

TM-1110

構造写像を利用した
事例ベース推論システム

森本 太朗、椿 和弘
山路 孝浩 (シャープ)

September, 1991

© 1991, ICOT

ICOT

Mita Kokusai Bldg. 21F
4-28 Mita 1-Chome
Minato-ku Tokyo 108 Japan

(03)3456-3191~5
Telex ICOT J32964

Institute for New Generation Computer Technology

構造写像を利用した事例ベース推論システム

A Case Based Reasoning System using Structure Mapping

森下 太郎 椿 和弘 山路 孝浩

Tarou Morishita Kazuhiro Tsubaki Takahiro Yamaji

シャープ（株）情報技術開発センター

Information Systems Research and Development Center

Sharp Corporation

Abstract : In the study of Case Based Reasoning(CBR), it is important to strengthen the problem solving function by analogy. We have paid attention to Structure Mapping Engine(SME), and proposed the CBR's method using SME in order to reinforce the ability of CBR. To demonstrate this method, we are developing an electrical circuit design system. Using SME, the system generates block diagrams satisfying the input specifications by retrieving old design cases whose functional structure are similar to the input design problem's. This paper describes the outline of SME, the method of adapting SME to CBR, and the content of our electric circuit design system using such CBR method.

1 はじめに

事例ベース推論 (Case Based Reasoning ; 以下 CBR) は従来のルールベース推論の欠点を補うものとして注目されてきており、両者を相補的に用いることによって、問題解決能力の総合的な向上を目指す研究 [1,2] が進められている。

CBRの有効な適用領域は、ルールベース推論だけでは多大な処理時間を要する問題や、ルール化は可能だが、ボタンが多過ぎてルール化しきれない問題、あるいはルールの作成自体が難しい問題であるとされている。このうち、後の2つの場合においてはCBRの類推機能が重要な役割を果たす。

CBRの類推機能は、通常、問題解決に関連した適切なインデキシングと概念階層等に基づくインデックス値間の距離計算により与えられるものが多い。しかしながら、対象領域に関する分析が不十分な状況下では、問題の有効な特徴付けは困難であり、表層的なインデキシングに陥りやすいと考えられる。また一方で、表層的な特徴のみで事例想起を行なうと、似て非なる事例を想起したり応用の効く事例を想起できないという問題が生ずる。

そこで我々は、表層的な特徴の背後にある因果関係等も考慮しながらより深いレベルにおいて類似事例を想起することが重要であると考え、数少ない類推計算のプログラムの1つである構造写像エンジン (Structure Mapping Engine ; 以下 SME [3]) に着目してきた [4]。

SMEは、類推対象となる2つの系において、名前や性質といった表層的特徴よりもそれらの背後にある高次の関係の一致するもの程類推されやすいという構造写像理論の実証用に試作されたプログラムである。

SMEを利用すれば、分析された十分な知識がなく、問題対象の表現が不十分であっても、表層的なインデックスに頼ることなく、表現された関係構造自体をキーとして、各系の対応関係を類似度付きで算出可能である。

我々は、CBRの類推能力の強化を目的として、PSI上にSMEを試作し、SMEにより事例検索処理を行なう、簡単な電子回路設計支援システムを開発中である。ここでは、SMEのCBRへの適用方法と試作中のシステムの内容を中心に報告する。

2 構造写像エンジン

2.1 構造写像理論

構造写像理論における表現規約を以下に示す。

- entity 個体及び定数
- predicate 個体の性質や個体間の関係を記述し、以下の種類に分かれる。
 - function : entity を他の entity に写す。
 - attribute : entity の性質を表す。
 - relation : predicate 間の関係を示す。

個々の個体をアトム、個体間の関係を述語により表現する。構造写像理論では、単なる性質よりも関係の方が類推により写像されやすいという直観に基づいて理論が組み立てられており、ベースドメインからターゲットドメインへの写像は、次のような暗黙の取り決めに従っている。(例は Fig1 による)

1. 個体は個体に写される。

`heat<->water, beaker<->coffee...`

2. 孤立した 個体表現はより大きな関係構造に含まれないと捨てられる。(大きな関係構造ほど写像されやすい)
`liquid(water)` のような属性を捨てられる。

3. ベースドメインにおける relation は写像されやすい。

`grater_than(pressure(beaker),pressure(vial))`

`<-> grater_than(temperature(coffee),temperature(ice-cube))` のような関係が写像される。

4. ベースドメインにおけるより高次の relation は、ターゲットドメインにおいてその relation が明示されてなくても写像される (systematicity)。

