

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年3月23日現在

機関番号：17601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2008～2011

課題番号：20500035

研究課題名（和文） テスト技法と可視化手法とによる組込みソフトウェアの信頼性向上手法の提案

研究課題名（英文） Proposal of a method to improve reliability for embedded software with testing and visualization

研究代表者

片山 徹郎 (KATAYAMA TETSURO)

宮崎大学・工学部・准教授

研究者番号：50283932

研究成果の概要（和文）：本研究は、ソフトウェアテスト技法、および、プログラム可視化手法の2つの観点から、組込みソフトウェアに特化した信頼性向上手法を提案し、評価する。その実現のため、次のことを行った。(1)UMLのダイアグラムからテスト項目の抽出とテスト支援システムの試作。(2)プログラム可視化ツールAvisのテスト支援ツールへの拡張および定量的な評価。(3)ハードウェアを考慮したソフトウェアテスト手法の検討と実現。

研究成果の概要（英文）：This research proposes and evaluates a method to improve the reliability of embedded software from two viewpoints: software testing methods and program visualization methods. The research has been achieved the followings. (1) It has proposed to abstract test items from each element of a diagram of UML, and implemented a prototype of the test supporting system. (2) It has extended and evaluated the program visualization tool Avis to a testing support tool. (3) It has investigated and realized software testing methods for embedded software in consideration of hardware.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	700,000	210,000	910,000
2010年度	700,000	210,000	910,000
2011年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
総計	3,500,000	1,050,000	4,550,000

研究分野：ソフトウェアテスト

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：ソフトウェアテスト、プログラムの可視化、ソフトウェアの信頼性、UML(Unified Modeling Language)、コントロールフローグラフ、実行経路、テスト容易化

## 1. 研究開始当初の背景

## (1)組込みソフトウェア開発を取り巻く背景

ソフトウェアは、IT産業のみならず製造業から金融業に至るまで、あらゆる産業の付加価値創出の源泉となっており、もはや現代経

済社会の基盤として欠かせない存在となっている。特に、組込みソフトウェアの分野においては、製品の機能や競争力を左右する重要な役割を果たしており、その品質の向上が不可欠である。2008年度に報告された経済産業省の組込みソフトウェア産業実態調査によると、製品の不具合原因の半分近く

(43.8%)をソフトウェアが占めており、ソフトウェア開発において品質の課題が最も重要視(73%)されている。すなわち、産業界において組込みソフトウェアの品質向上は急務である。

組込みシステムのようにハードウェアという実体を持つドメインでは、不具合による瑕疵責任の問題を防ぐという意味においても、十分な品質の確保が求められている。ソフトウェアに限らず、日本の製造業は、製品の品質を非常に重要視してきたところが多い。その理由は、日本人には、ものづくりの原点を品質に置くという気質があり、ユーザとして厳しい目を持つという特徴があるからである。つまり、組込みシステムは、品質に対する考え方が厳しい日本が優位に立てうる分野である。一方、ソフトウェア産業は、日本に技術はあると世界中が認めているものの、アメリカやインド、中国が、実際には牽引している現状がある。組込みソフトウェアの品質向上に関する研究を進めることは、日本のソフトウェア産業の巻き返しにつながり、我が国の経済発展のために最優先で検討すべきことである。

## (2) 研究代表者のこれまで

研究開始当初までに研究代表者は、UML(Unified Modeling Language)を利用した設計技法、テスト技法、および、可視化の3つの観点から、Javaプログラムを対象としたソフトウェアの信頼性向上手法について主に研究を進めてきた。テスト技法については、並行処理プログラムや組込みソフトウェアを対象に10年以上研究を進めてきた。また、ソフトウェアテストシンポジウム(JaSST: Japan Symposium on Software Testing)や非営利活動法人ソフトウェアテスト技術振興協会(NPO 法人 ASTER: Association of Software Test Engineering)の企画、運営に携わるなどの活動も行ってきた。可視化については、Javaプログラムを入力として、コントロールフローグラフ、実行パス、および、UMLのシーケンス図を自動生成するツールAvisの試作を行った。また以前から、オペレーティングシステム(OS: Operating System)の構成法やデバイスドライバの生成支援など、システムソフトウェアの分野についても研究を進めてきた。

