

## 学位論文題名

## 自動推論を用いた論理回路故障診断システムの開発研究

## 学位論文内容の要旨

近年の急速な電子技術の発展はシステムをますます大規模・複雑化してきている。また巨大化したいくつかのシステムが互いに密に結合されている場合もある。このような状況では、システムに異常や故障が発生したときの社会的影響は非常に深刻で、その正確で高速な予測、検知、診断のための理論や応用技術の開発が急務となってきた。

本論文は、診断対象が内包する論理にのみ着目して故障素子を推論する方式(深いモデルによる推論)に基づいた論理回路故障診断システムについて述べたものである。この方式は、経験的知識や統計的データを必要とせず論理的に健全な診断が得られるという利点がある半面、高度な自動推論システムを必要とするため一般に診断の計算効率が良くないという問題点がある。本システムではこの問題点を種々の観点から解決し、それを実現している。このシステムを本論文では DiaLog と呼ぶ。DiaLog の主要部分は診断系と推論系とから成っている。その概要を以下に示す。

DiaLog の診断系は、基本的には、1987年に Reiter が提案した故障診断の一般理論をアルゴリズムとして実現したものであるが、さらにパッケージ・レベル診断が行なえるようにアルゴリズムを拡張してある。パッケージは回路素子の集合である。実際の回路素子はパッケージ単位で生産・販売・保守されるので、故障診断においては、異常素子を特定できなくても、異常パッケージが特定できれば十分なことが多い。パッケージ・レベル診断はこのことに着目して、診断アルゴリズムの無駄な探索空間を除去し、診断時間の減少に寄与している。

推論系は論理回路に関する一般知識、診断対象である特定の論理回路の構成に関する知識、および診断系から与えられる仮説との間の矛盾を検出するためのアルゴリズムを実現したものである。

DiaLog の推論系は、これまで開発してきた一階述語論理に基づく汎用自動推論システム(定理証明器) Thinker を基に、論理回路故障診断向きに、その推論動作をチューニングし推論効率を大幅に向上させたものである。例えば、組合せ回路や順序回路の知識表現、推論規則および制御戦略が、実験に基づいて適切に設計あるいは選択されている。その結果、これらの工夫のない場合の自動推論システムの動作に比べて、本システムの推論系では無駄な推論が減少し、推論時間の減少に寄与している。

DiaLog の推論系は一階述語論理による自動推論をベースにしているが、必要ならば論理回路を構成する素子の特性に応じて特殊化した推論系を組み込むことができる。これにより2値論理回路に限らず今後新たに開発される論理素子に対する故障診断に対しても DiaLog の基本的構成を変更することなく推論部を拡張することで対応できる。本研究ではこの例としてファジィ論理回路の故障を診断する推論系を構成した。この特殊化した推論系は、ファジィ論理回路向きに効率化した制約伝播方式に基づいた推論アルゴリズムを用いている。このアルゴリズムは、ファジィ論理回路の知識を方程式-不等式系で表現し、局所制約伝播と端点値探索という手法を組み合わせる推論を行なう。その結果、一階述語論理に基づく推論システムと比べて、やや柔軟性が失われる代償として、診断時間の大幅な減少が得られる。実際にはこのアルゴリズムは、最大、最小、補数の各演算ゲートからなるファジィ論理回路向きに設計されているが、その特殊な場合として、2値論理回路にも効率を落とすことなく対処できる。

以後本論文では、便宜上、2値論理回路に対する診断診断システムを Dialog-I と呼ぶ。同様に、ファジィ論理回路に対する診断システムを Dialog-II と呼ぶ。

第1章では、論理回路の診断技術の大きな二つの方式、すなわちシミュレーションと推論による方式を示し各方式の利点と問題点を簡単にまとめている。次に本研究の目的と概要を述べている。

第2章では、Dialog の基本的な診断系を構成する Reiter の故障診断理論を簡潔にまとめて紹介している。診断を数学的に厳密に定義し、それを求めるアルゴリズムを解説している。また、Greiner によって改訂されたアルゴリズムについても解説している。

第3章では、Dialog-I の推論系の基になっている Thinker の概略を解説している。このシステムが扱うことのできる知識表現の形式、各種の推論規則、推論の制御戦略などが示されている。

第4章は、Dialog-I の構成と診断について述べている。まず、Thinker のチューニング方法を述べ、ついで、組合せ論理回路のための述語論理による知識表現を説明し、適切な推論規則と制御戦略を決定している。その後 Dialog-I の構成を示し、実験例として全加算器の故障診断を取り上げ、多重故障の診断結果、および観測データの一部欠損など、診断のための環境が悪化した状況での診断結果を示している。