例において、ベースの述語 "cause" がターゲットに写像される。

以上のような暗黙の取り決めを守りながら、構造写像理論は次のようなプロセスで類推を行なう。

- 与えられたターゲットに類似しているベースをメモリから引き出す。
- ベース・ターゲット間の対応を作る。
- ベースに存在し、ターゲットに存在しない関係を推論候補として提示する。
- 対応関係の候補に対して評価点を与える。

評価には、類似と差異の数や程度、推論候補により提供される新しい知識の量といった構造的評価基準、及び領域に対する意味的な正当性のチェックを行なう正当性基準が必要であると述べられている。

2.2 構造写像エンジン

構造写像理論では具体的な写像の取り方として4つの方法が定義されているが、ここでは、literal-similarity と呼ばれる写像の取り方に沿って処理の概略を説明する。(Fig.1 参照)

[step 1] ベース、ターゲットの各表現リストから、同一名の述語のペアリストを抽出する。

[step 2] ステップ1で抽出された、述語の各組に対して、対応する引数間の述語またはエンティティのペアリストを抽出する。新たなペアリストに対しても引数間の組合せが可能である限りこの操作を繰り返し、マッチ仮説を生成する。

[step 3] ベースとターゲットの間の1対1の対応関係を保持するために、各マッチ仮説に対して、一貫性のチェックを行なう。一貫性のチェックは、1対1関係を破壊するような他のマッチ仮説の集合 (コンフリクトセット) が、対象としている集合に含まれるか否かにより判断する。

- [step 4] マッチ仮説の木構造上においてルートから順に、自ノード以下のマッチ仮説の集合で、一貫する最大のものを求める。算出された集合を Gmap と呼ぶ。
- [step 5] ベースにある高次の関係がターゲットにない場合を考慮して、共通のベース構造を共有し、かつ一貫しているすべての Gmap を結合する（要素を合併する）。
- [step 6] ステップ5で形成された各 Gmap に対して、結合しても一貫性を保つものは結合する。
- [step 7] Gmap のベースアイテムの先祖となるようなルートノードがベースドメインに存在するか否かを調べ、存在すればそのルートの子孫の内 Gmap のベースアイテムには無いすべてのノードを推論候補として求める。
- [step 8] 各マッチ仮説に以下のルールを適用してマッチ仮説毎の評価点を計算した後、各 Gmap において点数の総和を求めることにより構造的評価値を算出する。なお、適用されるルールが複数存在する場合の計算方法は Dempster の計算方法による。

ルール1: マッチ仮説が同一の述語のものである場合、その述語が function なら 0.2、それ以外なら 0.5 を評価点として与える。

ルール2: マッチ仮説の子孫のマッチ仮説が存在する場合 0.4 を評価点として与える。

ルール3: function でないマッチ仮説に対して、リーフまでの木構造の段数（オーダー）が等しければ 0.3、オーダーが1以内ならば 0.2 を評価点として与える。

ルール4: 子孫のマッチ仮説には元のマッチ仮説の評価点の 80% を与える。

構造写像理論の暗黙の取り決めの項で示した 2 は Gmap の作り方とルール 2, 4 により、3 はルール 1, 3 により、4 は推論候補形成により具体化されている。

3 構造写像エンジンの事例ベース推論への適用

3.1 CBRにおける有効性

CBRにSMEを利用することの有効性を以下に整理しておく。

1. 問題対象が分析の不十分な領域のものであっても、構造的な関係表現により問題対象を記述できれば、既知事例との対応関係を取ることができる。

これは、厳密にインデキシングしておかなくても、関係ある対象同士はあたかも同一のインデックスに属するものとして扱えるということである。インデックスの設計に労力がかかる問題を扱う場合有効である。

2. 一定の評価基準に従った類似性尺度を持つ

これは、領域における概念階層木の定義や概念間の距離の定義等の手間から解放されることを意味する。ドメイン知識が良く分析整理されていない場合効果的である。

3. 問題側に欠落しているであろう情報を事例から推測し必要により補完できる。

これは、概念階層木上の距離は遠くても、背景となる因果関係等が同様のものであれば欠落情報を推測・利用できることを意味し、異なるドメイン間の知識の利用を図る場合効果的であると考えられる。

SMEはその性格上、厳密な解を効率的に求めたいという要求には不向きであり、構造的に類似した既知の事例を参照して未知の問題をの解決したいという要求に向いている。設計問題を対象とした場合、初心者に対する設計ガイダンスや、新規・改良設計の際の発想支援といった応用が有効ではないかと思われる。Fig.2は電子工作のドメインにおけるSMEの利用例である。設計の初心者が、照度検知回路を設計する場合、照度検知回路は、温度検知回路と制御構造は同じで、制御対象が異なるだけであるという情報を把握しておれば、照度検知回路のおおまかな回路ブロックを温度検知回路のブロックから構成することはたやすいであろう。

