

定性推論を利用した故障木作成方式

秋吉 政徳 西田 正吾

三菱電機（株） 中央研究所

物理システムに現われた異常兆候に対して故障原因候補を故障木の形で整理し、その後に観測事象などを用いて原因候補を絞り込むために、対象を構成する部品の動作記述を整理したモデル・ライブラリと構成部品の接続情報から作成した対象モデルによるモデルベース推論を実行する枠組みに定性推論を利用する。モデルとして対象の振る舞いを表現する定性変数ネットワークを生成し、兆候に対する変数値をこのネットワークに与えた後に変数間の制約に関する後向き／前向きの推論から対象の振る舞いを同定し、その中で正常時と異なる機器を故障原因候補として検出する。なお、状態遷移の可能性をもつ対象への推論方法についても検討を行なう。

Fault Tree Generator based on Qualitative Reasoning

Masanori Akiyoshi Shogo Nishida

Central Research Laboratory
Mitsubishi Electric Corporation
8-1-1, Tsukaguchi-Honmachi, Amagasaki, Hyogo 661, JAPAN

Human experts diagnose artifacts from observations through generating fault trees, i.e., finding possible faulty components and cause-effect relations among them. This paper presents a method of generating fault trees that uses qualitative reasoning. The method consists of two parts. One is "model generation" based on a model library that includes component models and structural data that are originally drawn on a design information. The other is "inference engine" based on constraint propagation and state transition. The result of applying this method to power equipment is also discussed.

1. はじめに

近年、物理システムの故障診断において専門家の知識を記述した知識ベースを用いる手法の問題点を克服するために、モデルに基づいた診断手法が数多く提案されている^[1~7]。観測された兆候に対して、対象に関する構造、機能、因果関係などを記述したモデルを用いて故障原因候補を導出していく枠組みは、未経験の故障に対して設計者が設計情報をもとに行なう作業の特徴を反映していると考えられる。また一方では、専門家は導出した故障原因候補を絞り込む際に、それぞれの故障原因候補の波及によって観測されるべき兆候をチェックすることによってその妥当性を調べ、最終的に設計情報から考えられる全ての故障原因候補を列挙する。このような作業も、モデル上での故障の波及シミュレーションによって計算機処理が可能となる。特に対象の規模が大きいものや振る舞いが複雑なものに対して専門家が見落とす可能性のある故障原因候補は、設計情報に基づくモデルを用いた故障診断の枠組みによるシステムティックな導出方法に期待される点である。

本報告では、この枠組みを実現するための（1）設計情報に基づくモデルの表現およびその生成、（2）観測兆候からの故障原因候補の導出、（3）故障の波及シミュレーションによる故障原因候補の絞り込みについて議論する。第一の“モデルの表現およびその生成”に関しては、構築容易性や汎用性の観点的重要性が山口等^[1,2]によって指摘されており、われわれもそのような観点に基づいてモデル・ライブラリと構造情報から動作モデルを生成する方法を述べる。第二の“観測兆候からの故障原因候補の導出”に関しては、兆候を引き起こす原因を機器ごとに順次たどっていく制約伝播の方法^[1,2,3]などが用いられているが、局所的な伝播による故障原因候補の列挙は複合故障などを解釈する際にはそれらの候補をさらに処理する必要がある^[3]。ここでは、制約伝播を大局的に処理することで対象全体の振る舞いを推論し、複合故障に対して無矛盾な解釈を行なう方法を述べる。“故障の波及シミュレーション

による故障原因候補の絞り込み”については、（2）の制約伝播の方向を逆に設定することによって容易に実現できる。次節以降で上記の3点を実現する際に、定性推論で用いられるモデルや制約伝播、状態遷移が利用できることを示す。

2. 定性推論を利用した故障木作成方式

2. 1 モデルの生成および推論方式の概要^[4]

対象に関する構造、機能、因果関係などを記述したモデルを記述する際に、構築容易性や汎用性の観点が重要と考えられる背景には、例えば変電所の保護リレーなどのように領域を限って診断システムを構築する場合にも、構成する機器の種類や接続関係などが異なるごとに対象モデルを記述することは効率が悪いという点が挙げられる。すなわち、対象領域を限ればシステムティックな構築方法が望ましい。

