

# MGTP を用いた故障診断手法の効率化

## Increase in efficiency of the fault diagnostic based on MGTP

尾崎 知伸\*<sup>1</sup> 江口 律子\*<sup>1</sup> 古川 康一\*<sup>1</sup> 筒井 良夫\*<sup>2</sup> 五十嵐 創\*<sup>1</sup> 玉川 直世\*<sup>1</sup>  
 Tomonobu Ozaki Ritsuko Eguchi Koichi Furukawa Yoshio Tsutsui So Igarashi Naoyo Tamagawa

\*<sup>1</sup>慶應義塾大学 大学院 政策・メディア研究科  
 Graduate School of Media and Governance, Keio University

\*<sup>2</sup>宇宙開発事業団  
 National Space Development Agency of Japan

Although the computation mechanism of abductive inference based on the model generation theorem prover MGTP has very high flexibility, it requires enormous computation time and large memory space in some cases. This paper proposes methods for improving its efficiency in applying it to the fault diagnosis.

### 1. はじめに

論理に基づく故障診断手法の一つにアブダクションに基づく診断 (abductive diagnosis) [5, 6] があげられる。この診断手法は、アブダクションによる仮説生成の枠組みを直接故障診断へと適用したものであり、以下のように形式化できる。すなわち、診断対象のモデル (と入力パラメタ)  $SD$ , 観測値  $OUT$ , 及び対象に含まれるすべての部品のすべての状態の集合  $COMPS$  を入力として受け取り、2つの条件  $SD \cup \Delta \models OUT$ ,  $SD \cup \Delta \not\models \square$  を満たす仮説  $\Delta \subseteq COMPS$  を発見する。一方これまでに、一階述語論理に基づくモデル生成型定理証明器 MGTP [1, 2] を用いたアブダクション計算の枠組みが提案され [3], それに基づき汎用的なアブダクションシステムが開発されている [4]。

MGTP によるアブダクションは、非常に汎用性の高い枠組みであるが、その一方でモデル候補数の爆発が起こるという問題を抱えている。本論文ではこの問題に対し、特に故障診断への応用に特化した、モデル候補数の爆発を軽減するための効率化手法を提案する。

### 2. 診断対象のモデル化

診断対象は、対象に含まれる各部品の挙動 (ある状態下での部品への入力とその出力の関係)、及び部品間の連結関係に基づきモデル化される。本論文で採用したモデルの形式 (スキーマ) を図 1 に示す。ここで  $in(A, M, V_M)$  は部品  $A$  の  $M$  番目の入力値が  $V_M$  であること、 $out(A, N, V_N)$  は部品  $A$  の  $N$  番目の出力値が  $V_N$  であることをそれぞれ表す。 $normal(A)$  は部品  $A$  が正常な状態であることを表し、 $mode(A, STATE)$  は部品  $A$  が故障状態  $STATE$  であることを表す。 $TYPE(A)$  は部品  $A$  の種別が  $TYPE$  であることを表し、 $beh_{TYPE}(STATE, I_1, \dots, I_M, O_1, \dots, O_N)$  は状態  $STATE$  における部品の入力と出力の関係を表す。また述語  $beh_{TYPE}$  は別途ファクトまたはルールの形式で与えられる。

### 3. MGTP に基づくアブダクション

MGTP を用いたアブダクションは、(1) アブダクティブ論理プログラムを (アブダクションを伴わない) 論理プログラムに変換する、(2) MGTP を用いて、変換済みの節を対象にそのモデルを求める、(3) T-条件 (後述) を満たさないモデルを排除

---

```

out(A,1,O1), ..., out(A,N,ON) ← %正常時
TYPE(A), normal(A), in(A,1,I1), ..., in(A,M,IM),
behTYPE(normal, I1, ..., IM, O1, ..., ON). ... (i)
out(A,1,O1), ..., out(A,N,ON) ← %異常状態 STATE 時
TYPE(A), mode(A,STATE), in(A,1,I1), ..., in(A,M,IM),
behTYPE(STATE, I1, ..., IM, O1, ..., ON). ... (ii)
in(A,V) ← out(B,V). %連結関係
  
```

---

図 1: 対象のモデル化の形式

し、残ったモデルのうち、極小のものだけを出力する、という操作を通じて達成される\*<sup>1</sup>。(1)の変換は、与えられたプログラム中の各論理式に対して行われる。直感的には、仮定可能リテラル (部品の状態) を仮定する / しないの 2つの場合分けを行う節に変換される (詳細は [3, 4] 参照)。この変換により、図 1 中の (i), (ii) はそれぞれ以下の節に変換される。

---

```

(out(A,1,O1), ..., out(A,N,ON), normal(A)) ∨
-Knormal(A) ← TYPE(A), in(A,1,I1), ..., in(A,M,IM),
behTYPE(normal, I1, ..., IM, O1, ..., ON).
(out(A,1,O1), ..., out(A,N,ON), mode(A,STATE)) ∨
-Kmode(A,STATE) ← TYPE(A), in(A,1,I1), ...,
in(A,M,IM), behTYPE(STATE, I1, ..., IM, O1, ..., ON).
  
