親部品名})
  (has-parts {子部品名})
  (reliability 信頼度)
  (durability 耐久度)
  (attribute {属性定義})
  (connection {接続関係})
  (behavior {動作規則}))
```

媒体と部品は複数の属性を持ち、装置の状態を表現する。プロセスは装置の動作の機能的な階層構造を、部品は装置の物理的な階層構造を表している。プロセスと部品に対して動作規則が記述できる。動作規則では複雑な方程式は用いない。影響元の属性の組との対応関係を列挙するだけである。このためにシミュレーションの実行では状態値のパターンと照合するだけで良く、定性推論独特の複雑な計算は不要である。例えば上の例では、一次帯電プロセス後のドラムの<暗部帯電電位>属性の影響元の要因は一次帯電部の<帯電能力>と一次帯電プロセス前のドラムの<暗部帯電電位>であり、一次帯電部の<帯電能力>が適度であれば一次帯電プロセス後のドラムの<暗部帯電電位>がV dになることを示している。

4 シミュレーション

本章では、前章で提案したプロセスモデルを用いたシミュレーション方法を説明する。

まず、装置の状態の表現方法を述べて、次にシミュレーションの手順と具体例を述べる。

4.1 状態の表現方法

装置の状態は、部品と媒体の状態によって表現される。これらは次の形式で表現される。

(部品/媒体名 属性名 プロセス名 状態値 信頼度)

部品または媒体の持つ属性のうち、指定した属性に対して、指定したプロセスの処理が終わった時点での状態値と信頼度を表現する。信頼度については故障診断のところで説明するが、属性値が正常であることの信頼性を相対的に評価した値である。

4.2 手順

開始プロセス、終了プロセスを指定してプロセス毎に順にシミュレーションを行なう。プロセス内のシミュレーションでは入力媒体の状態とプロセスを構成する部品の状態から、出力媒体の状態をモデルの動作規則に従って求める。

状態値を求める時は、部品またはプロセスの動作で示される属性間の影響関係に従って影響元の属性から影響先の属性の状態値を決定し、信頼度は影響元の属性の信頼度の最小値とする。

例えば、図5のように部品の動作規則として、バリスタの属性<設定電位>が記述されている場合に、一次帯電バリスタの<切れ>が”なし”で<ショート>が”なし”であれば、一次帯電バリスタの<設定電位>が”正常”になり、信頼度は4と3の最小値をとって3となる。

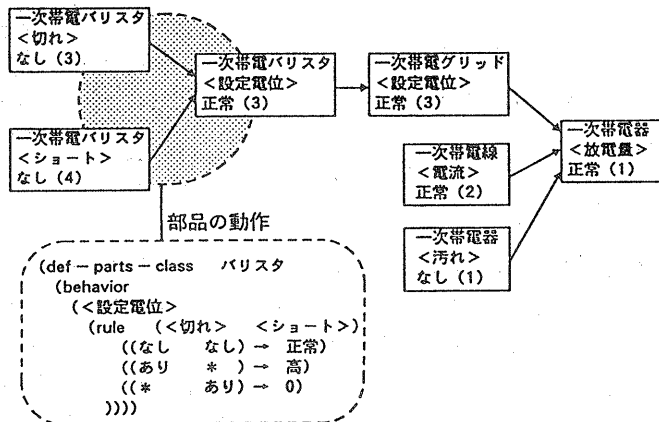


図5: プロセスモデルでのシミュレーション

5 故障診断