以上、試作したAvisの応用分野を考慮に入れつつ、かつ、今までの研究成果や知識を社会に還元するという点において、自分が一番貢献でき、かつ、その効果が高い分野は何かと考えた際に、テスト技法と可視化手法とによる組込みソフトウェアの信頼性向上に関する研究である、との着想に至った。

## 2. 研究の目的

従来から、ソフトウェアの信頼性向上手法については様々な手法が提案されてきた。しかし、そのほとんどがソフトウェアの要求仕様や設計に関する手法である。本研究は、テスト手法を中心に研究を進める点が大きな特徴である。テスト作業は、ソフトウェアを出荷する直前の最終作業であり、ソフトウェアの品質を決定付ける最後の砦である。このテスト作業を系統的に実施することにより、ソフトウェアの信頼性向上を目指す。

可視化についても、設計段階でフローチャートやコントロールフローグラフを描くなど、設計の際に、アルゴリズムやプログラムの構造を理解させるといった、プログラマにプログラミングの際の情報を与えるための手法の提案が多い。本研究は、記述後のプログラムに対して可視化を行なう点の一つの特徴である。記述したプログラムの制御の流れを、いろいろな形でプログラマに早期に提示し、また同時に、テスト作業を行なう際に役立つ情報を提供することによって、ソフトウェアの信頼性向上を目指す。

さらに、従来のソフトウェアの信頼性向上手法は、ハードウェアとは独立な視点からの手法のみである。本研究は、組込みシステムを対象としており、ハードウェアの存在は無視できないと考える。すなわち、ハードウェアを考慮した上での組込みソフトウェアの信頼性向上手法を提案し、ひいては、組込みシステム全体としての信頼性向上を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究では、ソフトウェアテスト技法、および、プログラム可視化手法の2つの観点から、組込みソフトウェアに特化した信頼性向上手法を提案し、評価する。その実現のため、以下の項目を実施する。

- UMLのダイアグラムからテスト項目の抽出とテスト支援システムの試作
- プログラム可視化ツールAvisのテスト支援ツールへの拡張および定量的な評価
- ハードウェアを考慮したソフトウェアテスト手法の検討と実現

以下、それぞれについて述べる。

### (1) UMLのダイアグラムからテスト項目の抽出とテスト支援システムの試作

UMLのダイアグラムの1つであるシーケンス図からユーザアクションのタイミングに着目してテスト項目を抽出するテスト手法を既に提案しており、その方法論の正しさについて証明できていたが、実用性は不明で

あった。

そこで、シーケンス図を入力としテスト項目を出力するテスト支援システムを試作し、実用性を検証する。

## (2) プログラム可視化ツール Avis の拡張

コンパイラの技法(字句解析と構文解析)を援用することにより、Java プログラムのソースコードを入力として、コントロールフローグラフ、実行経路、および、UML のシーケンス図を、ユーザに提示するツール Avis を既に試作していた。

そこで、試作した Avis を実際に使用してもらい、その使い勝手などを調査し、定量的に評価する。また、この Avis の次の拡張方針を定める。まず、ソフトウェアテストの 1 工程である結合テストに焦点を当てたテスト支援ツールへの拡張について検討する。次に、ユーザがプログラムの動作をより理解しやすい形で可視化できるよう Avis を改良する。

## (3) ハードウェアを考慮したソフトウェアテスト手法の検討と実現

### ① 組込みシステムに適したプログラミング言語とその実行のためのコンパイラの提案

信頼性の高い組込みシステムの実現のためには、組込みソフトウェアにおいて、より高い信頼性が求められる。そこで、組込みシステムの高信頼性の実現を目的とした、組込みシステムに適したプログラミング言語とその実行のためのコンパイラについて検討する。