第5章では、Reiter の診断理論において表われる診断単位を拡張したパッケージの概念を提案している。具体的には、Dialog の診断系を構成するパッケージ・レベル診断の理論とアルゴリズムを示している。このアルゴリズムによりこれまで述語論理ベースでは扱われることのなかったような規模の論理回路に対する診断も可能としている。この例として順序素子を含む自動販売機制御部に対する故障診断を示している。

第6章では、特殊化された推論系をもつ Dialog-II によるファジィ論理回路の診断について述べている。まず、ファジィ論理回路の構造および観測される入出力値が方程式、不等式の集合で表現できることを示し、次に、この集合の上での矛盾を検出するために推論系が用いる推論規則を定義している。この推論は、制御機構に局所制約伝播を用いて効率良く実現されている。しかし、この推論のみでは矛盾の検出に不完全な場合があるため、端点値探索法と呼ぶアルゴリズムを提案し、局所制約伝播と組み合わせて全体として完全な診断を求める方法について述べている。

第7章は、本研究の全体的なまとめと今後の研究課題について論じている。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	大内	東
副査	教授	新保	勝
副査	教授	青木	由直
副査	教授	嘉数	侑昇
副査	助教授	栗原	正仁

## 学位論文題名

### 自動推論を用いた論理回路故障診断システムの開発研究

近年の急速な電子技術の発展はシステムをますます大規模・複雑化してきている。また巨大化したいくつものシステムが互いに密に結合されている場合もある。このような状況では、システムに異常や故障が発生したときの社会的影響は非常に深刻で、その正確で高速な予測、検知、診断のための理論や応用技術の研究が近年盛んに行われている。

本論文は、診断対象が内包する論理にのみ着目して故障素子を推論する方式（深いモデルによる推論）に基づく効率的な論理回路故障診断システムの開発を目的に研究したものである。

この方式は、経験的知識や統計的データを必要とせず論理的に健全な診断が得られるという利点がある半面、高度な自動推論システムを必要とするため、一般に診断の計算効率が悪くないという問題点がある。本システムではこの問題点を種々の観点から解決し、それを実現している。このシステムを本論文では DiaLog と呼んでいる。DiaLog の主要部分は診断系と推論系とから成っている。

DiaLog の診断系は、基本的には、1987 年に Reiter が提案した故障診断の一般理論をアルゴリズムとして実現したものであるが、さらにパッケージ・レベル診断が行なえるようにアルゴリズムを拡張してある。パッケージは回路素子の集合である。実際の回路素子はパッケージ単位で生産・販売・保守されるので、故障診断においては、異常素子を特定できなくても、異常パッケージが特定できれば十分なことが多い。パッケージ・レベル診断はこのことに着目して、診断アルゴリズムの無駄な探索空間を除去し、診断時間の減少に寄与している。

推論系は論理回路に関する一般知識、診断対象である特定の論理回路の構成に関する知識、および診断系から与えられる仮説との間の矛盾を検出するためのアルゴリズムを実現したものである。DiaLog の推論系は、これまで開発してきた一階述語論理に基づく汎用自動推論システム（定理証明器）Thinker を基に、論理回路故障診断向きに、その推論動作

をチューニングし推論効率を大幅に向上させたものである。例えば、組合せ回路や順序回路の知識表現、推論規則および制御戦略が、実験に基づいて適切に設計あるいは選択されている。その結果、これらの工夫のない場合の自動推論システムの動作に比べて、本システムの推論系では無駄な推論が減少し、推論時間の減少に寄与している。また、DiaLogの推論系は一階述語論理による自動推論をベースにしているが、必要ならば論理回路を構成する素子の特性に応じて特殊化した推論系を組み込むことができる。これにより2値論理回路に限らず今後新たに開発される論理素子に対する故障診断に対してもDiaLogの基本的構成を変更することなく推論部を拡張することで対応できる。本研究ではこの例としてファジィ論理回路の故障を診断する推論系を構成している。この特殊化した推論系は、ファジィ論理回路向きに効率化した制約伝播方式に基づいた推論アルゴリズムを用いている。このアルゴリズムは、ファジィ論理回路の知識を方程式-不等式系で表現し、局所制約伝播と端点値探索という手法を組み合わせる推論を行なう。その結果、一階述語論理に基づく推論システムと比べて、やや柔軟性が失われる代償として、診断時間の大幅な減少が得られている。実際にはこのアルゴリズムは、最大、最小、補数の各演算ゲートからなるファジィ論理回路向きに設計されているが、その特殊な場合として、2値論理回路にも効率を落とすことなく対処できる。

これを要するに、著者は、論理をベースとした知識工学の手法により、これまで試みられていない故障診断システムを開発したものであり、今後の診断システム作成上有益な知見が得られており、知識工学の進歩に貢献するところ大なるものがある。

よって著者は、北海道大学博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。