このことは、図に示すようなSMEの知識表現によって回路の機能構造を表現しておけば、SMEの処理ステップに沿って機械的に、温度検知回路のブロックを照度検知回路のブロックに置き換えることに対応させて考えることができる。

CBRにおける個々の利用場面としては、事例検索と事例修正が考えられる。

3.2 事例検索における利用

ベースを事例ベース、ターゲットを問題事例に対応させて考えると、SMEの枠組はそのまま事例検索に利用可能である。この場合SMEの最終出力結果の内、最も高い評価点の与えられたGmapが事例検索の結果に対応している。

SMEを利用した事例検索により、問題事例に対して有効な複数の事例を部分的に検索し組み合わせることはたやすい。すなわち、SMEはベースの1まとまりの事例自体を対応関係として抽出してくるのではなく、木構造単位、あるいは部分木構造単位で対応関係を作るから、検索結果は通常、複数の異なる事例の一部である。

また、一貫性は損なわれるが、部分木を意図的に切り出して、その部分木においては一致度の高い他のマッチ仮説で対応関係を置き換えるという操作を行えば、全体としてより望ましい事例が検索できる場合もある考えられる。例えば、Fig.2の例では、turn_on以下の部分木をLED点灯回路の事例から検索することに対応する。

3.3 事例修正における利用

1. 問題事例に対するアドバイス

SMEによる事例検索の延長として素直に考えられる利用法である。例えば、設計問題における要求仕様が完全な形で与えられることは稀であり、仕様の記述には暗黙の省略や記述忘れが多い。要求仕様を検索対象としてSMEを適用した場合、検索結果の推論候補を参照することによって、ユーザに要求仕様が不足しているのではと問いかけることができる。

2. 失敗の予測と回避

原因の一致をたどることによって失敗の予測と回避を行なうアプローチを採用しているものには[5]があるが、構造画像エンジンの推論候補生成機能を用いた場合、領域に依存しない広い範囲で、新たな失敗状況に対して、その原因や回避法に関するアドバイスを与えることができる。

すなわち、失敗、失敗を引き起こす原因(状況)、失敗回避法を「因果関係」により結合して表現し、新たな失敗状況の入力から、失敗や失敗回避法を、ターゲットに欠落した情報として提示する。記述例をFig.3に示す。

4 構造画像エンジンを用いた回路設計支援システム

SMEを利用したCBRの枠組を実証するために、我々は、簡単な電子回路の上流設計問題を取り上げ、システム開発を進めている。本システムでは、入門書レベルの基本回路に関する知識は持っているが設計経験の少ない初心者が教科書のレベルから少し外れた応用問題を解く場面を問題状況として設定している。

本システムでは、SMEで扱う機能構造を表現するのに価値工学(Value Engineering; 以下VE)の表現法[6]を応用している。VEの表現を導入することによって、SMEの特徴を生かした範囲内で、設計における表現の相違を程良く吸収するとともに、データの流れに沿ったVEの機能系統図を導入することにより、回路の物理構造へのマッピングを取りやすくしている[7]。

4.1 システムの構成と処理の流れ

本システムの入力には要求仕様であり、出力は要求仕様を満たすような回路ブロック図である。システム構成図(Fig.4)に沿って処理の流れを簡単に述べる。

最初に機能分析部(Analyzer)に要求仕様を与える。Analyzerは対話的に要求仕様を分析して、問題事例の詳細な表現を生成する。

次に、SMEを用いた事例検索部(Retriever)では、まとまったデータの流れ毎に、Analyzerで生成された機能構造をターゲット、機能構造をインデックスとする事例をベースとして、機能構造が類似している設計事例を複数個検索する。