検討の際の設計方針として、コードの記述量が少なく、かつ、テスト実行が容易に進められるような特徴を持たせる。検討結果に基づいて、実際にプログラミング言語を提案すると共に、提案したプログラミング言語で書かれたコードを実行可能とするコンパイラについても実装する。

### ② 組込みソフトウェアのテスト環境構築手法の提案

組込みシステムはその用途に応じて、システムの形態や構成は多種多様であるが、実際にソフトウェアが動作する際には、特定のハードウェア上で動作することが多い。そこで、ソフトウェアが動作するハードウェアを仮想的に実現することを試み、その仮想ハードウェア上でソフトウェアのテストが実施できるような環境の構築について実現性を含めて検討し、テスト環境構築手法として提案する。

検討の際の方針として、組込みソフトウェアの信頼性向上を目的としつつ、短納期化にも対応可能な方策を講じる。

## 4. 研究成果

### (1) 研究の主な成果

#### ① UML のダイアグラムからテスト項目の抽出とテスト支援システムの試作

UML のシーケンス図を入力とし、シーケンス図におけるユーザアクションのタイミングに着目したテスト手法を既に提案していた。具体的には、ユーザアクションを表として記述したタイミング確認表を新たに定義し、この定義したタイミング確認表に基づき、事後のシステム状態とユーザのアクションを表中に記入していくことにより、漏れや抜けのないテストを実現できることを示した。

本研究において、タイミング確認表のテンプレートを出力するテスト支援システムを実際に試作し、実用性を示した。具体的には、試作したテスト支援システムに、コピー機の実例を基にしたシーケンス図を適用し、ユーザアクションに関する仕様の漏れや抜けを、実際に発見できた。

#### ② プログラム可視化ツール Avis の拡張

Java プログラムのソースコードを入力として、コントロールフローグラフ、実行経路、および、UML のシーケンス図を、ユーザに提示するツール Avis を既に試作していた。

本研究において、この Avis を、約 8,000 行の実用 Java プログラムに複数適用して、実用性と有用性を評価した。また、Avis を、結合テストに焦点を当てたテスト支援ツールへ拡張を行った。従来結合テストを実施する際は、機能テストの観点をを用いるものが多かった。これは、構造テストの観点をそのまま導入した場合、プログラムの実行経路が複雑になると同時に、その数が爆発的に増えるためである。拡張した Avis は、冗長な実行経路を適切に削除することによって、構造テストの観点での結合テスト実施を可能とした。この拡張した Avis によって、結合テストを実施する際のプログラムの実行経路が抽出可能となった。

拡張した Avis を結合テストに適用することによって、結合テスト実施前にプログラムの実行経路をプログラマに提示できるので、テスト実施の指針を立てることができ、テスト実施にかかる時間を見積もることもできる。また同時に、プログラム中にデッドコード(到達不可能なコード)が含まれている場合、そのデッドコードを事前に発見できると

いう特徴もある。さらに、Avis を実際に使用してもらうことによって、その使い勝手などを調査し、定量的な評価を行うとともに、有用性を検証した。

### ③ハードウェアを考慮したソフトウェアテスト手法の検討と実現

#### a. 組込みシステムに適したプログラミング言語とその実行のためのコンパイラの提案

本研究において、組込みシステムのテスト実行が容易となるような、組込みシステムに適したプログラミング言語とその実行のためのコンパイラについて検討すると共に、その実現のための具体的な手法を提案した。具体的には、組込みソフトウェア向けプログラミング言語 Befana を提案し、Befana で記述したプログラムを実行可能とするコンパイラを実装した。

