

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 6 月 10 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2014～2016

課題番号：26730039

研究課題名(和文) ソフトウェアメトリクスを考慮した多次元ウェーブレット解析による信頼性評価方法

研究課題名(英文) Software Reliability Assessment via Multi-dimension Wavelet Analysis

研究代表者

肖 霄 (XIAO, XIAO)

首都大学東京・システムデザイン研究科・助教

研究者番号：30707477

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ソフトウェア開発プロジェクト管理における品質保証・評価への支援を念頭に、ウェーブレット解析によるソフトウェア信頼性評価方法を提案する。統計的推定技法としてウェーブレット縮小推定に着目し、高精度かつ低計算コストで推定を実行する理論的枠組みを構築する。ウェーブレットに基づいた統計的推定アルゴリズムを実装した簡易評価ツールを開発し、ソフトウェア開発プロジェクトにおいて収集されたソフトウェアフォールトデータを用いて数値検証し、提案手法の性能および応用可能性について検討する。

研究成果の概要(英文)：In this research, we develop a wavelet analysis-based software reliability assessment method, keeping in mind the purpose of supporting decision makings in the software development project management. As a statistical inference technique, we focus on wavelet shrinkage estimation, and develop a theoretical framework to perform the statistical estimation with higher accuracy and lower computation cost. We develop a simplified statistical analysis tool to implement the wavelet-based estimation algorithm, and investigate the performance and applicability of the proposal though numerical experiments using real software fault data.

研究分野：ソフトウェア信頼性工学

キーワード：ソフトウェア信頼性 非同次ポアソン過程 ノンパラメトリック推定 ウェーブレット解析 分散安定化変換 雑音除去 バイアス補正 適合性評価

### 1. 研究開始当初の背景

現代社会では、金融、通信、医療、交通など社会を支える重要なインフラシステムから、身近な携帯電話や情報家電まで、例外なくソフトウェアによって制御されているのが現状である。ソフトウェアの不具合に起因したトラブルが発生すると経済的かつ社会的に大きな損害・被害が起こるため、ソフトウェアの高信頼化要求はこれまでも増して高まっている。しかし、ソフトウェア(本研究は単一ソフトウェアを対象とする)の信頼度を高めるには、避けては通れないトレードオフ問題がある。ソフトウェア開発のテスト段階において、なるべく多くのバグを検出・除去することで信頼度向上を実現する反面、これに伴うテスト費用の増大が多くの企業を悩ませている。ソフトウェア開発技術者は、限られた予算のもとで要求された信頼性を満たしつつ、テスト期間の短縮に努めなければならないという難問に直面している。この問題を解決する工程管理手法の一つとして、非同次ポアソン過程(NHPP)に基づいたソフトウェア信頼性モデルの活用があり、これによってソフトウェア信頼度の成長現象を可視化し、開発技術者に出荷時期決定問題に対する判断基準を提供出来、テスト期間の短縮、コストの削減、品質の向上につながる[A1, A2]。

ソフトウェア信頼度を算出するためには、NHPPモデルを特徴づける平均値関数(又は強度関数)を推定する必要がある。従来研究では推定に最尤法や最小二乗法が用いられている。このようなパラメトリックな推定手法は特徴関数の形状を限定するため、観測データ(時系列)の不規則な振る舞いを忠実に再現することが原理的に不可能である。そこで、研究代表者による先行研究では、観測データの大域的な傾向と局所的な変動を同時に抽出出来ることで知られるウェーブレット解析に着目し、NHPPモデルのノンパラメトリック推定法として、ウェーブレット縮小推定(WSE)を世界に先駆けて開発した。WSEは最尤法よりも大きい尤度、最小二乗法よりも小さい誤差を提供出来、ソフトウェア信頼度を精度良く算出出来るため、国内外から注目を集めていた。本研究課題の申請当時では、WSEは適合性の観点から見て有用であり、ソフトウェア信頼性評価において十分応用可能であることを立証出来た。

しかし、WSEには将来を予測することが難しいことが課題として残されていた。これはノンパラメトリック推定の弱点としても知られており、これを克服することは、ソフトウェア開発プロジェクトマネジメントの立場からして興味のある「最適出荷時期の決定」といった実務に大いに役に立つと考えていた。Barghoutら[A3]はカーネル関数を利用したノンパラメトリック推定法を提案し、逐次予測を用いて過去の観測データから次のバグが検出される時間を予測することに成

