事例推論の修復戦略への適用*

下村芳樹** 梅田 靖*** 富山哲男*** 吉川弘之***

An Application of Case Based Reasoning to Maintenance Strategy

Yoshiki SHIMOMURA, Yasushi UMEDA, Tetsuo TOMIYAMA and Hiroyuki YOSHIKAWA

The self-maintenance machine is a machine that can maintain its function flexibly even though faults happen in it. To realize functions for diagnosing and repair planning, a model based approach based on qualitative physics is proposed. Repair methods of the self-maintenance machine are conducted after qualitative simulations, but there are two problems with executing repair. The first problem is difficulty of the constructions with multiple repair operations. The other problem is the performance time. In this paper, we first discuss the validity of case based reasoning to these problems. Second, we propose the methodology for applying case based reasoning to repair executions for the self-maintenance machine.

Key words: self-maintenance, repair control, qualitative physics, case based reasoning

1. 緒 言

著者らは、保全作業の自動化を進めるために対象モデルと定性的な挙動推論に基づく故障診断、自己修復の方法を提案してきた¹⁾²⁾。これは修復対象機械の制御パラメータの操作による修復を考え、操作するパラメータの組合せを、故障時の機械の物理的状態のモデルに基づいてパラメータ間の因果関係から推論することにより、より柔軟で、強じんな修復を行うものである。しかし静電式複写機に代表される、その構成系に制御の対象として不安定な要素（化学的变化を陽に利用する等）を内包する機械システムにおいては、パラメータ間の因果関係を充分詳細にモデル化することは一般に困難である。その理由としては、系が置かれる状態（環境変化や構造上の劣化等）によってパラメータ間の因果関係が変化する可能性があること、また、その状態を完全に予測することが困難なこと等が挙げられる。この問題を解決するためには、対象機械一般に当てはまる知識のほかに、個々の対象に依存する情報を随時収集し、それを使った学習による知識のチューニングを行う必要がある。

また一般に、故障診断に代表される解析型の問題領域では、定性推論等の知識抽象化によるアプローチが有効である²⁾³⁾。しかし、設計あるいは修復方法の計

画等の合成型の問題領域では、問題領域の特徴としての探索空間の膨大さ、環境予測の不確実性などの理由から、事例知識の再利用や、事例の拡大解釈による組合せ等を利用した推論効率向上の方法が必要である⁴⁾。

本報では、文献¹⁾による故障診断/修復システム（以下、定性モデルベースドシステム（QMS/Qualitative Model Based System）と呼ぶ）を基に、事例ベースによる経験的知識と論理的操作による仮説に基づく推論を組み合わせた、柔軟かつ効率的な修復計画手法を提案し、静電式複写機を例とした自己修復システムの例を示す。

2. パラメータ操作による修復

QMSによる修復は、対象機械のパラメータの因果関係より、必要な機能を回復させるパラメータの操作を導出し、この操作を単独、あるいは組み合わせで実行することによってなされる。従って、モデルの正確さが修復能力を左右することになり、高い修復能力をシステムに保持させるためには、対象の記述に完全性が要求されるが、その実現は一般に困難である。

また、関係を定性的に表現することによって、扱う情報量の爆発を回避し、対象に関する知識を抽象化して取り扱うことが可能である反面、パラメータ間の関係の記述が定性的であるが故に、複数のパラメータを同時に操作する修復は困難である。

例えば、式(1)で表現されるようなパラメータの因

* 原稿受付 平成4年4月17日

** 正 会 員 三田工業(株) (大阪府中央区玉造 1-2-28)

*** 正 会 員 東京大学工学部 (東京都文京区本郷 7-3-1)

Fig. 1 An example of repair strategy of QMS

Fig. 2 An example of repair strategy based on case-based reasoning

果関係、及びそのパラメータ空間（図1）を考え、対象の状態が図中の影で覆われた部分（F1）で示される領域にある時、要求される機能を満たすものとする。この時、ある故障状態s1で、式（1）より定性的に導出される修復計画、