Befana は、状態遷移構文、テスト構文、強い型チェック機能の3つの大きな特徴を持つ。組込みシステムは、内部に複数の状態を保持して、イベントによって状態を遷移し、処理を進めるものがほとんどである。状態遷移構文の導入によって、そのようなシステムの記述がそのまま可能となるので、コーディングが容易となる。テスト構文の導入によって、コンパイラ時に可能な限りエラーをプログラマに提示することが可能となるので、実際に動かす前にプログラムを修正することができる。強い型チェック機能の導入によって、プログラムの暴走などを防ぐことが可能になるので、システムを安定化させることができる。

Befana で記述したプログラムが実際に実行可能であることを示すとともに、上述の特徴からその有用性を評価した。

#### b. 組込みソフトウェアのテスト環境構築手法の提案

本研究において、ソフトウェアが動作するハードウェアを仮想的に実現する手法について検討した。検討結果に基づいて、CPU の命令セットアーキテクチャ (ISA: Instruction Set Architecture) から命令セットシミュレータ (ISS: Instruction Set Simulator) を生成する手法を提案した。

具体的には、マイクロプロセッサの ISA の情報を、XML (Extensible Markup Language) を用いて「ISA 定義ファイル」として記述し、記述した ISA 定義ファイルと XSLT (XML Stylesheet Language Transformations) を用いて記述した「ISS 雛形ファイル」から、ISS のソースコードを生成する。提案手法は、ISA 定義ファイルのみを変更することによって、

任意の ISA の ISS を生成できる特徴を持つ。

提案手法の実現性と有用性を確認するために、提案手法を実装し、Intel18080 と COMETII の2つの ISS を ISA 定義ファイルの変更のみで作成した。その結果、ISS 作成に必要なコード行数の 95%以上を自動生成できることを示した。

#### (2) 得られた成果の国内外における位置付けとインパクト

本研究課題は、下記の3つの項目を設けた上で、それぞれの項目に取り組んできた。

- UML のダイアグラムからテスト項目の抽出とテスト支援システムの試作
- プログラム可視化ツール Avis のテスト支援ツールへの拡張および定量的な評価
- ハードウェアを考慮したソフトウェアテスト手法の検討と実現

現時点ですべての項目において、ほぼ当初の計画通りに研究が進んだ。研究成果については、都度取りまとめ、査読付雑誌論文への掲載や、国際会議および学会での発表を行っており、社会的に認知され評価されたと判断できる。

また、Avis のテスト支援ツール拡張について情報処理学会に採録された論文は、その手法およびツールの新規性と有用性が認められ、特定非営利活動法人ソフトウェアテスト技術振興協会 (NPO 法人 ASTER) より善吾賞を受賞した。さらに、今回の研究実績を含めて、組込みシステムの品質確保のためにテスト法から考慮できること、および組込みシステムを対象とした具体的なテスト分析手法について、各種セミナーや講演会にて招待講演を行っている。

#### (3) 今後の展望

テストの分野における今後として、これまでに開発したツール Avis を、引き続き拡張し、有用性をさらに高める。現時点では、プログラムの振舞いに関する情報から、テストに役立つ情報を可視化できるよう Avis を改良することを考えている。具体的には、テスト項目やテストデータ選定の際の支援となる条件式や境界値などを抽出して表示できるように、Avis を拡張する。

可視化分野における今後として、これまでの研究を進めていく際に、ソフトウェアテストに関する様々な議論の中で、設計分野と比較すると、テスト分野は可視化(見える化)がほとんど進んでいない、という考えに至った。そこで、テスト作業の可視化に本研究成果を活かしていく。具体的には、テストを実際に実施している最中に、その進行状況を可視化

し提示することによって、テスト作業を支援することを考えている。テスト作業の状況が客観的に管理できれば、効率の良いテスト実施が可能になるため、プログラムの信頼性向上に加えて、開発プロセスの短期化が見込まれる。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計8件)