```

---

また (1) の変換において、観測  $OUT = out_1 \wedge \dots \wedge out_n$  は、 $obs \leftarrow out_1 \wedge \dots \wedge out_n$ .  $Kobs \leftarrow$ .

の 2 節に変換される。これらの変換における  $KL$ ,  $-KL$  は、それぞれ  $L$  が仮定されている / いないことを意味する。

(3) の T-条件は、(2) で計算されるモデル  $M$  に対し、 $\forall L (KL \in M \rightarrow L \in M)$ 、すなわち、仮定されたりテラル  $L$  が実際にモデルに含まれることを要求する条件である。

### 4. 故障診断のための高速化手法

#### 4.1 部品の状態の排他性の利用

従来の変換方式では、各節の頭部で 2つの場合分けが行われているので、状態を  $N$  個持つ部品に対して、 $O(2^N)$  で組み合わせが考慮されることになる。一方、部品の状態には排他性が成り立つので、それを考慮し、以下のような制約節を追加することも考えられる。

連絡先: 尾崎知伸 (email: tozaki@sfc.keio.ac.jp), 慶應義塾大学 大学院 政策・メディア研究科, 〒252-0816 藤沢市遠藤 5322, Tel:0466-47-5000 ext.53231, Fax:0466-47-5350

\*<sup>1</sup> MGTP によるアブダクションは、極小仮説の生成に対しては完全であるが、非極小な仮説の生成に関しては完全ではない。

$\leftarrow \text{mode}(A,X), \text{normal}(A).$   
 $\leftarrow \text{mode}(A,X), \text{mode}(A,Y), \{X \setminus = Y\}.$

この場合、ある状態が既にモデルに含まれており、そのモデルに別に状態が追加された時にはじめてモデルが棄却されることになるので、 $O(N^2)$  で組み合わせが考慮されることになる。またいずれの場合も、部品の状態をまったく含まない ( $-KL$ しか含まない) モデルも考慮されることになる。これらのモデルは、部品の出力を計算していないので、 $T$ -条件を満たさず後処理として破棄されることから冗長であると言える。

これらの問題に対し、本論文では、部品の状態の排他性をより積極的に利用した新たな変換方式を提案する。提案する変換方式は、各節に対する変換は行わず、部品の状態を排他的に仮定する新たなルールを導入するというものである。具体的には、

$\text{out}(A,1,O_1), \dots, \text{out}(A,N,O_N) \leftarrow$   
 $\text{TYPE}(A), \text{normal}(A), \text{in}(A,1,I_1), \dots, \text{in}(A,M,I_M),$   
 $\text{beh}_{\text{TYPE}}(\text{normal}, I_1, \dots, I_M, O_1, \dots, O_N).$   
 $\text{out}(A,1,O_1), \dots, \text{out}(A,N,O_N) \leftarrow$   
 $\text{TYPE}(A), \text{mode}(A, \text{state}_1), \text{in}(A,1,I_1), \dots, \text{in}(A,M,I_M),$   
 $\text{beh}_{\text{TYPE}}(\text{state}_1, I_1, \dots, I_M, O_1, \dots, O_N).$   
 $\vdots$   
 $\text{out}(A,1,O_1), \dots, \text{out}(A,N,O_N) \leftarrow$   
 $\text{TYPE}(A), \text{mode}(A, \text{state}_x), \text{in}(A,1,I_1), \dots, \text{in}(A,M,I_M),$   
 $\text{beh}_{\text{TYPE}}(\text{state}_x, I_1, \dots, I_M, O_1, \dots, O_N).$

の形式で与えられる  $x+1$  個の状態を持つ部品の挙動を表す節の集合に対し、

$\text{normal}(A) \vee \text{mode}(A, \text{state}_1) \vee \dots \vee \text{mode}(A, \text{state}_x) \leftarrow$   
 $\text{TYPE}(A), \text{in}(A,1,I_1), \dots, \text{in}(A,M,I_M).$

を追加する。すなわち、ある部品に対する入力がある時点で、その部品の状態を排他的に仮定している (排他性は、極小モデル生成及び MGTP の動作原理の観点から達成される)。この変換により  $N$  個の状態を持つ部品に対して、ちょうど  $N$  の可能性が考慮されることになる。