以上の立場に基づく故障木作成方式の概要を図1に示す。

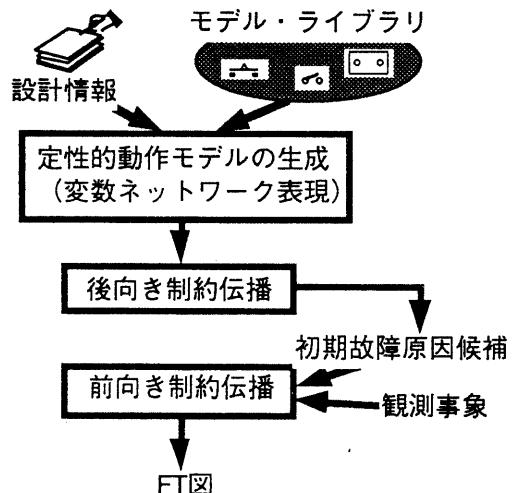


図1 故障木作成方式

一般に物理システムを構成する機器レベルにおいては機器単位に動作状態を記述することが可能であり、これらの接続によって対象全体の振る舞いが決

定されると考えると、対象のモデルを記述する際にあらかじめ整理した部品モデルと接続情報から生成する方式を用いる。機器単位の動作状態を表現するには、部品モデルごとに状態変数を準備し、それらの変数の値の組み合わせを用いることにする。このことから機器内部の変数間に成立する関係を制約としてとらえ、対象に関する因果関係の一部はこのような機器内部の制約に反映することにする。一方、機器間の因果関係に関しては、接続情報をもとに動作モデルを生成する際にどのような変数間に値が伝播するかを決める変数の属性情報（電圧や温度など対象領域により異なる）を部品モデルに記述しておき、同じ属性を持つ変数間に成立する制約に対象が正常動作時に存在する因果関係を指定する形でモデルに反映する。すなわち、対象モデルを生成する際に、機器内部に関する因果関係は部品モデルから自動的に決定されるが、機器間に関する因果関係は何らかの形で指定することになる。対象に関する機能については、兆候が機能の欠落などで観測された場合などに具体的な機器集合の状態変数の値へ対応付けて診断を行なうために必要であるが、本報告では兆候は少なくとも機器単位で与えられると仮定して取り扱うので、対象モデルには記述しない。

以上のことから、対象を構成する部品モデルとそれらの接続情報から生成した全体モデルによって対象の動作状態は表現されるが、実際には状態変数のネットワークとなっている。このときに状態変数として、連続量よりは状態の特徴を表現する定性量を用いる方が因果関係などを表現するのに自然であり、定性変数と定性的制約をネットワークのノードとアーチに対応させる。観測された兆候に対応するネットワーク上的一部の変数に値を割り当てた後に、未定の変数の値を制約を用いて求めることで動作状態が決定される。制約伝播の処理においては、兆候から原因を求める際と求めた原因から波及して観測されるべきそのほかの兆候を求める際には、伝播の方向が因果的に逆になる。以下、前者を後向き制約伝播、後者を前向き制約伝播と呼ぶ。また、実際に発

生している兆候が変数間の正常時の制約が成立しないことに起因する場合には、例えば故障モデルとして故障時の制約を導入し、その制約を用いて解釈を実行することも可能であるが、現時点では変数の値の割当に失敗する。

このような後向き制約伝播の結果から正常時の状態と異なる状態が推論された機器は、基本的には故障原因候補として挙げることになる。ただし、機器間の因果関係が制約に反映されているので、ある機器Aの正常時と異なる状態は機器Bの状態から引き起こされていることが制約伝播の処理から同定される。従って、これらの推論結果は、故障木（Fault Tree）を用いて管理することが適している。故障木のリーフに対応する機器が兆候の故障原因であると考えられ、逆にこのリーフから故障の波及シミュレーションをもとに観測されるべきそのほかの兆候を求める^[1,2]、テスト入力などによる新たな観測結果と照合することで、故障原因候補を絞り込むことが可能となる。

2. 2 状態遷移の可能性をもつ対象への定性推論の利用

一般に、観測された兆候は対象に故障が発生した後のどの時点のものであるかはわからない。ただし、故障発生後の対象の故障状態が変化しないとするならば、前節で述べた方法で処理することが可能である。われわれは、このような仮定を取り除くために状態遷移の処理を故障木作成に導入することを検討した。

