

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 5 月 30 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23500047

研究課題名(和文)組み込みOSの信頼性評価に関する研究

研究課題名(英文)A Study on Reliability Assessment for Embedded OS

研究代表者

岡村 寛之 (Okamura, Hiroyuki)

広島大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：10311812

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円、(間接経費) 1,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究課題では組み込みOSに対する信頼性評価に関する数理的・統計的手法の確立を行った。Androidのようなオープンソースプロジェクトで開発されるOSの利用には、設計・実装前のテストと信頼性評価が重要であるがその手法が確立されていない。本研究課題ではプロジェクトのバグトラッキングシステムとプログラムソースから得られる大量のメトリクス情報から定量的にソフトウェア信頼度を算出する手法の確立および支援ツールの構築を行った。

研究成果の概要(英文)：The project considered mathematical and statistical approaches for reliability assessment of embedded OS. The reliability assessment of embedded OS, such as Android OS, has been unestablished. However, it is quite important to perform the reliability assessment before porting embedded OS to application, especially in the case of utilizing open source projects. This project developed the methods and a tool to estimate quantitative software reliability from the metrics data getting from bug tracking system and their program codes.

研究分野：ソフトウェア信頼性工学

科研費の分科・細目：情報学・ソフトウェア

キーワード：組み込みソフトウェア ソフトウェア信頼性 オープンソース ソフトウェアメトリクス

## 1. 研究開始当初の背景

### (1) 問題の所在

現在、組み込みシステム・ソフトウェアは、家庭用機器、産業用機器、医療用機器など、あらゆる電子機器において利用されている。特に、携帯電話、デジタル家電、自動車などの多くの機能を提供する製品では一千万以上の行数からなるプログラムが実装されている。センサーネットワーク、スマートグリッドなど今後発展すると考えられる技術のキーワードを見ても、個々の機器が高機能化することは容易に想像でき、組み込みシステム・ソフトウェアの大規模化、またそれに伴うプログラム品質の低下は近い将来必ず起こる現実として認識しなければならない。

そのような将来的な問題に対する一つの解決は、組み込み OS を利用したソフトウェア開発である。基盤になるソフトウェアのコンポーネント化・パッケージ化で開発の負担を軽減することで、大規模なソフトウェアでも高い品質を保つことが可能となる。組み込み OS は歴史的には ITRON など古くから存在し、自動車における制御システムなどに利用されている。近年では、Google がスマートフォンやタブレット PC をターゲットとしたオープンソース型の Android をリリースし注目を受けるようになってきている。また、将来的にはデジタル家電への利用も考えられておりオープンソース型の組み込み OS が爆発的な普及をすることが予想される。

組み込み OS の利用、特に Android などのオープンソースで開発される基盤ソフトウェアの利点は、ライセンス料が不要であり安価にシステム開発が行える点にある。一方で、障害に対する保障がないため、製品に利用する前に開発者自身が OS をテストし、その信頼性を評価する必要がある。しかしながら、そのテスト方法が確立されていないことはもちろんのこと、定量的な OS に関する信頼性評価を十分に行えていない現状がある。これは将来の情報システムの発展に対して大きなマイナス要因となり得る。

### (2) 関連研究とその問題点

組み込み OS に限らずオープンソース型の OS を製品に利用する際に見られる特徴は、開発システムの根幹を担うソフトウェアあるにも拘わらずその利用が *at your own risk* である点にある。つまり、利用する側が責任を持ってテスト・評価を行う必要がある。さらに、組み込みシステムは一般的な IT システムと比較して、専門特化する傾向があり、OS の利用方法 (利用プロファイル) も多岐にわたるため、過去の実績に基づいた経験からの評価が難しい。そのため、経験を科学的・工学的見地から体系的に整理したアプローチによって、テスト・評価を行う必要がある。

一つのアプローチはエンピリカルソフトウェア工学の適用が考えられる。これは過去

の開発時のデータを蓄積・分析することによって、ソフトウェア品質や開発プロセスを計測し、適切な管理指針を導き出す手法の総称であり、ソースコードを含むソフトウェア開発データのデータマイニング手法と見なすこともできる。近年の我が国におけるこの分野の大きな成果は、文部科学省リーディングプロジェクト「e-Society 基盤ソフトウェアの総合開発」の一環として、2003 年度から 2007 年度の期間で、奈良先端大学と大阪大学が中心となって推進した EASE (Empirical Approach to Software Engineering) プロジェクトがある。EASE プロジェクトは主としてエンタープライズ系の情報システム開発におけるソフトウェア開発データの有機的な利用を目指しており、EASE ツール群の開発など開発プロセスの管理において一定の成果を収めている。しかしながら、組み込み OS のテスト・信頼性評価の観点から見ると、十分な成果が挙げられているとは言えない。