- ① 喜多義弘、片山徹郎、富田重幸、Javaプログラム読解支援のためのプログラム自動可視化ツール Avis の実装と評価、電子情報通信学会論文誌、Vol. J95-D、No. 4、2012、査読有 (2012年4月掲載予定)
- ② Y. Kita、T. Katayama、S. Tomita、Proposal of an Execution Paths Indication Method for Integration Testing by Using an Automatic Visualization Tool `Avis', Proc. 5th World Congress for Software Quality (5WCSQ)、J-13(電子データ配布)、2011、査読有
- ③ 岡山直樹、片山徹郎、状態遷移構文とテスト構文を導入した組込みソフトウェア向けプログラミング言語開発、情報処理学会組込みシステムシンポジウム2010(ESS2010)、43-48、2010、査読有
- ④ 喜多義弘、片山徹郎、富田重幸、プログラム自動可視化ツール Avis を利用した結合テスト実施のための実行経路抽出手法の提案、情報処理学会論文誌、Vol. 51、No. 9、1859-1872、2010、査読有
- ⑤ 岡山直樹、片山徹郎、信頼性向上を目的とした組込みソフトウェア向けプログラミング言語の開発、宮崎大学工学部紀要、No. 39、301-306、2010、査読無
- ⑥ 喜多義弘、片山徹郎、富田重幸、結合テストのためのプログラム自動可視化ツール Avis による実行経路表示手法の提案、火の国情報シンポジウム2010、2010、査読無
- ⑦ Y. Kita、T. Tokunaga、T. Katayama、S. Tomita、Extension and Evaluation of an Automatic Visualization Tool `Avis' for Programming Education、Proc. Int'l Association of Sci. and Tech. for Development (IASTED) Int'l Conf. on Software Eng. (SE 2009)、31-36、2009、査読有

[学会発表] (計12件)

- ① 東園修平、喜多義弘、片山徹郎、命令セットシミュレータ (ISS) 作成支援手法の改良について、第13回組込みシステム技術

に関するサマワークショップ (SWEST13)、2011年9月1日、下呂温泉 水明館 (岐阜県下呂市)

- ② 東園修平、片山徹郎、組込みソフトウェア開発支援のための命令セットシミュレータ (ISS) 作成手法の提案、情報処理学会組込みシステム研究会、2010年12月6日、熊本大学 (熊本県熊本市)
- ③ 岡山直樹、片山徹郎、組込みソフトウェア向けプログラミング言語開発における状態遷移構文とテスト構文の導入について、第12回組込みシステム技術に関するサマワークショップ (SWEST12)、2010年9月2日、ホテル日航豊橋 (愛知県豊橋市)
- ④ 片山徹郎、ソフトウェアのテスト技術～組込みシステムにおける品質確保のためのポイント～、情報処理学会連続セミナー2009「進化する組込みシステム技術」、第5回「組込みシステムの高信頼化-V&V」、2009年11月11日、東京電機大学神田キャンパス (東京都千代田区)
- ⑤ 片山徹郎、組込みソフトウェアの品質確保のためのソフトウェアテストからのアプローチ、マイクロソフト `Windows Embedded' 組み込みセミナー博多、2009年11月5日、マイクロソフト九州支店 (福岡県福岡市)
- ⑥ 徳永友樹、喜多義弘、片山徹郎、プログラム自動可視化ツール Avis における実行パスの3次元表示手法の提案、電子情報通信学会ソフトウェアサイエンス研究会、2008年10月17日、山梨大学 (山梨県甲府市)

[図書] (計1件)

- ① 情報処理学会 組込みシステム研究会 監修 (片山徹郎、他9名)、CQ出版社、組込みソフトウェア開発技術 (組込みシステム基礎技術全集 Vol. 3)、227-269、2011

#### 6. 研究組織

##### (1) 研究代表者

片山 徹郎 (KATAYAMA TETSURO)  
宮崎大学・工学部・准教授  
研究者番号：50283932