1) Aを増加させる

2) Bを増加させる

では、機能領域F1に到達することは困難である。従って、

3) AとBとを共にある比率で増加させる

が必要となり、試行錯誤的な操作に頼ることになる。

$$F1 = A \times B \quad (1)$$

つまり、QMSにおいては、以下の問題点が存在する。

- (1) モデルを完全に記述することが望まれるが、その実現は困難である。
- (2) 複数のパラメータ操作を必要とする修復を行う際の効率に問題がある。

3. 事例利用による修復計画の導出

3.1 事例利用による修復

2節で述べた修復の問題点を解決するための一つの方法として、本稿では次のような事例を用いた修復を考える。ここで、過去の修復に関する成功事例が幾つか存在し、各事例は図2中のs2あるいは、s3で表現されるとする。また、それぞれの事例において行われた修復操作が図中の網線で表現されるものとする。

つまり、s2ではBを上昇させることによって修復に成功し、s3ではAを上昇させることによって修復に成功したとする。この時、図中s1で表現される現在の状況と各成功事例の状況との差異を表現し、その差異を解消することが可能であれば、s1をs2あるいはs3の状況に変化させ、それぞれの修復操作を踏襲することによって、修復に成功する可能性を発見できる。

3.2 基本的戦略

実際の作業者が修復作業を行う際に、過去の成功事例を参考にすることは多い。その場合、事例をそのまま踏襲できることはまれで、事例に対して現状との差異を考慮した変更を施した後、踏襲することが多いと考えられる。従って、事例を用いた修復推論を計算機上にモデル化する場合、事例に対する論理的な操作が可能とする仕組みが必要である。

本手法の基本的な戦略として、まずQMSの故障診断の結果である故障時の対象機械の状態に関する定性的な情報を用いて、修復の成功例として登録されている事例を検索し、条件に一致した事例に記述されている修復計画を実行する。QMSから受け取る情報には、故障症状、故障、及び対象の現在の状態に関する情報としてパラメータとその定性値の組が含まれる。

単純な事例参照に失敗した場合、複数の事例を組み合わせることにより修復の仮説を生成し、その仮説に基づく修復を行う。不十分な情報の下での事例推論の有効性を発揮させるには、事例の組合せ、拡大解釈等による事例の柔軟な利用を行う必要がある。そのためには事例を抽象化して取り扱うことが望ましいので、ここでは定性値を利用している。

3.3 知識表現手法

3.3.1 事例の表現

事例は「故障症状」と「故障」を、検索インデックスとして分類される。ここでいう故障症状は、静電式複写機の場合「画像カブリ」等の機械の不具合として認識された機能の変化を指し、故障とは「ハロゲンランプ断線」等の対象の構造や特性が変化することを指す。個々の事例は図3に示す項目から構成される。

3.3.2 作業エレメント

図4に作業エレメントの例を示す。作業エレメントは実際の修復における最小単位の操作であり、「ある条件である操作を行った時の変化」を表し、故障によって分類される。つまり、ある故障に関して分類されている作業エレメントの集合は、その故障発生時の対象システムにおけるパラメータ間の定性的な感度の対応表と考えることができる。そして、同一の故障に

Fig. 3 Description of cases

job element	control of halogen lamp is out		
No.	LHS	LHS action	RHS
1	Hl=high	AVR_DOWN	Hl=normal
2	Vn=low	VR1_UP	Vn=normal
3	Vt=low	VR2_UP	Vt=normal
4	Hl=normal	VR1_DOWN	Vt=low
:	:	:	:
n	Vn=normal	VR1_DOWN	Vn=low