もう一つのアプローチとして、従来から現場で使われているソフトウェア信頼性モデルの利用がある。ソフトウェア信頼性モデル (バグ曲線とも呼ばれる) は、テストにおける障害の検出頻度がテストを重ね、不具合を修正することで減少する現象をモデル化したものであり、ソフトウェアの信頼性を定量的に示すことができる。既存の研究は、ソフトウェア信頼性モデルを用いた組み込み OS のポーティングに関するものであり、オープンソースのバグ検出情報を利用した定量評価を行っている。しかしながら、バグ検出情報のみを利用しているため、信頼性の見積もりが極めて大雑把であり、実用性という観点でその有効性が疑問視される。

## 2. 研究の目的

本研究課題では、実用的な組み込み OS の信頼性評価手法をエンピリカルソフトウェア工学およびソフトウェア信頼性工学の双方の観点から再構築することを主たる目的とする。先に述べたように、ソフトウェア信頼性モデルは、本来、エンピリカルソフトウェア工学における「ソフトウェア品質の見える化」を行う点において重要な位置づけであるべきであるが、従来までの研究では、これらが全く異なる視点で議論されてきた経緯がある。

本研究では次に挙げる 3 つの問題を取り扱う。(i) 種々のソフトウェアメトリクスを利用するソフトウェア信頼性モデルの構築、(ii) 組み込み OS 上で動作するアプリケーションの利用プロファイルの抽出と、利用プロファイルを考慮した最終製品の品質を支配するソフトウェアメトリクスの特定、(iii) 最終製品の定量的信頼性評価を行う支援ツールの開発。

(i) はエンピリカルソフトウェア工学とソフトウェア信頼性工学を融合した新たな評

価体系の確立を意味している。申請者によるこれまでの研究成果として、汎用的な情報システムに対するメトリクスを利用した信頼性評価モデルの構築がある。これらの手法はこれまでに行われてきたソフトウェア信頼性評価とは一線を画し、極めて画期的な手法である。本研究では、これをオープンソース系の組み込み OS において計測可能なメトリクスへ発展させた手法の検討を行う。

(ii) では、OS 上で動作するアプリケーションの利用プロファイルを特定し、そのプロファイル上で具体的にどのようなメトリクスが品質に強く影響するかという問題を取り扱う。組み込み系のシステムは各システムが自律分散で動作することが多いため、この性質を十分に考慮した分析を行う必要がある。このような分析は、信頼性評価のみならず効率的な組み込み OS のテスト戦略立案に有効であると考えられる。

(iii) では、最終製品に対する信頼度評価を行う支援ツールの開発を行う。バグトラッキングシステムおよび subversion などのバージョン管理ツールとリンクするシステムの開発を目指す。

本研究で行う 3 つの課題は、オープンソース型の組み込み OS を少ない労力で評価することを可能にする点で、現状起こっている組み込みシステムにおけるソフトウェア危機を解決する一助となり得る。また、学術的には、エンピリカルソフトウェア工学とソフトウェア信頼性工学を融合した革新的な手法であり、双方の領域において大きなインパクトを与える。

### 3. 研究の方法

研究は、次の 5 つの段階により遂行される。(a) 組み込み OS を特徴付けるメトリクスの分類、(b) メトリクスを利用可能なソフトウェア信頼性モデルの調査・構築、(c) モデルに基づいた統計的データ分析手法の確立、(d) 利用プロファイルモデルの開発とアプリケーション情報からのモデルパラメータ推定方法についての検討、(e) 統合ツールの作成。

本研究は次のスケジュールで行われる。

平成 23 年 4 月～平成 23 年 12 月

(a) メトリクスの収集と分類

平成 23 年 12 月～平成 24 年 3 月

(b) ソフトウェア信頼性モデルの調査・構築

平成 24 年 4 月～平成 24 年 9 月

(c) 統計的データ分析手法の確立

平成 24 年 9 月～平成 25 年 3 月

(d) 利用プロファイルモデルの開発

平成 25 年 4 月～平成 26 年 3 月

(e) ツール作成

平成 23 年度は、主として組み込み OS を特徴付けるメトリクスの分類とメトリクスを利用するソフトウェア信頼性モデルの調

査・開発を行う。

(a) 組み込み OS を特徴付けるメトリクスの収集と分類：汎用 OS と組み込み OS における主な違いは、カスタマイズ性、リアルタイム性、ワークメモリ量である。また、一般にはワークメモリ量を抑えるために機能単位でのモジュール化が発達していること、さらにはハードウェアの特性が直接影響することも汎用 OS との差として挙げられる。こういった組み込み OS の特徴を表すメトリクスの洗い出しを行う。