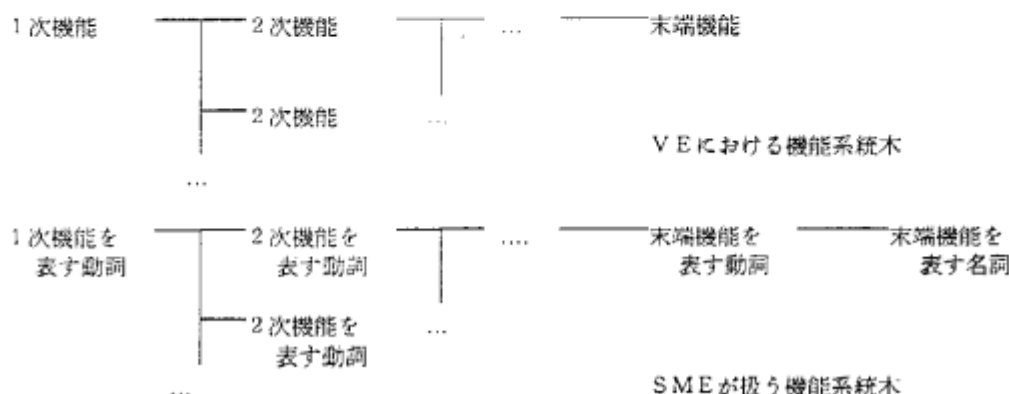
検索された類似の設計事例は事例修正部(Adaptor)において入出力の一致が検査され、修正が必要な場合は修正可能かどうか確認しながら組み合わせられる。これにより、出力ブロック図の元になる情報が生成される。

Adaptorにより生成された物理構造に関する情報をもとに、表示部で対応するブロックと結線を描画し、画面にブロック図を表示する。また、仕様不備による不足ブロックや失敗と考えられる状況が、SMEにより推測され、Advisorを通して出力される。

4.2 機能構造の表現

データや制御対象を表す「名詞」と、機能用語として定義されている「動詞」の組によって要求機能を表現する (Fig.5)。1つの要求機能に対してその要求機能を実現するための下位機能あるいは上位機能の入力を促すことによって、要求機能の階層構造 (機能系統木) を生成する (Fig.6)。

Analyzerが抽出する機能系統木はVEの表現に従うが、SMEで扱う際には下記の対応に従って内部的にデータを変換している。



「動詞」は、VEで定義された機能用語と電子回路関連のシソーラスに定義されている用語から構成される予約語である。「名詞」の記述に制限はない。

4.3 事例の表現

事例ベース中の事例表現の概略を以下に記す。問題事例にはブロック図情報、修正情報は与えられないが、CBR適用後に問題事例のブロック図情報が求められる。

```

Case ::= {
    事例名,
    機能系統木,
    SubCases
}

SubCase ::= {
    事例名,
    機能系統木,
    データフロー情報,
    入出力情報,
    制御情報,
    修正情報,
    ブロック図情報
}

/* 事例のインデックスに相当する */
/* 要求機能間のデータの流れ */
/* 入出力信号名、
    信号の属性値、
    信号の属性についての定量的な制約の記述 */
/* データの合流・分岐点における同期情報等 */
/* 属性値の変更を行なうためのルール */
/* SubCaseを構成する内部ブロックの結線情報 */

```

4.4 ターゲット構造の生成

Analyzerは対話的にまず、“Case”に相当する情報と、各要求機能から「入力情報」に相当する情報を抽出する。次に機能系統木のリーフノードの要求機能間におけるデータの流れ (データフロー; Fig.7) を抽出し、各デー

タフローを含むような部分木に機能系統木を分割する。こうして形成された部分機能系統木 (Fig.8 参照) 毎に "Sub-Case" に相当する情報 (修正、ブロック図以外の情報) をまとめる。

生成された Case に相当する全体情報、データフロー、SubCase に相当するデータフロー毎の部分情報が問題側の事例表現となる。SME のターゲット構造となるのはこの内、データフロー毎の部分情報が持つ部分機能系統木であり、事例ベース内の SubCase の機能系統木がベース構造となる。

部分機能系統木を検索対象とする意味は、機能表現だけで回路ブロックが持つ情報は表しきれないこと、すなわち、結線とそれに沿った信号の流れの情報をインデックスに反映させなかったことによる。

4.5 機能構造の検索

ベースとターゲットの各構造を入力として SME に渡し、SME を実行する。一定以上の評価値が与えられた Gmap のベースを検索事例として取り出す。

ターゲットの機能構造全体をカバーするような "SubCase" が抽出されない場合は、部分機能系統木を評価値の高い Gmap によりカバーされる部分とカバーされない部分に分割し、カバーされない部分を新たなターゲット構造として検索することにより対処する。

機能構造の検索結果を示す一例 (Fig.8) からは、SME が「時間」と「数量」という Entity レベルの仕様の異なりや仕様数の異りを吸収していることが分かる。

4.6 事例修正

1. 詳細仕様の整合性検査に伴う修正

検索事例の信号数や信号の属性値といった入出力情報が問題事例の入出力情報の制約内のものであるか否かが検査される。例えば、カウンタの進数が、その事例で使われる IC で設定できるか否かが検査される。検査を通過したものに関しては SubCase 同士の組合せが生成される。