Fig. 4 Job elements

関する事例は、その故障に関するすべての作業エレメントで構成される集合を共有する。作業エレメントはルール形式で記述されており、前件部（LHS）として操作前状態（パラメータ定性値のリスト）及び定性的な操作内容、後件部（RHS）として操作後状態（パラメータ定性値のリスト）を持つ。ここで操作前状態は「ある条件」に、操作後状態は「変化」に相当する。前件部の操作内容は操作の対象とするパラメータと操作の方向により表現される。従って事例踏襲において作業エレメントを実行するとは、その前件部操作に記述されている操作内容を後件部に示される状態にできるまで行うことをいう。またここでの「状態」は、記述するパラメータが限られ、モデル上のすべてのパラメータを含む「状況」とはこの点で異なる。

3.3.3 状況の表現

状況は対象モデルに記述された全パラメータとその定性値から構成される。状況のマッチングは検索事例の順位づけを行う際に行われるが、これは全パラメータ定性値の比較によって行う。この理由は、QMSの故障診断では定性シミュレーションによって直接には検出も操作もできないパラメータの定性値をも導出しており、そういったパラメータもマッチングに用いることによってより最適な事例を提示させるためである。

3.4 推論アルゴリズム

事例利用による修復計画システムの推論アルゴリズムを図5に示す。ここでは、例題として小型普通紙複

Fig. 5 Algorithm of the case based repair reasoning

Fig. 6 An example of a parameter model

写機のドラム周辺部を用いる。そこでのパラメータの因果関係を抽象化した数学レベルのモデル（パラメータモデル）を図6に示す。ここで O_s 等の記号は、静電プロセスに関するパラメータであり、例えば O_s は紙上の画像濃度、 D_s は感光体上のトナー濃度、 V_s は感光体上の表面電位を各々表す。パラメータモデル上に記述されるパラメータ間の関係としては、定性的な加減乗除関係（+，－，＊，／），定性比例関係（Q+），定性反比例関係（Q－），及び定性微分関係（I－）が定義されている。また対象機械内に設置されたセンサ、及びアクチュエータはモデル上では各々 Sense Parameter, Control Parameter として表されている。以下、推論方法について述べる。

3.4.1 事例マッチング

QMSによって故障状態の定性的モデルが与えられた後、故障症状と故障の両方のマッチングによって事例の検索を行う。検索された事例は、その事例の「修復前の状況」と、QMSによって予測された現在の状況との定性的なマッチングの結果と、事例適用の成功/失敗履歴によって、適用に関する優先順位を与える。

例えば、「画像濃度が低すぎる（ O_s =low）」を故障の症状としてQMSによる故障診断を実行し、次のような故障候補が推論されたとする。

<i>Hl=high Vb=normal Asp=normal</i> <i>D=normal Gamma=normal Sp=low</i> <i>X=high Ds=low</i> <i>Beta=normal Vt=normal</i> <i>Vn=normal Zeta=normal</i> <i>Vs=low Os=low</i>

Fig. 7 An example of a situation

case(1)	
<i>situation before repair</i>	<i>Hl=high D=normal X=high Beta=normal Vn=low Vs=low</i> <i>Vb=normal Gamma=normal Ds=low Vt=normal Zeta=normal</i> <i>Os=low Asp=normal Sp=low</i>
<i>situation after repair</i>	<i>Hl=normal D=normal X=normal Beta=normal Vn=normal</i> <i>Vs=normal Vb=normal Gamma=normal Ds=normal</i> <i>Vt=normal Zeta=normal Os=normal Asp=normal Sp=normal</i>
<i>symptom</i>	<i>density of image is too low</i>
<i>fault</i>	<i>control of halogen lamp is out</i>
<i>jobs for repair</i>	1
<i>count for success number</i>	3
<i>count for fail number</i>	1