オープンソース型の組み込み OS を対象とするため、それらのメトリクス収集は開発プロジェクトにおけるバグトラッキングシステムおよびバージョン管理システムからのソースコードを基礎とする。また、プロジェクトが運営する Web サイトをモニタリングすることで更新頻度などのメトリクスを抽出することができる。特に、Web サイトの更新情報など、過去の履歴が公開されないものに関しては、独自にデータベースを構築する。

メトリクスの項目洗い出しおよび分類に関しては、実際に組み込み OS を利用した開発チームを持つ企業の協力を仰ぐ予定である。ヒアリングを通じて実用的かつ計測可能なメトリクスの特定と分類を行う。エンピリカルソフトウェア工学では、ソースコードの類似性に関するメトリクス算出にベイジアンネットワークなどの学習機械が用いられることが多い。本研究でも、抽出するメトリクス(コード類似性など)にデータマイニング技術でも用いられる隠れマルコフモデル(HMM)や、Web マイニング技法の適用を検討する。これには、申請者の過去の研究成果を応用する HMM や Web マイニング技術を応用して計測するメトリクスは即応性の観点から予め算出し、それらはサーバ上に構築されるデータベースで管理する。

(b) メトリクスを利用可能なソフトウェア信頼性モデルの調査・構築：申請者の過去の研究において、エンタープライズ系情報システムのソフトウェアメトリクスを利用したソフトウェア信頼度成長モデル構築を行っている。これを発展させることで、組み込み OS の評価にも耐え得るモデルの構築を行う。また、従来の信頼度成長モデルとは異なる構造を持った信頼度を求めるためのモデルの利用なども考えられるため、メトリクス利用が可能である条件を抽象的に抽出して、モデルの適用可能性および適用範囲を明らかにする。

平成 24 年度以降はモデルを用いた統計分析手法の改善と利用プロファイルモデル構築およびツールの作成を行う。

(c) モデルに基づいた統計的データ分析手

法の確立：分類したメトリクスを信頼性モデルに取り入れた際の統計分析手法についての検討を行う。過去の研究成果に基づいて、静的メトリクス（コード行数など）をポアソン回帰として障害総数を支配するパラメータ値に反映させ、動的メトリクス（投入したテストケース数など）を、ロジスティック回帰として障害検出確率のパラメータ値に反映させる。これにより、一般化線形モデルにおける統計手法を適用することが可能となる。しかしながら、ここで考えるモデルは厳密に一般化線形モデルと一致しない。そのため、具体的なパラメータ（回帰係数）の推定アルゴリズムについて検討を行う。

(d) 利用プロファイルモデルの開発とアプリケーション情報からのモデルパラメータ推定方法についての検討：OS上で稼働するアプリケーションの情報（ソースコード、バグ情報）を収集し、OS・アプリ間のインタフェースの挙動を記述する利用プロファイルモデルの構築、および、その利用プロファイルの推定手法の検討を行う。一般的に、利用プロファイルは離散型マルコフ連鎖を用いたモデル化が行われることが多いが、組み込み系アプリケーションの場合、リアルタイム性が大きく影響することが考えられるため、連続時間マルコフ連鎖を用いたプロファイルモデルを視野に入れる。そのとき、記述されるモデルはマルコフ型到着過程（MAP）と呼ばれる確率過程の一種になる。データからMAPパラメータを同定する手法には研究代表者自身の過去の研究成果が効果的に機能する。

(e) 統合ツールの作成：(a)から(d)で構築されたモデルおよび収集されたデータを統合的に管理するツールの作成を行う。開発のアーキテクチャにはLAMP(Linux, Apache, MySQL, PHP) + Java Servletを用いる。具体的には、バグトラッキングシステムなどと連携しデータを自動的に収集する機能と、アプリケーション利用プロファイルに応じたメトリクスの重要度による順位付け、組み込みOSの製品化前に行うテストのデータを用いた信頼性の定量化に関する機能を提供する。