#### 4.2 正常時の挙動を利用した探索空間の縮小

ある部品では、入力によっては、その部品が正常状態と仮定した場合と、ある異常状態であると仮定した場合とで、その挙動がまったく同一になる場合がある。この場合でも、MGTP は両者の可能性を検討するために分岐を行う。すなわち、ある一つの部品の状態が正常/異常と異なるだけで、その他はまったく同じ 2 つのモデル (候補) が考慮されることになる。しかし仮説の極小性の観点から言えば、後者は前者を包含するので冗長であると言える。

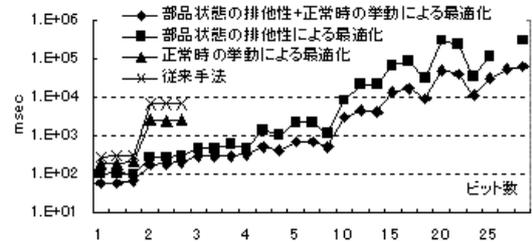
この問題に対し、本論文では、正常時の挙動を利用し、非極小仮説の生成を抑制する手法を提案する。提案手法は、ある異常時の部品の挙動が正常時とまったく同じである場合に、異常時のモデルを棄却するためのルールを導入するというものである。具体的には、図 1 中 (2) の形式で与えられる異常時の挙動を表す各節に対し、以下の形式の制約を導入する。

$\leftarrow \text{mode}(A, \text{STATE}), \text{in}(A,1,I_1), \dots, \text{in}(A,M,I_M),$   
 $\text{beh}_{\text{TYPE}}(\text{normal}, I_1, \dots, I_M, O_1, \dots, O_N),$   
 $\text{out}(A,1,O_1), \dots, \text{out}(A,N,O_N).$

### 5. 比較実験

提案手法の有効性を示すために、 $N = \{1 \sim 5, 10, 15, 20, 25\}$  ビットの全加算器 (各 3 題) を用いた比較実験を行った。各ビットの全加算器は、4 つの AND ゲート、3 つの OR ゲート、2 つの

NOT ゲートからなり、AND ゲート、OR ゲートに対しては、常に 0 に縮退、常に 1 に縮退の 2 つの故障状態を、NOT ゲートに対しては、常に 0 に縮退、常に 1 に縮退、入力値をそのまま出力の 3 つの故障状態をそれぞれ想定した。また考慮する最大故障数は 2 とした。実験は、PC(OS:WindowsXP, CPU:1.2GHz, メモリ:512MB) 上でを行い、MGTP は Java 版 MM-MGTP(MCHK 版)[2] を利用している。以下に実験結果を示す



実験結果から、部品状態の排他性を利用した最適化を行わないと、比較的小さな問題 (3 ビット=部品数 27) に対してもメモリオーバーフローを起こして解が得られないことが分かる。また、部品状態の排他性+正常時の挙動を用いた最適化の組み合わせが、最も効率が良いことが確認できる。

### 6. まとめと今後の課題

本論文では、MGTP を用いたアブダクションに基づく不具合診断手法に対し、(1) 部品の状態の排他性、(2) 正常時の挙動、を利用した効率化手法を提案し、実験によりその有用性を確認した。また今後の課題として、より効率的な極小説明の生成手法の開発などがあげられる。

謝辞 本研究は、平成 14 年度宇宙開発事業団委託研究「アクティブマイニングによる閉ループ不具合診断手法の研究」のもとで実施されたものである。

### 参考文献

- [1] 長谷川 隆三, 藤田 博, 越村三幸: Java によるモデル生成型定理証明系 MGTP の開発, 情報処理学会論文誌, Vol.41, No.6, pp.1791-1798, 2000.
- [2] 長谷川隆三, 藤田博, 越村三幸: 分岐補題の抽出による極小モデル生成の効率化, 人工知能学会誌, Vol.16, No.2, pp.234-245, 2001.
- [3] Inoue, K. and Sakama, C.: A Fixpoint Characterization of Abductive Logic Programs, *Journal of Logic Programming*, Vol.27, No.2, pp.107-136, 1996.
- [4] 井上克巳, 壺内敬吾, 山本友和: 高度問題系のための推論プログラムの開発-アブダクティブ論理プログラミング処理系の開発-平成 7 年度 AITEC 委託研究成果報告書, 1996.
- [5] Poole, D.: Normality and faults in logic-based diagnosis, *Proceedings of the 11th Joint International Conference on Artificial intelligence (IJCAI89)*, pp.1304-1310, 1989.
- [6] Preist, C., Eshghi, K. and Bertolino, B.: Consistency-based and abductive diagnoses as generalised stable models, *Annals of Mathematics and Artificial Intelligence*, Vol.11, pp.51-74, 1994.