兆候の観測された対象モデルに対して後向き制約伝播処理を実行すると、状態変数の値が未定となる場合には次の二つがある。

- (1) 故障が発生していて正常時の制約が成立しない場合
 - (2) 故障ではないが正常時の制約が成立しない場合
- (1)について、さきほど故障モデルの導入という考え方を示したが、本報告では取り扱わない。

(2)については、簡略化した例をもとに説明する。例えば、変電所における保護リレーの動作は、系統に発生した異常を検知して遮断器へのトリップ信号をあらかじめ組み上げられたロジックに従って出力するように設計されている。このような保護リレーは、一度トリップ信号を出力する条件が成立すると確実に信号を出力し続けるための自己保持回路と、逆にある一定時間後には遮断器を復帰させるために今まで保持されていた信号の出力をとめる復帰回路という特有の部分がある。ただし、遮断器の復帰はトリップ信号がないもとで運転員の投入指令に基づき、自動的には行われない設計になっている。このような場合、保護リレーからのトリップ信号がないにもかかわらず、遮断器は動作した状態が観測され、制約伝播処理によっても状態変数の値は未定となる。この際に、ある一定時間前の観測兆候、すなわちトリップ信号が出力され、遮断器が動作していた時間の状態を兆候として与えれば、制約伝播処理によって解釈が実行される。

以上のような場合を考慮し、兆候の観測された対象モデルに対して後向き制約伝播処理実行が失敗した場合には、兆候を示す状態変数のある定性時間前の状態を求めて、再度後向き制約伝播処理を実行する。このために状態変数の時間による遷移を求めるためにKuipersのQSIMにおける状態遷移表^[8]を利用する。この結果、方式としては故障木は図2に示すように複数作成される可能性があり、これらをどのように処理して故障原因候補を絞り込み、診断を行うかは検討中である。

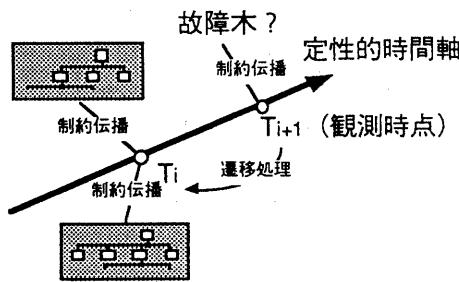


図2 状態遷移処理を組み込んだ場合

作成される故障木集合

2.3 システムの構成

図3に、本システムの構成を示す。本システムはLispとFlavorsを用いて実装しており、それぞれのモジュールは次のようになっている。

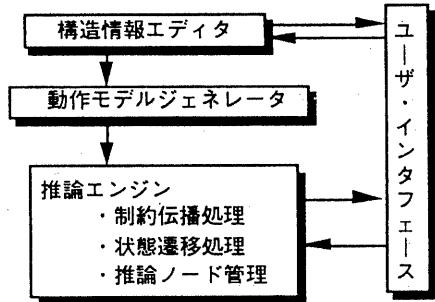


図3 システム構成

構造情報エディタは、設計情報（プラントなどでは設備系統図、保護リレーなどでは展開接続図など）に基づいて構成機器の作成、移動、接続、削除などを画面上で実行するためのものである。動作モデルジェネレータは、対象を構成している機器のモデル・ライブラリと構造情報エディタによる機器の接続状態から、実行形式のデータを自動的に作成する。推論エンジンは、制約伝播処理と状態遷移処理を用いて兆候に対応する故障原因候補を求めるとともに、それらの推論結果を故障木のノードとして管理する。ユーザ・インターフェースは、推論エンジンの実行を制御するモード設定や実行状況／結果を表示する。

3. 保護リレーへの適用

3.1 保護リレーにおける診断問題

変電所の系統設備に事故が発生した場合に、事故箇所を系統から隔離して停電範囲をできるだけ少なくするために系統設備間に遮断器が設置されている。この遮断器にトリップ信号を指令する設備として保護リレーがある。保護リレーの故障により遮断器が誤動作や不動作した場合に、故障原因候補を故障木の形で網羅し、現地ならびに工場での確認試験をへて最終的に故障原因を究明している。

3. 2 保護リレーの設計情報およびモデルの生成

保護リレーは、系統の異常を検知した情報をもとにどの遮断器をトリップさせるかを決めるようになっている。これらはいくつかの回路で構成されており、その回路図が設計情報として利用できる。図4は、ある母線保護装置の遮断器引き外し回路の例であり、機器の接続関係やその種類などの情報が示されている。