#### 4. 研究成果

平成23年度は、主として組み込みOSを特徴付けるメトリクスの分類とメトリクスを利用するソフトウェア信頼性モデルの調査・開発を行った。汎用OSと組み込みOSにおける主な違いは、カスタマイズ性、リアルタイム性、ワークメモリ量である。また、一般にはワークメモリ量を抑えるために機能単位でのモジュール化が発達していること、さらにはハードウェアの特性が直接影響することも汎用OSとの差として挙げられる。こう

いった組み込みOSの特徴を表すメトリクスの洗い出しを行った。具体的には、オープンソース型の組み込みOSであるbusybox, Android OSなどのバグトラッキングシステムからソフトウェア障害（バグ）データ収集を行った。一方、メトリクスを計測するため、ソースリポジトリからソースコードの取得を行った。一般のプログラムとの比較を行うため、Software-artifact Infrastructure Repositoryから入手できるEuropean Space Agencyのプログラムの入手も行った。また、これらのデータを分析するための設計とテストに関するメトリクスとバグの関係を同時に表現する回帰ベースのモデル開発と統計的手法について調査および再検討を行った。

結果として、組み込みOSにおいても通常のメトリクスとして計測される、コード行数、プログラム複雑度が大きな要因となっていることがわかった。さらに、組み込みOSの特徴的な点として、システム規模を表すコード行数のようなメトリクスよりも、処理の複雑性に関する指標がよりOSの特徴を表していることがわかった。

平成24年度は、主として統計分析手法の改善を行った。分類したメトリクスを信頼性モデルに取り入れた際の具体的な統計分析手法についての検討を行った。平成23年度の調査により、静的メトリクス（コード行数など）をポアソン回帰として障害総数を支配するパラメータ値に反映させ、動的メトリクス（投入したテストケース数など）を、ロジスティック回帰として障害検出確率のパラメータ値に反映させることが有効に機能することがわかった。これにより、一般化線形モデルとソフトウェア信頼性モデルを融合したモデルでの分析を行う必要が生じた。そこで、このモデル構造に対して、パラメータ（回帰係数）を推定するアルゴリズムの検討を行った。また、既存研究として存在しているEM(Expectation-Maximization)アルゴリズムと階層ベイズの概念を導入したベイズ推定が有望であることがわかったため、これらを適用する手法の構築を行った。さらに、線形回帰における弱点を克服するために、カーネル法の適用を検討した。

平成25年度は、平成24年度に構築した推定手法のブラッシュアップと実用的なツール開発を行った。平成24年度での課題として、推定アルゴリズムのスケラビリティの改善があげられ、サンプリングを利用した近似手法を適用することで、アルゴリズムのスケラビリティの向上を行った。また、ソフトウェアの利用状況をマルコフモデルによってモデル化する手法も導入し、包括的なソフトウェア利用およびテストのアクティビティデータからの情報も取り入れた推定手法についての検討も行った。また、ソフトウェア信頼性評価ツールであるSRATS(Software Reliability Assessment Tool on

Spreadsheet) に対して, 開発したモデルを扱える拡張を行った. 当初は LAMP アーキテクチャを想定していたが, 現場において表計算ソフトウェアの管理が現実的であることから既存の表計算によるソフトウェア信頼性評価ツール SRATS を拡張する形で開発を行った.