本章では、プロセスモデルを用いた効率の良い故障診断法を提案する。

初めに、診断と関連する因果関係木について説明し、次に、効率の良い診断のためにモデルに追加した項目（部品の信頼性、検査コスト）を説明し、最後に診断手順と具体例を説明する。

5.1 因果関係木

診断とは症状を引き起こす可能性のある原因の候補の中から、実際に起きているものを特定する作業である。

症状から可能な原因を求めるにはモデルの動作規則を結果から解いた因果関係を遡ることになるが、ここで、症状を根として因果関係に従って展開した木を因果関係木（図6）と呼ぶことにする。

診断は症状からスタートするが、因果関係に従って原因を求める展開と検査によって候補を絞り込む切断との2つの操作を因果関係木に対して行なう処理と考えられる。前述の一般論における、候補の生成と候補のチェックを合わせたものが展開であり、候補の絞り込みが切断に相当する。

展開と切断の処理の組合せ方で診断のバリエーションが生じる。次節では診断の効率化について考える。

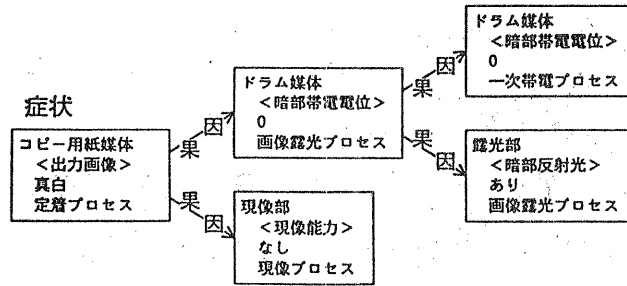


図 6: 因果関係木

5.2 診断の効率化

熟練したサービスマンは次のような戦略により効率の良い診断を行なっている。

1. 症状から導かれる全ての可能な故障原因候補を一度に扱うのではなく、可能性の高い候補から疑う。
2. 候補の絞り込みにおいて、手間のかかる検査は後回しにして、まず容易な検査から行なう。

上記の特徴を持った故障診断法を実現するために、部品の信頼性と検査コストをモデルに導入する。

部品の信頼性 部品ごと、あるいは部品の属性ごとに正常である信頼性が異なる。

(例) 一次帯電線の<汚れ>より<電流>の方が信頼性が高い。

具体的には、部品の属性の信頼度を相対的に1～5の数値(大きい方が信頼性が高く、故障しにくい)で定義し、耐久期限を越えた部品に対しては0を与えることとした。

検査コスト 検査の内容により実施の手間が異なる。

(例) 一次帯電線の<汚れ>より<電流>を検査する方が手間がかかる。

具体的には、検査項目の内容に応じて検査コストを確認、測定、交換、困難の4段階で定義した。

この2つの要素を考慮して次のような診断を行なう。

1. 因果関係木の展開で、信頼性の低いものを先に故障原因候補として生成する。
2. 因果関係木の切断で、検査コストの低いものから検査を行なう。

5.3 手順

故障診断は次の手順で進められる。なお、あらかじめ正常時のシミュレーションを行ない、全ての部品と媒体の属性についてその正常値と信頼度を求めておく。

1. 故障の症状を入力し、診断レベルを0に初期設定する。