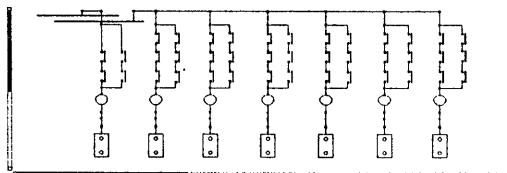


図4 展開接続図の例

このような回路図に示される機器を整理して、モデル・ライブラリとして記述した一部が表1であり、部品モデルには状態変数名とその定性変数軸とその物理属性、正常状態、故障状態、入出力ポートが記述してある。また、回路図そのものの表現のためにシートとデバイスという構造型データを準備し、モデル生成時にはこのほかに状態変数と制約を表現する構造型データともあわせて、実行形式のシートオブジェクト、機器オブジェクト、変数オブジェクト、制約オブジェクトを生成する。

表1 モデル・ライブラリの例

	変数名	変数軸	物理属性	正常状態	故障状態	入/出力ポート
リレー	入力触点子 (0+)	電流	(0 0 0)	(+ 0 +)	入力触点子	
	リレー接点 (0+)	位置	(0 + 0)	(+ 0 0)		出力触点子
	出力触点子 (0+)	電流	(+ + +)	(+ + +)		
端子	入力触点子 (0+)	電流	(0 0)	(+ 0)	入力触点子	
	出力触点子 (0+)	電流	(+ +)	(+ +)	出力触点子	

図5に、モデル生成の実行手順を示す。機器間の因果関係を記述する制約オブジェクト内部では、正常動作時の信号の流れから入力側の機器に属する状態変数がCauseスロットに、出力側の機器に属する状態変数がEffectスロットに格納されるようになっており、特にユーザが指定する必要はない。なお、

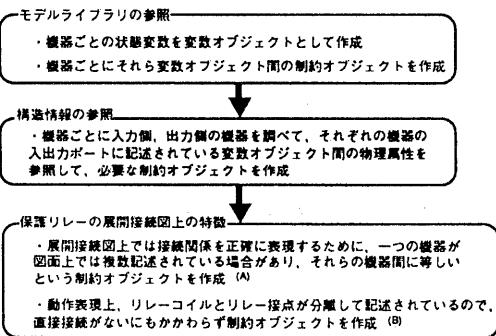


図5 モデル生成の手順

シート上で直接の接続関係がないにもかかわらず制約シーケンスを表現した部分があるために、対象に特有な部分として(A)と(B)の部分が付加されている。

3. 3 制約伝播による故障木の導出

兆候の与えられた機器からその原因となる機器の状態を求める際に、状態変数ネットワークを用いて制約伝播を後向き (Effectスロット側からCauseスロット側へ) に実行する。この際に、保護リレー特有の前処理として兆候の与えられた機器への信号経路を検出し、それに基づいて状態変数ネットワークの必要な部分にだけ制約伝播処理を実行する。具体的には、以下に示す手順で制約伝播処理をおよび故障原因候補の検出を実行する。なお、後向き制約伝播処理と前向き制約伝播処理は、基本的な部分は同じであるので (実際S/Wモジュールは共通) , [] 内に前向き制約伝播処理の場合を示す。

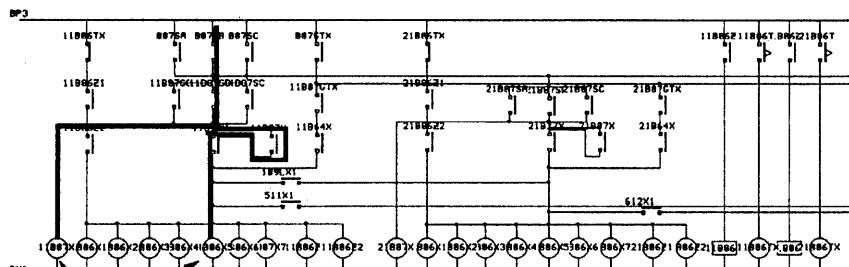
- (1) 兆候の与えられた機器へ [から] のシート上の信号経路の検出
- (2) 求めた信号経路の組合せから制約伝播を実行すべき機器を抽出し、それらの機器に関与する変数オブジェクト、制約オブジェクトとともに処理を行い、値を割り当てる。
- (3) 信号経路のそれぞれの組合せに対して、機器ごとに記述されている正常状態及び故障状態をもとに故障候補 [動作チェック候補] を検出後、全ての機器が正常動作したという仮定