## 5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 17 件)

1. H. Okamura and T. Dohi, A novel framework of software reliability evaluation with software reliability growth models and software metrics, Proceedings of The 15th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE 2014), pp. 97-104, 2014. 査読あり  
DOI: 10.1109/HASE.2014.22
2. H. Okamura and T. Dohi, SRATS: Software reliability assessment tool on spreadsheet (Experience report), Proceedings of The 24th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE 2013), pp. 100-117, 2013. 査読あり  
DOI: 10.1109/ISSRE.2013.6698909
3. H. Okamura, H. Kishikawa and T. Dohi, Application of deterministic annealing EM algorithm to MAP/PH parameter estimation, Telecommunication Systems Journal, vol. 54 (1), pp. 79-90, 2013. 査読あり  
DOI: 10.1007/s11235-013-9717-y
4. H. Okamura, T. Dohi and K. S. Trivedi, Improvement of expectation-maximization algorithm for phase-type distributions with grouped and truncated data, Applied Stochastic Models in Business and Industry, vol. 29, pp. 141-156, 2013. 査読あり  
DOI: 10.1002/asmb.1919
5. H. Okamura, M. Tokuzane and T. Dohi, Quantitative security evaluation for software system from vulnerability database, Journal of Software Engineering and Applications, vol. 6 (4A), pp. 15-23, 2013. 査読あり  
DOI: 10.4236/jsea.2013.64A003
6. H. Okamura, T. Dohi and S. Osaki, Software reliability growth models with normal failure time distributions, Reliability Engineering and System Safety, vol. 116, pp. 135-141, 2013. 査読あり  
DOI: 10.1016/j.res.2012.02.002
7. B. Zhou, H. Okamura and T. Dohi, Enhancing performance of random testing through Markov chain Monte Carlo methods, IEEE Transactions on Computers, vol. 62 (1), pp. 186-192, 2013. 査読あり  
DOI: 10.1109/TC.2011.208
8. H. Okamura, M. Tokuzane and T. Dohi, Security evaluation for software system with vulnerability life cycle and user profiles, Proceedings of 2012 Workshop on Dependable Transportation/Recent Advances in Software Dependability (WDTS-RASD 2012), pp. 39-44, 2012. 査読あり  
DOI: 10.1109/WDTS-RASD.2012.17
9. H. Okamura and T. Dohi, Application of hierarchical Bayesian modeling to discrete-time software reliability growth model, Proceedings of 2012 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2012), pp. 382-389, McGraw-Hill, Taiwan, 2012. 査読あり
10. J. Zheng, H. Okamura and T. Dohi, Component importance analysis of virtualized system, Proceedings of The 9th IEEE International Conference on Autonomic and Trusted Computing (ATC 2012), pp. 462-469, 2012. 査読あり  
DOI: 10.1109/UIC-ATC.2012.128
11. B. Zhou, H. Okamura and T. Dohi, Application of Markov chain Monte Carlo random testing to test case prioritization in regression testing, IEICE Transactions on Information & Systems (D), vol. E95-D (9), pp. 2219-2226, 2012. 査読あり  
DOI: 10.1587/transinf.E95.D.2219
12. H. Okamura and T. Dohi, Unification of software reliability models using Markovian arrival processes, Proceedings of 17th IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC-2011), pp. 20-27, 2011. 査読あり  
DOI: 10.1109/PRDC.2011.12
13. K. Okumura, H. Okamura and T. Dohi, On the effect of the order of test cases in the modified exponential software reliability growth model, Proceedings of 2011 Second International Conference on Networking and Computing (ICNC-2011), pp. 294-296, 2011. 査読あり  
DOI: 10.1109/ICNC.2011.55
14. H. Okamura, Y. Etani and T. Dohi, Quantifying the effectiveness of testing efforts on software fault

detection with a logit software reliability growth model, Proceedings of 2011 Joint Conference of the 21st International Workshop on Software Measurement (IWSM-2011) and the 6th International Conference on Software Process and Product Measurement (MENSURA-2011), 62-68, 2011. 査読あり

DOI: 10.1109/IWSM-MENSURA.2011.26

15. H. Okamura, T. Dohi and S. Osaki, Software reliability growth model with normal distribution and its parameter estimation, Proceedings of the International Conference on Quality, Reliability, Maintenance and Safety Engineering (ICQR2MSE 2011), pp. 424-429, 2011. 査読あり  
DOI: 10.1109/ICQR2MSE.2011.5976642
16. 岡村寛之, 土肥正, ソフトウェア信頼性評価尺度の推定精度向上に関するリサンプリング手法の提案, ソフトウェアシンポジウム '11 論文集, 10 pages, 2011. 査読あり
17. H. Okamura and T. Dohi, Software safety assessment based on a subordinated Markov chain, International Journal of Systems Assurance Engineering and Management, vol. 1, pp. 307-315, 2011. 査読あり  
DOI: 10.1007/s13198-011-0032-0

〔学会発表〕(計3件)

1. H. Okamura and T. Dohi, A novel framework of software reliability evaluation with software reliability growth models and software metrics, presented in The 15th IEEE International Symposium on High Assurance Systems Engineering (HASE 2014), Miami Beach, FL, USA, 2014.
2. H. Okamura and T. Dohi, SRATS: Software reliability assessment tool on spreadsheet (Experience report), presented in The 24th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE 2013), Pasadena, CA, USA, 2013.
3. H. Okamura, T. Hirata and T. Dohi, Semi-parametric approach for software reliability evaluation using mixed gamma distributions, presented in The 7th International Conference on Mathematical Methods in Reliability, -Theory, Methods and Applications - (MMR-2010), Beijing, China, 2011.

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

岡村 寛之 (HIROYUKI OKAMURA)

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 10311812