2. 属性の信頼度が診断レベルに等しい(残りの故障原因候補の中で正常値の信頼度が最も低い)ものを対象にして因果関係木を展開する。
3. 現在の診断レベルにおいて故障原因候補がない場合には診断レベルを1増やして、

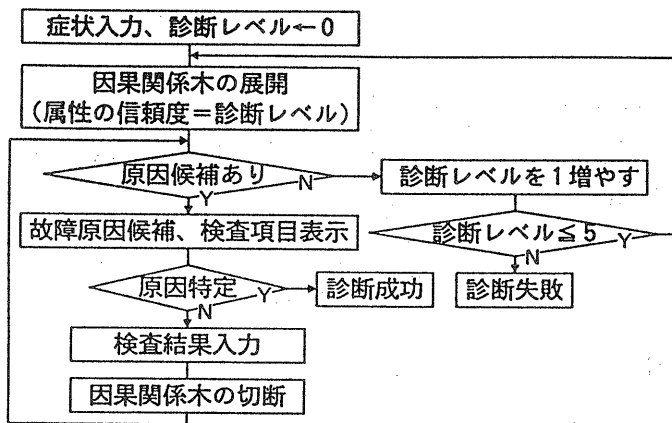


図 7: 診断手順

- (a) 診断レベルが5を越えていなければ、Step 2 へ。
 - (b) 診断レベルが5を越えていれば、診断失敗。
4. 因果関係木として展開されたノードのうち、元になる原因を持たない終端のノードを故障原因候補として表示する。また、生成された検査項目のうち、検査コストが最小のものだけを表示する。
 5. (a) 故障原因候補が故障原因として特定されれば、診断成功。
(b) 故障原因が特定されない場合、検査結果を入力する。
 6. 入力した検査結果と矛盾するノードを削除することにより因果関係木の切断を行ない、故障原因候補を絞り込んで、Step 3 へ。

5.4 具体例

具体例として図 8の因果関係木を使って説明する。

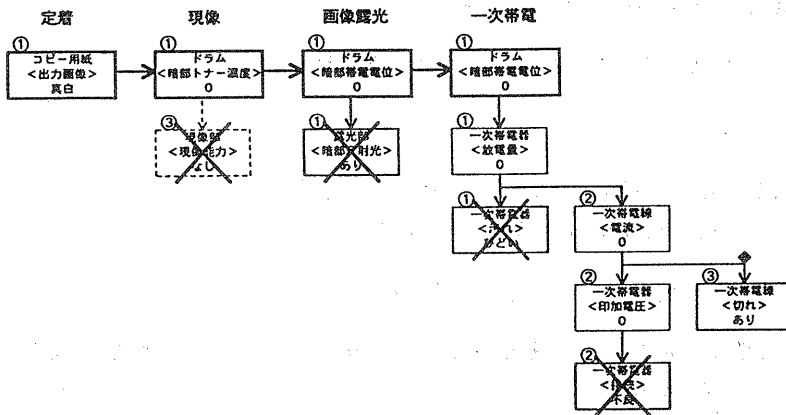


図 8: 診断例

症状「出力画像が真白」に対して、まず診断レベル1で正常値の信頼度が1の原因候補「露光部<暗部反射光>あり」と「一次帯電器<汚れ>ひどい」が生成される。次に検査結果として「一次帯電器<汚れ>なし」と「ドラム<暗部帯電電位>0（一次帯電プロセス）」を入力すると、因果関係木の切断と展開によって診断レベル2で「一次帯電器<接続>不良」が生成される。さらに検査結果として「一次帯電器<接続>正常」を入力して診断レベル3で「一次帯電線<切れ>あり」が生成されたのが図8である。既に行なわれた因果関係木の切断によって「現像部<現像能力>なし」という候補は生成されない。

このように可能性の高い（正常値の信頼度が低い）候補から先に故障原因候補が生成される。

6 システムの概要

システムの構成を図9に示す。システムは汎用的になっており、診断対象の装置のモデルを読み込んで内部でルールに変換する。シミュレーションや診断は変換されたルールの実行で行なわれる。

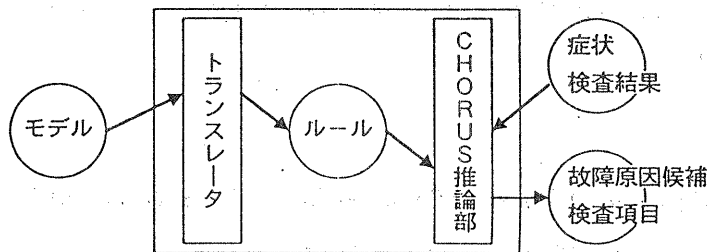


図9: システム構成図

NeXT上で Allegro Common Lisp と Interface Builder を使ってシステムを作成した。(図10)

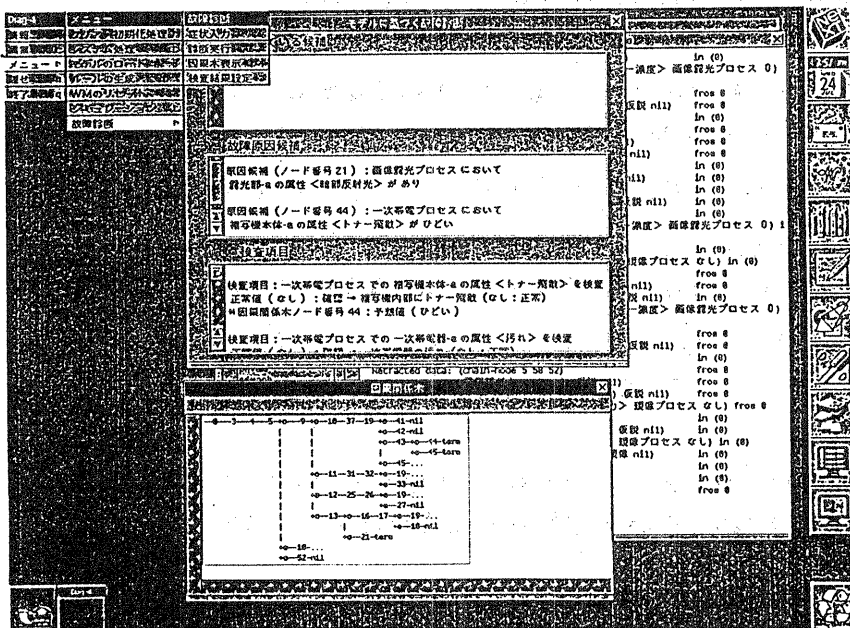


図10: 画面例

7 おわりに

