

《様式B》

研究テーマ	「制約論理プログラミングと組合せテスト技術による不具合原因の特定に関する研究開発」		
研究責任者	所属機関名	岐阜大学	
	官職又は役職	准教授	
	氏名	盧 暁南	メールアドレス lu.xiaonan.b3@f.gifu-u.ac.jp
共同研究者	所属機関名	該当なし	
	官職又は役職		
	氏名		

(令和6年度募集) 第37回 助成研究 完了報告書

1. 実施内容および成果ならびに今後予想される効果の概要 (1,000 字程度)

本研究では、ソフトウェアシステム、組込みシステム、情報通信システムなどにおいて、複数の設定項目の組合せに起因する不具合を効率的に検出し、その原因となる相互作用を特定するための数理モデルと計算手法を研究した。主な内容は、(1) SAT (命題論理式の充足可能性問題) 型 CSP (制約充足問題) および COP (制約最適化問題) ソルバーによる障害相互作用 (FCI; 不具合原因となるパラメータ値の最小の組) の特定、(2) 準ランダム性を用いた組合せテスト生成、(3) ASP (解集合プログラミング) を用いたカバリングアレイ (少数パラメータの値の組合せを網羅するテストスイート) 生成である。

FCI 特定については、テストケースと正常/障害の結果から、テスト結果と整合し、最小性を考慮した原因候補を求める枠組みを構築した。性能評価では、必要テスト数、FCI 特定成功率、実行時間を指標として、提案手法の基本的な挙動を確認した。準ランダムテスト生成については、候補テストケースをランダム性を保ちながら生成し、相互作用の結合行列 (テストケースと相互作用の対応を表す 0-1 行列) 上で、被覆性と FCI 特定能力を反映した基準により選択する手法を整理した。シミュレーションにより、通常のランダム生成より高い FCI 特定成功率が得られる場合があることを確認し、英文論文として取りまとめている。また、ASP によるカバリングアレイ生成では、重複探索の削減や行数緩和により、現実的な計算時間内で良質なテストスイートを得られる可能性を確認した。

本助成により、研究成果の発信および関連分野の研究者との意見交換を行い、組合せテスト技術の応用可能性や今後の性能改善に関する有益な示唆を得た。本研究成果は、ソフトウェア品質保証、組込みシステムの検証、情報通信・ネットワークシステムの試験設計などへの応用が期待される。現時点では特許出願の予定はないが、システムの制約条件に応じて柔軟に調整可能なテスト生成・不具合原因検出技術として、産業技術への社会実装へ発展する可能性がある。

2. 実施内容および成果の説明（A4で、5ページ以内）

(1) 研究の目的と背景

本研究の目的は、SAT（命題論理式の充足可能性問題）、CSP（制約充足問題）、COP（制約最適化問題）、ASP（解集合プログラミング）などの制約ソルバー技術を用いて、組合せテストにおけるテストケース生成と不具合原因検出を統合的に扱う方法を確立することである。組合せテストとは、システムを構成する複数のパラメータとその値の組合せを効率よくテストすることで、少数のテストケースから高い不具合検出能力を得るための手法である。実際のソフトウェア、組込みシステム、情報通信システムでは、単一の設定値ではなく、複数の設定値の組合せによって不具合が顕在化する場合が多い。そのため、全組合せを網羅的に調べることは現実的でなく、限られたテスト数のもとで、どの相互作用を被覆し、どの程度原因を特定できるかが重要となる。

本研究では、申請時の計画に基づき、(A) 組合せテストによるテストケースの生成、(B) 不具合の発見とその原因の検出、の二つを連動させる枠組みを中心に検討した。特に、組合せテストの数理構造をカバリングアレイ、ロケーティングアレイ、ディテクティングアレイなどの組合せ構造として整理し、それをSAT型CSP、制約最適化、ASPにより扱うことで、単なる理論的構成にとどまらず、実際の問題設定に応じた柔軟な生成・検出手法を目指した。

(2) SAT型CSPおよびCOPソルバーを用いた障害相互作用の特定

本研究の中心的成果の一つは、組合せテストの実行結果から障害相互作用（Faulty Combinatorial Interaction, FCI；不具合原因となるパラメータ値の最小の組）を特定する問題を、SAT型CSPおよびCOPとして定式化したことである。ここでFCIとは、特定のパラメータ値の組であって、その組をすべて含むテストが障害となり、かつこれ以上パラメータを削ると障害でなくなるような最小の組を指す。例えば、デバイス、ブラウザ、接続方法、セキュリティ設定などの複数の要因を持つシステムでは、「スマートフォン」と「特定のブラウザ」の組合せが原因となって障害が発生する、というような状況が想定される。このような最小FCIを検出できれば、全組合せを試験しなくても不具合原因を効率よく絞り込むことができる。