組み合わせられた SubCase に関して、組み合わせることによって制約に違反しないか否かが検査される。例えば、TTL と CMOS のような電圧レベルの異なる回路の組み合わせが検査される。

以上の処理は、システム内部のプロダクションシステムが整合性検査/組合せルールを実行することにより行なわれる。

整合性検査の結果、検索事例がそのままでは使えないことが判明した場合、検索事例内に記述されたヒューリスティックな修正ルールが参照される。

修正ルールは、例えば、「カウンタの桁数が問題事例の方が大きく、検索事例のカウンタだけではカウントできない場合、カウンタを接続して桁数を増やすことによって対処する」といった修正法が記述される。修正ルールにより修正可能であることが確認できれば、その検索事例は検査を通過したものとして扱われる。

2. SME のアドバイスによる修正

上記の修正ルールを利用したアドバイス以外に、3. 3 (2) に従う SME によるアドバイスが考えられる。

本問題領域では、接続ミスによりノイズが乗る場合、電氣的 ON / OFF の機能ブロックをメカ的な機能ブロックに単純に接続することによりメカの機能を損ねる場合等において類似の失敗事例が存在する。

4.7 実験例

一定温度を越えた時刻と時間を測定するような「温度検知機能付き時計」を問題として与え、ストップウォッチ、温度ブザー、時計、テレビの仕様時間計を事例として与えたところ、各事例の部分事例が検索・組み合わせられ、Fig.10 に示すような回路ブロックが合成された。

5 課題

5.1 構造写像エンジンの高速化

事例の構造が深く数が多いほどSMEの処理の負荷は大きくなる。これは、2.2のステップ6が全探索型の組合せ問題になっており、ステップ5までで生成されるGmapの数が多くなると組合せ爆発を起こすことによる。

この問題に対してはアルゴリズム自体の改良と並列化により高速化を図っているところである。これらの対策によりある程度までの高速化が実現されるが、大規模なデータに対しては最適な組合せのみを求めるようにアルゴリズムを修正する必要があると考えている[8]。

なお、電子回路設計支援システムにおいては、事例間の因果関係まで考慮する必要はないと考え、ターゲットとベースの1組づつに対してSMEを適用することにより、SME内で生じる組合せ爆発の問題を回避している。

5.2 表現レベルの問題

電子回路設計支援システムにおいて、機能系統木の表現は入力者に委ねられるため、表現のレベルにバラツキが生じる。これは以下のような原因による。

- 動詞の選択に制限がない。
- 機能のとらえ方により、幾通りもの機能系統木の表現が可能である（2次機能の展開法に規則がない。）

これに対しては、機能用語のシソーラス化を図って、機能展開の指針とすることや、機能展開のレベルの設定といった対処法が考えられる。

6 おわりに

CBRの類推機能を強化する手段として、構造写像エンジンを利用した事例検索／修正の方法を提案した。この手法を実証するために、SMEを使って類似の機能構造を持つ設計事例を検索してくることにより、仕様を満たす回路ブロック図を生成するような電子回路設計支援システムを作成し、手法の一部を確認した。

今後、もし、SMEのような類推モジュールがある程度のレベルまで高速化され、大規模知識ベース等を背景として設計事例や計画事例をデータベース化する環境が整えば、このような枠組によって、新規の設計や計画を行なう際に、異なる既知の領域から考え方やノウハウを移入して未知の問題解決を行なったり、計算機に知的なアドバイスや発想支援的な検索を行なわせることが可能となるものと考ええる。

本研究はI C O T受託テーマの一環として行なわれたものです。常日頃御指導いただくI C O T第7研究室 新田室長に深く感謝致します。

参考文献

- [1] 小林重信：事例ベース推論の研究課題，情報処理学会研究報告，91-AI-75，1991
- [2] 鍋田茂子，寺野隆雄：事例ベース推論機構の効率に関する分析と評価，第5回人工知能学会全国大会論文集，3-2，1991
- [3] B.Falkenhainer,K.D.Forbus,D.Gentner：The Structure-Mapping Engine, Proc. of the Fifth National Conference on Artificial Intelligent, 1986
- [4] 森下太朗，他：事例ベース推論における構造写像エンジンの利用，情報処理学会第42回全国大会，1991
- [5] D.Navinchandra：Case Based Reasoning in CYCLOPS, a Design Problem Solver, Proc. of the Case-Based Reasoning, DARPA, 1988
- [6] (社)日本VE協会編：機能用語の選定とその分類体系，VE用語研究会報告書，1981
- [7] 梅和弘，他：構造写像エンジンを利用した設計支援の考察，情報処理学会第43回全国大会，to appear, 1991
- [8] 山路孝浩，他：構造写像エンジンの高速化，情報処理学会第43回全国大会，to appear, 1991