case(2)	
<i>situation before repair</i>	<i>Hl=high D=normal X=high Beta=normal Vn=low Vs=low</i> <i>Vb=normal Gamma=normal Ds=low Vt=low</i> <i>Zeta=normal Os=low Asp=normal Sp=low</i>
<i>situation after repair</i>	<i>Hl=normal D=normal X=normal Beta=normal Vn=normal</i> <i>Vs=normal Vb=normal Gamma=normal Ds=normal</i> <i>Vt=normal Zeta=normal Os=normal Asp=normal Sp=normal</i>
<i>symptom</i>	<i>density of image is too low</i>
<i>fault</i>	<i>control of halogen lamp is out</i>
<i>jobs for repair</i>	1,2
<i>count for success number</i>	1
<i>count for fail number</i>	0

case(3)	
<i>situation before repair</i>	<i>Hl=high D=normal X=high Beta=normal Vn=low Vs=low</i> <i>Vb=high Gamma=normal Ds=low Vt=low Zeta=normal</i> <i>Os=low Asp=normal Sp=low</i>
<i>situation after repair</i>	<i>Hl=normal D=normal X=normal Beta=normal Vn=normal</i> <i>Vs=normal Vb=normal Gamma=normal Ds=normal</i> <i>Vt=normal Zeta=normal Os=normal Asp=normal Sp=normal</i>
<i>symptom</i>	<i>density of image is too low</i>
<i>fault</i>	<i>control of halogen lamp is out</i>
<i>jobs for repair</i>	2,3,7
<i>count for success number</i>	2
<i>count for fail number</i>	1

Fig. 8 Examples of cases

ハロゲンランプ設定不良 $Hl=high$

また、その時の機械の状態をパラメータとその定性値の組によって図7に示す。

この時、故障症状「画像濃度が低すぎる」と故障「ハロゲンランプ設定不良」によって事例の検索を

<i>job element</i>		<i>control of halogen lamp is out</i>	
<i>No.</i>	<i>LHS</i>	<i>LHS action</i>	<i>RHS</i>
1	$Hl=high$	AVR_DOWN	$Hl=normal$
:	:	:	:
n	$Vn=normal$	VR1_DOWN	$Vn=low$

Fig. 9 Job elements

行った結果、図8に示す(1)~(3)の事例が該当したとする。次にこれらの事例の操作前の状況と現在の実際の状況(図7)との定性的なマッチングの結果によって、この場合、(1)(マッチ数13)、(2)(マッチ数12)、(3)(マッチ数11)の順に適用に関する優先順位が与えられる(図5②)。

3.4.2 事例による修復

次に事例に記述されている修復作業による修復を試みる。その際、修復作業は作業エレメントの連なりとして記述されており、その前件部にあたる状況と現在の状況とのマッチングを行う。このマッチングに失敗した場合は、異なる部位を解消する作業エレメントを検索し、その作業エレメントを実行する。

作業エレメントの実行は、後件部に示される状態にできれば成功と判断し、次の作業エレメントの実行へ移る。実行に失敗した場合は、対象を作業実行前の状態に戻し、後述する作業エレメントの追加による再試行を行う。事例に記述されているすべての作業エレメントが成功すれば事例の踏襲に成功したこととする。

先の事例(1)による修復を例にとる。事例(1)の作業エレメント1の前件部状況と現在の状況とのマッチングは成功する。よって、作業エレメントの操作内容(AVR_DOWN)を状態($Hl=normal$)にできるまで行う(図9)。

3.4.3 仮説生成

作業エレメントは事例を踏襲する際にその修復作業を再現するために事例から参照されるが、エレメントの操作前パラメータと実際の状況のマッチングに失敗、あるいはエレメントの実行に失敗した場合に、失敗の原因となったと考えられる状況の一致しない部分を別のエレメントによって解消するためにも使用される。前者ではマッチしないパラメータをマッチするように変化させるエレメントを探索する(図5⑤)。後者では事例の状況と現状との相違を失敗理由に関する仮説とし、現状が前件部にあり、事例の状況が後件部にあるようなエレメントを探索する(図5⑧)。各々エレメントを発見できた場合には、マッチングあるいは実行に失敗したエレメントの前に追加して再度事例適用を試みる。