本研究では、FCIをパラメータ数と同じ長さのベクトルとして表現した。各成分は、当該パラメータがFCIに無関係である場合は0、関係する場合はそのパラメータの値を表す正の整数を取る。この表現により、FCIに含まれるパラメータ数を制約として扱うことができる。さらに、テストケースと正常/障害の結果を入力とし、正常テストについては、どの候補FCIも完全には含まれないことを要求し、障害テストについては、少なくとも一つの候補FCIが含まれることを要求する制約を導入した。これらの条件をSAT型CSPとして扱い、テスト結果と整合するFCI候補を求める統合システムを構成した。

性能評価では、真のFCIとテストケースをランダムに生成し、反復実験によりFCI特定性能を評価した。実験では、FCIに含まれるパラメータ数を2に固定し、パラメータ数、水準数、FCI数、テスト数を系統的に変化させた。FCI特定成功率が90%を初めて超えるテスト数を「90%到達テスト数」として記録し、同時に実行時間分布を評価し

た。その結果、FCI 数が 1 の場合には、パラメータ数が小さい範囲では必要なテスト数が増加した後、ほぼ一定の範囲で推移する傾向が見られた。一方、FCI 数を増やした場合には、必要なテスト数の増加は比較的緩やかであるものの、平均実行時間は大きく増加する傾向が見られた。このことは、テスト数の設計と、原因特定計算のスケールビリティが異なる要因に支配されることを示している。

この成果の一部は、関連分野の研究集会において発表し、今後の性能改善や評価拡張に関する有益な意見を得た。現在、定式化と評価結果を整理し、学術発表および論文投稿に向けて準備している。

(3) 準ランダムテスト生成法

第二の成果は、組合せテストに対する準ランダムテスト生成法の構築である。通常のランダム生成は実装が容易で大規模化しやすい反面、まだ被覆されていない相互作用や、相互作用どうしを区別する能力を直接には考慮しない。一方、厳密な最適化に基づく生成法は良質なテストスイートを得られる可能性があるが、計算量が大きく、現実の制約変更や追加条件に対して柔軟性が不足する場合がある。本研究では、この二つの中間に位置する方法として、ランダム性を保ちつつ、組合せ構造を反映したあらかじめ定められた基準により候補を選択する準ランダム生成法を検討した。

本手法の特徴は、通常のテスト配列そのものではなく、相互作用の結合行列上でテスト生成を考える点にある。相互作用の結合行列とは、各テストケースがどの t-way 相互作用 (t 個のパラメータ値の組合せ) を被覆しているかを 0-1 で表した行列であり、行がテストケース、列が相互作用を表す。この表現により、カバリングアレイに対応する被覆性と、ロケーティングアレイおよびディテクティングアレイに対応する相互作用どうしを区別する能力を同じ枠組みで扱うことができる。また、この行列は非適応型グループテスト (事前にすべての検査を設計し、検査結果から欠陥対象を特定するグループテスト) における検査行列と対応するため、グループテストで開発された設計基準を組合せテストへ応用することが可能となる。

具体的には、候補テストケースのランダム性を保ちながら生成し、被覆性と FCI 特定能力を反映した評価基準により、次に追加するテストケースを選択する枠組みを整理した。この方法により、単純なランダム生成よりも組合せ構造を反映しつつ、厳密な最適化に比べて柔軟にテストスイートを構成することが可能となる。

シミュレーションでは、通常のランダム生成と提案する準ランダム生成を比較した。その結果、いくつかの設定において、準ランダム生成は同じテスト数でも通常のランダム生成より高い FCI 特定成功率を示した。特に、相互作用どうしを区別する能力が重要となる状況で改善が見られた。一方で、準ランダム生成は候補生成と選択基準の計算を伴うため、通常のランダム生成に比べると追加計算を要する。ただし、この計算は実際のテスト実行前に行う設計処理として扱えるため、実用上受け入れやすいと考えられる。今後は、候補生成の高速化や、より大きなパラメータ設定での評価へ発展させる予定である。

この準ランダム生成法は、本研究期間に新たに整理した手法であり、現在、英文論文として取りまとめている。論文では、組合せテストとグループテストを相互作用の結合行列を介して接続し、カバリングアレイ、ロケーティングアレイ、ディテクティングアレイに基づく生成に共通して利用できる枠組みとして整理している。学術発表