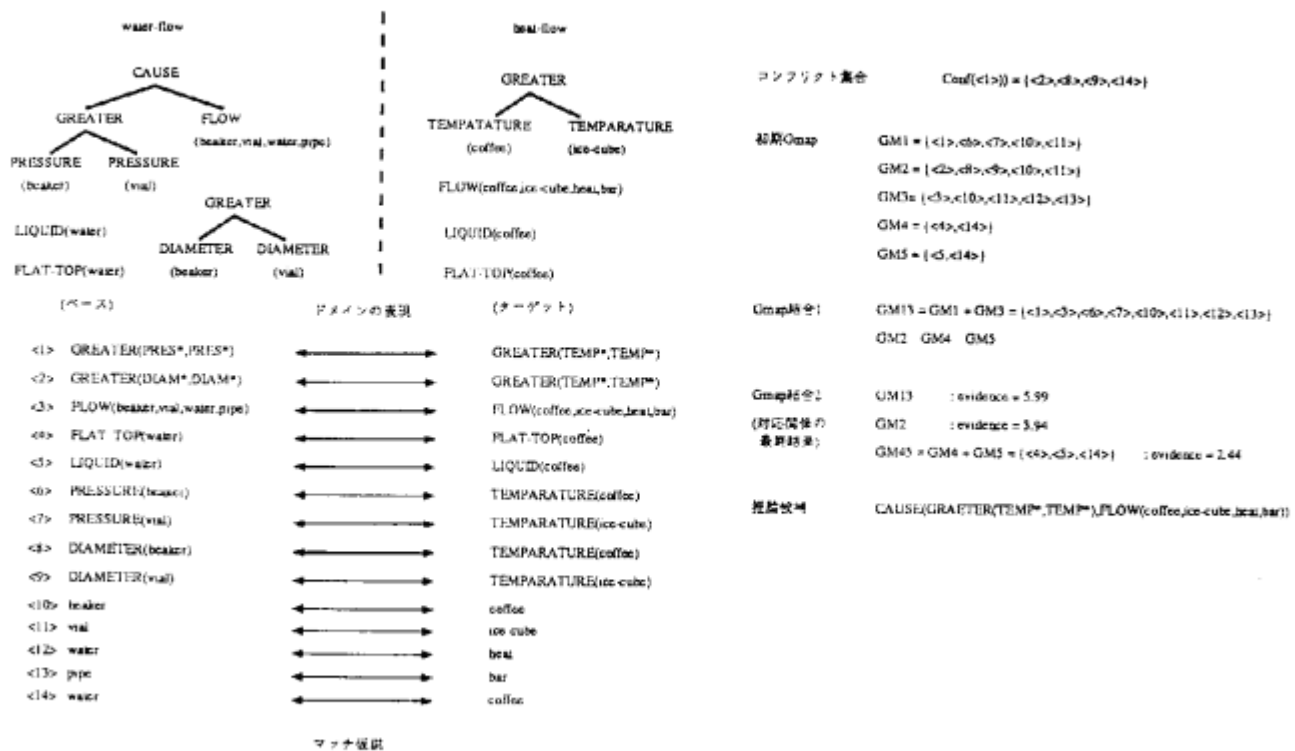


Fig.1 構造写像エンジンの処理例

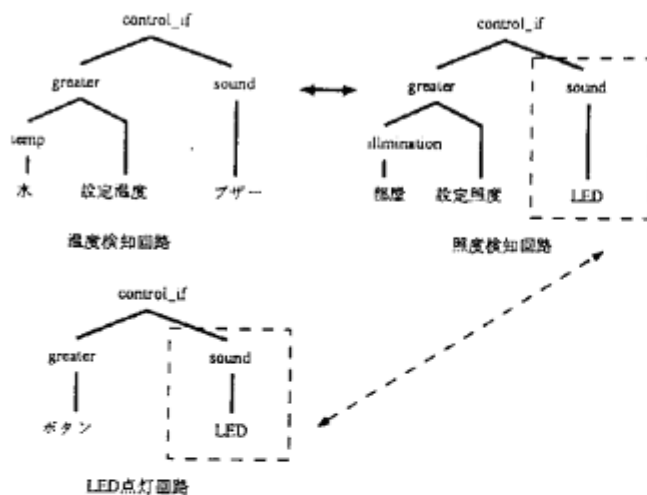


Fig.2 構造写像エンジンの利用例

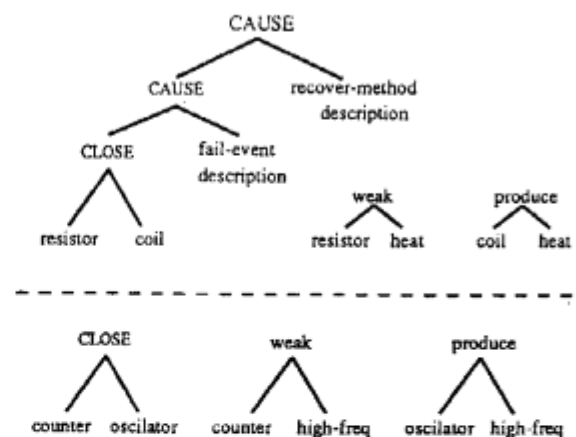


Fig.3 失敗予測・回避の表現例