複写機という複雑な装置へモデルに基づく推論の技術を適用し、実用的な故障診断システムの実現可能性を示すことを目的とした。

装置のモデルを使うことの一般的な利点は、設計時の知識からモデルを作るため経験的知識の蓄積のない新製品にもすぐ対応でき、知識の洩れが生じにくく、部品が変更されたらその部品のモデルを変更するだけで良いので知識の保守も容易である。今回作成した複写機のモデルでは一次帯電プロセス以外にはプロセス内部の詳細な部品モデルを作成しなかったが、全体としてシミュレーション、故障診断が実行できたこともモデルを使えばこそ可能なのである。

我々の研究の新規性は複写機のように複雑な一般の装置を扱うことができるプロセスモデルを考案したこと、診断を因果関係木の展開と切断の組合せととらえて、部品の信頼性、検査コストの2つの評価尺度をモデルに導入し診断の効率化を図ったことである。

今後の課題としては、プロセスモデルの記述能力の更なる検証と、システムのユーザインタフェースの強化があげられる。

参考文献

- [1] 古川康一, 溝口文雄 編. メンタル・モデルと知識表現. 共立出版, 知識情報処理シリーズ第1巻 1986.
- [2] 新井政彦, 本位田真一. 診断型エキスパート・システム. 情報処理, Vol. 28, No. 2, pp. 177-186, Feb. 1987.
- [3] R. Davis and W. Hamscher. Model-based reasoning:troubleshooting. *Exploring Artificial Intelligence*, pp. 297-346, 1988.
- [4] 大森康正, 上野晴樹. 対象モデルによるハイブリッド型故障診断システム—モデル表現と推論—. 人工知能学会誌, Vol. 5, No. 5, pp. 604-616, 1990.
- [5] キヤノン株式会社. NP-7000 シリーズ サービスマニュアル 改訂版1. 1985.
- [6] 飛鳥井ほか. エキスパートシステム構築ツール CHORUS(1)-(3). 情報処理学会第37回(昭和63年後期)全国大会講演論文集(II), pp. 1216-1221, 1988.
- [7] 村田真人, 吉瀬隆, 内藤広志, 柵木孝一. モデルに基づく複合系システムの故障診断(1)—モデル/シミュレーション—. 情報処理学会第42回(平成3年前期)全国大会講演論文集, pp. 2-197-2-198, 1991.
- [8] 吉瀬隆, 内藤広志, 柵木孝一. モデルに基づく複合系システムの故障診断(2)—診断法—. 情報処理学会第42回(平成3年前期)全国大会講演論文集, pp. 2-199-2-200, 1991.