および論文投稿に向けて準備しており、本研究助成による主要な成果の一つである。

(4) ASP を用いたカバリングアレイ生成とその効率化

第三の成果として、カバリングアレイ生成問題を ASP により定式化し、現実的な計算時間内で十分に小さいテストスイートを得るための効率化手法を検討した。この研究は、本研究の一部として大学院生指導にも展開され、カバリングアレイ生成に対する ASP モデルの比較と探索効率化について一定の結果が得られた。

カバリングアレイ (Covering Array, CA) の記法で、 $CA(b; t, k, g)$ とは、 b 行 k 列の配列であり、各成分が g 個の値を取り、任意の t 列に対してすべての値の組合せが少なくとも一度は出現するようなテストスイートである。これは組合せテストにおける基本的な数理モデルであり、全組合せを網羅することなく、少数のパラメータ間の相互作用を漏れなく検査するために用いられる。一方、最小行数のカバリングアレイを生成する問題は計算量的に難しく、実用上は、厳密な最適性だけでなく、現実的な計算時間内で十分に小さい行数の解を得ることが重要である。

本研究では、ASP を用いて、カバリングアレイの条件を宣言的に記述した。具体的には、各テストケースがどの値を取るかを表す条件と、任意の t 個のパラメータに対してすべての値の組合せが現れるという被覆条件を制約として記述した。また、行や値の入れ替えによって本質的に同じ解が多数現れるため、このような重複探索を減らすための制約も導入した。これにより、単に解を探索するだけでなく、探索空間を適切に整理しながら求解する方針を検討した。

評価実験では、先行研究で用いられたカバリングアレイ生成問題のベンチマークを対象とし、複数の ASP モデルの求解時間を比較した。その結果、被覆状況を明確に表すモデルが比較的良好な性能を示す場合が多かった一方で、問題設定に応じたモデル選択の重要性が確認された。また、本質的に同じ解の重複探索を減らす制約を組み合わせることで、求解時間が短縮される例が多く見られた。この結果は、カバリングアレイ生成において、単に制約を記述するだけでなく、本質的に同じ解の重複探索をどのように抑えるかが重要であることを示している。

さらに、最小行数に固執せず、行数を少し増やした実用的な規模のカバリングアレイを許容する実験を行った。その結果、多くのインスタンスにおいて、最小行数付近では求解に長時間を要する一方、行数を 1~数行程度増やすだけで求解時間が急減し、実用的な時間で解が得られる領域へ移行することが確認された。これは、実務上のテスト設計では、厳密な最小性を追求するよりも、行数を適切に緩和して高速に実用的な規模のテストスイートを得る方が有効な場合があることを示している。

この成果は、カバリングアレイ生成に関する基礎的な検討にとどまらず、今後のロケーティングアレイおよびディテクティングアレイ生成へ発展するための基盤となる。これらの配列では、単に相互作用を被覆するだけでなく、異なる障害相互作用集合が異なるテスト結果を与えるように設計する必要がある。そのため、ASP や SAT による柔軟な制約記述と探索効率化は、これらの構成問題に対しても重要な役割を果たすと期待される。

(5) 今後予想される効果と社会実装の可能性

本研究で得られた成果は、ソフトウェア品質保証、組込みシステム、情報通信システム、ネットワークプロトコル、セキュリティ関連システムなど、複数の設定項目が相互に作用するシステムの検証に応用できる可能性がある。SAT型CSPおよびCOPソルバーを用いたFCI特定手法は、テスト結果から不具合原因候補を体系的に特定できるため、デバッグ工程や品質管理工程の効率化に寄与することが期待される。また、提案する準ランダムテスト生成法は、厳密な最適化に基づく方法よりも柔軟に運用でき、単純なランダム生成よりも被覆性やFCI特定能力を意識できるため、実際の開発現場で求められる計算効率と設計品質のバランスを取りやすい。

さらに、ASPを用いたカバリングアレイ生成の研究により、現実的な計算時間内で十分に小さいテストスイートを得るためには、定式化、本質的に同じ解の重複探索の削減、行数緩和を適切に組み合わせることが重要であるという知見が得られた。この知見は、今後のロケーティングアレイおよびディテクティングアレイの生成手法へ発展させることができる。これにより、テストケースの生成と不具合原因検出をより密接に結びつけた組合せテスト支援技術の構築が期待される。

現時点では、特許出願の予定はない。ただし、本研究で得られた数理モデル、テスト生成基準、制約ソルバーに基づくFCI特定手法は、実システムの制約条件を反映したテスト生成、不具合原因候補の自動抽出、テストスイートの効率的設計などに応用可能である。今後は、投稿予定の英文論文および学術誌論文を完成させるとともに、実システムに近い条件での評価を進め、産業技術として社会実装可能な組合せテスト基盤への発展を目指す。