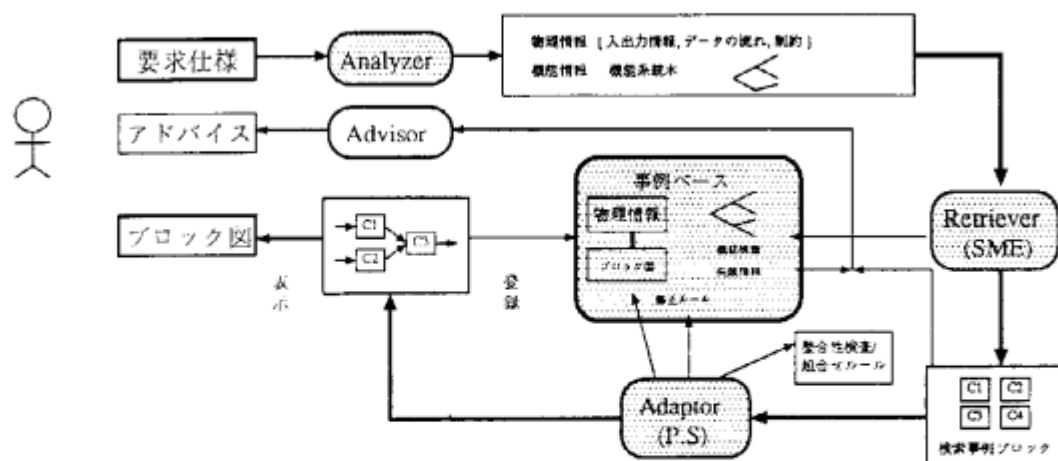


Fig.4 システム構成図

要求機能	属性名	範囲	単位	タイプ	値
時間を示す	時間	0~23	分	整数	未知

Fig.5 要求機能入力例

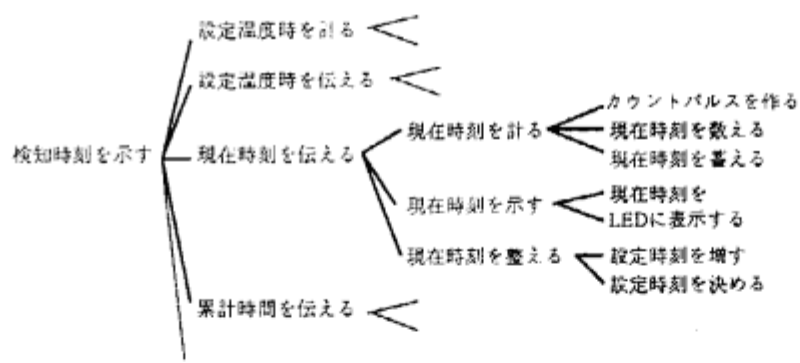


Fig.6 機能系統木

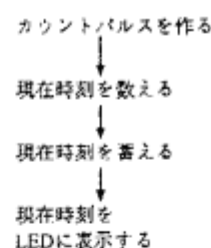