のもとにさらなる原因 [影響] を調べるべき機器を選択して、(1) に戻る。このときに調べるべき機器は基本的に別のシートに記述されているので、直接的因果関係を示す制約はあらかじめモデル生成の段階で作成されてなく、保護リレーの構成機器に関する知識から検索ルールを記述してある。

図6に、(1)、(2)、(3) の実行過程を画面上でモニタした例を示す。このような処理からえられた推論結果から最終的には図7に示すものが出

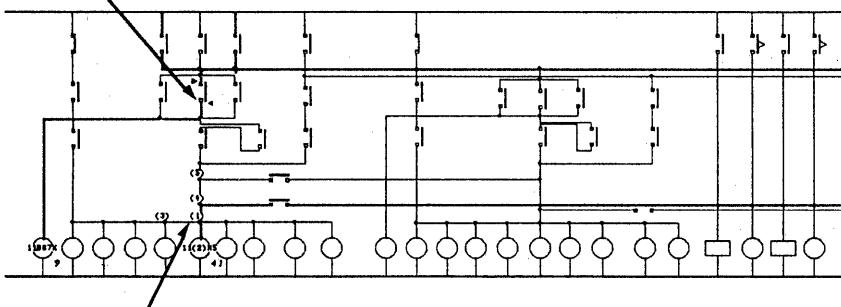
力される。図7に示すのは、ある遮断器がトリップしたという初期兆候から、そのトリップ信号のシーケンス回路に関して故障木を導出した結果である。ただし、推論結果を機器間の因果関係のまま表示すると繁雑になりすぎるので、推論結果をシートごとにまとめて故障木のノードとして表示してあり、必要な情報は図6で用いた展開接続図の画面上で表示したり、例えば図8に示すような形で取り出したりして、確認作業などの支援に用いるようにする。