1) 作業エレメントマッチングの失敗

case(2-1)	
situation before repair	Hl=high D=high X=high Beta=high Vn=normal Vs=low Vb=normal Gamma=normal Ds=low Vt=normal Zeta=normal Os=low Asp=normal Sp=low
:	
jobs for repair	1,4,2
count for success number	1
count for fail number	0

Fig. 10 An example of updating a case

例として 3.3.1 項の状態において、事例 (2) を適用する場合を考える。事例 (2) の修復作業を試みると、事例 (2) の作業エレメント 2 の前件部状況と現在の状況とのマッチングは失敗してしまう。ここで、マッチングに失敗した原因である状況の一致しない部分は $V_t = \text{normal}$ であるので、 V_t を事例 (2) の状況である low にできるような作業エレメントを検索する。その結果エレメント 4 を発見し、エレメント 2 を実行する前に作業エレメント 4 を実行すればエレメント 2 を成功できる可能性を見いだす。よって、この結果修復に成功すれば、新しい事例 (2-1) として登録される (図 10)。

2) 作業エレメント実行の失敗

作業エレメントに基づく操作の結果、その後件部と実際の結果を一致させることができなかった場合、作業エレメントの実行に失敗したと判断する。この時、その作業エレメントを参照するすべての事例を検索する。次に、それら事例の状況の共通部分と与えられた状況の差異を作業エレメント実行失敗の原因と仮説し、その差異を表すパラメータと定性値の組を作業エレメント前件部に追加することで、作業エレメントを詳細化する。これは作業エレメント前件部の示す成立条件がパラメータの定性値で構成されることから、対象構造が同じ物についてのみ作業エレメントの正当性が保証されると考えることによる。次にその原因を回避する作業エレメントを見つけることができれば、先の失敗した作業エレメントとの組合せによる再試行を行う。

例として、事例 (1) による修復を試みた結果、作業エレメント 1 の実行に失敗したとする。この時、その作業エレメント 1 を参照している事例である事例 (1)、事例 (2) を検索する。これら事例の状況の共通部分と与えられた状況の差異は V_n であるので、これを作業エレメント実行失敗の原因と仮説し、作業エレメントの前件部に $V_n = \text{low}$ を追加する。次に $V_n = \text{low}$ を実現する作業エレメントを探索し、作業エレメント n を発見する。先の失敗した作業エレメント 2

case(1-1)	
situation before repair	Hl=high D=normal X=high Beta=normal Vn=normal Vs=low Vb=normal Gamma=normal Ds=low Vt=normal Zeta=normal Os=low Asp=normal Sp=low
:	
jobs for repair	n,1
count for success number	1
count for fail number	0

job element	control of halogen lamp is out		
No.	LHS	LHS action	RHS
1	Hl=high, Vn=low	AVR_DOWN	Hl=normal
:	:	:	:
n	Vn=normal	VR1_DOWN	Vn=low

Fig. 11 Updating a job element

Fig. 12 The system architecture

との組合せによる再試行を行い、その結果修復に成功すれば、作業エレメント (1) は、図 11 のように変更され、また、新しい事例 (1-1) が登録される。

3.4.4 事例の登録

事例は、状況の相違を解消できる操作を作業エレメントを検索することによって発見することができ、なおかつその結果として修復に成功した場合にその事例を登録する。また、事例による修復にすべて失敗した場合は、QMS で提案される Trial & Error 方式の修復を試み、修復に成功した場合には新たな事例として登録する (図 5 ⑨)。

4. インプリメンテーション

4.1 システムの構成

実際のシステムは SUN-SPARC 上の Smalltalk-80⁵⁾ によって記述しており、QMS のインタフェースを介して実機 (静電式複写機) と接続している。その構成を図 12 に示す。

4.2 システム実行例