Fig.7 データの流れの例

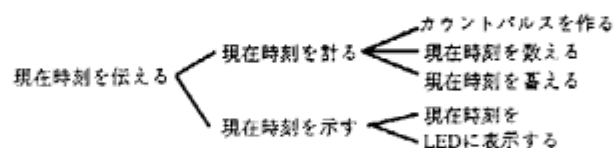


Fig.8 切り取られた部分機能系統木

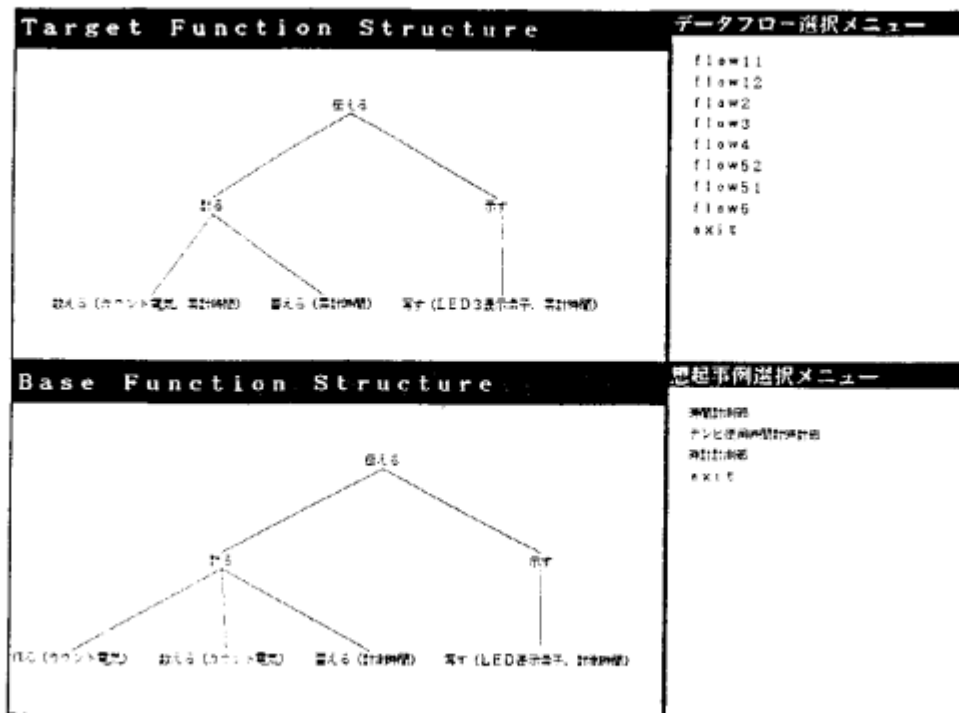


Fig.9 SMEによる検索例

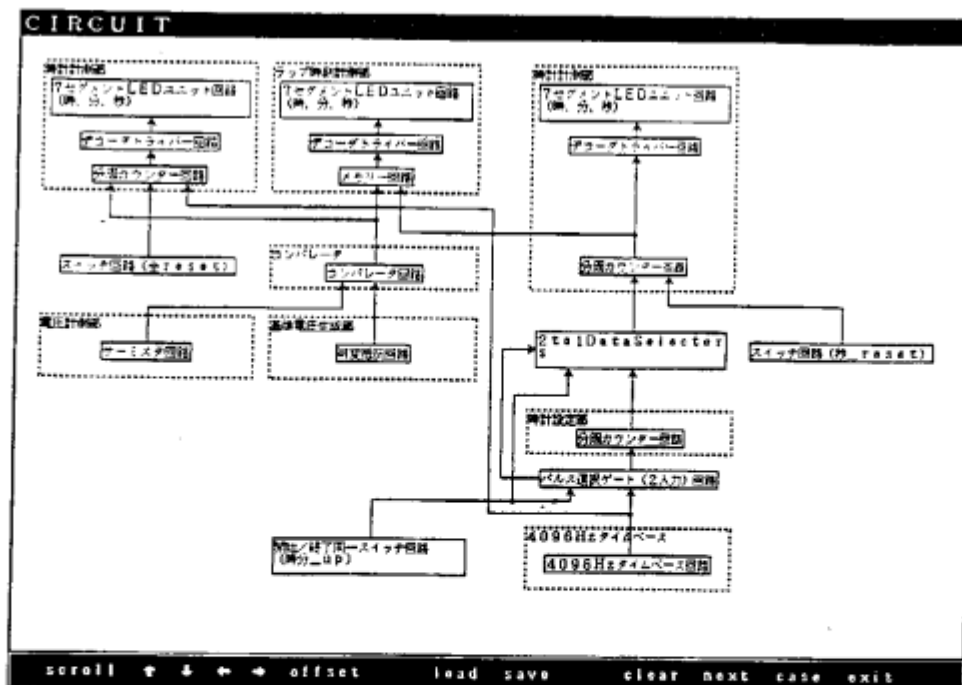


Fig.10 回路ブロック図出力例