(1) 信号経路の探索



兆候の与えられた機器
現在処理中の制約

(2) 制約伝播による状態推定



機器の状態が同定されたもの

(3) 故障候補の検出

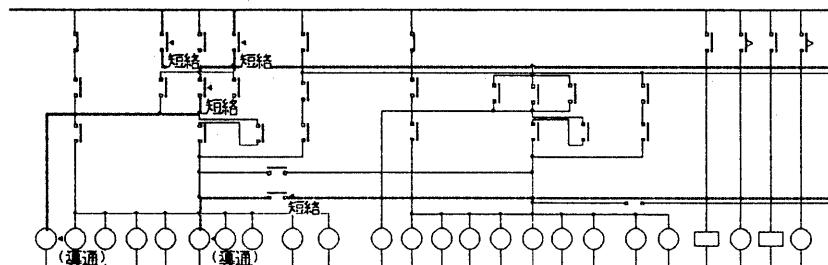


図6 制約伝播の処理状況

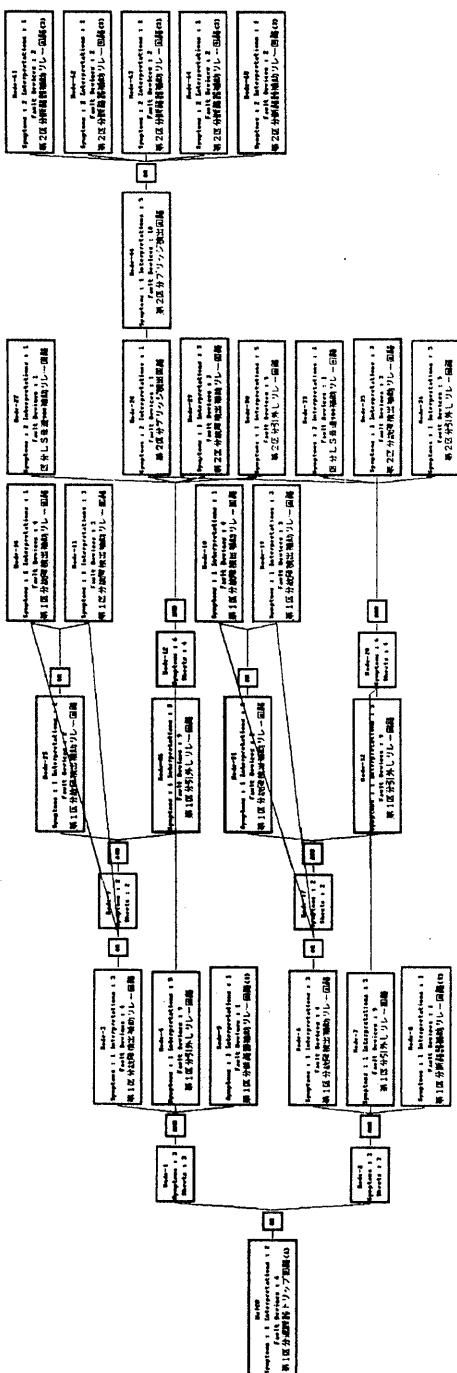


図 7 作成された故障木の例

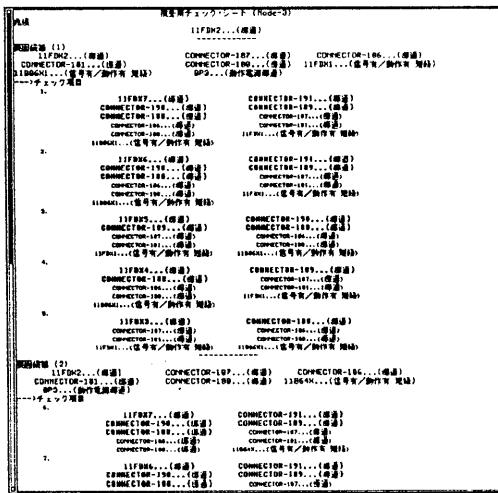


図 8 検査支援用インターフェースの例

3. 4 適用例における課題

図 7 に示す故障木の OR による分枝の数は、現時点では保護リレー特有の前処理の結果に依存している。すなわち、兆候の与えられた機器への信号経路を検出し、その信号経路の組合せに関する機器に対して推論を実行しているので、本来故障木作成には全ての信号経路の組合せを実行する必要がある。しかし、規模が大きくなると組合せの爆発を起こるので、現時点では組合せの数を制限している。これらの制限は現実問題に対応する上では必要不可欠であるが、制限の方法は検討しなければならないと考える。

4. おわりに

観測された兆候に対する故障診断を行うために、対象を構成する機器の接続情報とモデル・ライブラリに基づいて定性的動作モデルを作成し、制約伝播処理や状態遷移処理を利用して故障原因候補を導出し、それらを故障木の形で管理する方法について述べた。適用例を通してその動作を確認し、結果としてえられた故障木によってテスト入力などの確認試験の作業における支援の可能性を示した。今後、制約伝播処理において故障が発生していて正常時の制

約が成立しない場合に、故障モデルをどのように導入していくかを検討していく予定である。

参考文献

- [1] 山口, 溝口他 : 深い知識に基づく知識コンパイラの基本設計, 人工知能学会誌, Vol. 2, No.3, pp. 333-340 (1987)
- [2] 山口, 溝口他 : 対象モデルと故障モデルに基づく知識コンパイラ II の構築と評価, 人工知能学会誌, Vol. 7, No.4, pp. 663-674 (1992)
- [3] 岩政, 鈴木, 持地 : 深い知識に基づく制御用エキスパートシステム - 定性的因果モデルとクラスタリングによる診断機構の開発 -, 計測自動制御学会, 第 13 回知能システムシンポジウム, pp. 1-7 (1991)
- [4] 秋吉, 西田 : 定性推論に基づく故障木作成方式 - 構造情報と部品動作記述から導いた定性モデルの利用 , 情報処理学会, 第 45 回全国大会, Vol. 2, pp. 111-112 (1992)
- [5] de Kleer, J. : Reasoning about Multiple Faults, Proc. of AAAI-86, pp. 132-139 (1986)
- [6] de Kleer, J. and Williams, B. C. : Diagnosis with Behavioral Modes, Proc. of IJCAI-89, pp. 1324-1330 (1989)
- [7] Struss, P. and Dressler, O. : Physical Negation - Integrating Fault Models into the General Diagnostic Engine, Proc. of IJCAI-89, pp. 1318-1323 (1989)
- [8] Kuipers, B. J. : Qualitative Simulation, Artif. Intell., Vol. 29, No. 3, pp. 289-338 (1986)