功した。先行研究の成果と課題、並びに関連研究[A3]を踏まえ、研究代表者はWSEと逐次予測を結合した短期予測が可能と考えた。これは、線形直交基底によって対象関数を表現する点において、ウェーブレットはカーネル関数と類似するからである。さらに、観測データの代わりに、それらのウェーブレット係数を説明変数に持つ線形回帰(これはウェーブレット回帰と呼ばれる)をNHPPモデルに組み入れることにより、従来のノンパラメトリック推定では出来なかった長期予測も実現可能と考えた。

### 2. 研究の目的

ソフトウェア開発プロジェクト管理における品質保証・評価への支援を念頭に、本研究課題の申請当時では、ソフトウェアメトリクスを考慮した多次元ウェーブレット解析によるソフトウェア信頼性評価方法の提案を目的としていた。具体的には、以下の3点を行った。

- (1) ウェーブレット縮小推定の改善
- (2) ウェーブレット縮小推定による区間推定手法の提案
- (3) ウェーブレット縮小推定による予測手法の提案

### 3. 研究の方法

研究目的を達成するために、まず本研究の初期段階では、インターネットにおいて収集されたソフトウェアフォールトデータの確認・抽出を行い、評価用プログラムから自動的に読み込んで処理できるように、データを統一的に整理し、データファイル(.dat)として用意した。上記作業と同時に、提案手法の比較対象となる既存手法を同定するために、NHPPモデルのノンパラメトリック推定法について情報整理を行い、ウェーブレット回帰の関連文献を数学分野及び応用工学分野から探し、理論面と応用面からウェーブレット回帰のソフトウェア信頼性評価への応用可能性について検討した。

次に、研究目的(1)(2)(3)についてそれぞれ以下のような方法で研究を行った。

- (1) に関しては、観測データに正規変換を施すと観測データの確率的構造が大きく変わる点について考察を行い、WSEのパラメータ(分散安定化変換、閾値法、閾値など)はどのように推定精度に影響するのかについて感度解析を行うことによって明らかにした。
- (2) に関しては、当たり前品質の一つであるソフトウェア信頼性の評価指標を点推定値として予測することに加え、区間評価への拡張を行い、一点の評価値よりもその浮動幅や上下限を提示することが出来、WSEを多次元に拡張した。
- (3) に関しては、ソフトウェアフォールトデータを解析対象とし、まず、逐次予測を用いた短期予測手法の提案を行った。ここでは特に、次の単位時間におけるソフトウェア信頼

性評価指標（例えば、フォールト発見数やフォールト発見時刻）の予測に焦点を当てた。次に、逐次予測の研究成果を踏まえ、 $n$  期先における河川流量の予測を目的とした他分野の研究結果[A4]をヒントに、ウェーブレット回帰係数によって抽出される観測データの域的な傾向を利用し、長期予測手法の提案を行った。

最後に、上記提案をもとに、効率的な信頼性評価指標算出アルゴリズムを構築した。数式処理ソフトウェア Mathematica 9 を用いて、構築したアルゴリズムを実装し、それを、データファイル (.dat) を入力とし、信頼度評価指標の評価値並びに提案手法の精度を出力とする簡易評価ツールに仕上げた。さらに、簡易評価ツールを用いて、提案手法の適合精度及び予測精度を評価した。提案手法のノンパラメトリック推定の枠組みにおける位置付け及び長所・短所を明らかにした。

#### 4. 研究成果

本研究ではまず、申請当初の目的に応じて以下のような成果が得られたと考える。

(1) WSE の精度はソフトウェアフォールトデータの特性に依存することが分かり、どのようなケースにおいてどのような WSE を選んで評価すればよいかというユーザーガイドラインを作成した。

(2) これまでは点評価にフォーカスして評価指標を点推定値として予測することに焦点を当ててきたが、区間評価へ拡張することを行い、一点の評価値よりもその浮動幅や上下限を提示出来る手法を提案した。初期段階ではあるが、出荷時期決定問題等に対して柔軟な判断基準を提供することが出来、フレキシブルな意思決定に大きく貢献するものとする。

(3) WSE の論理的優位性（データフィッティング等の処理が容易なことや適合性評価において生じる計算オーバーヘッドが非常に小さいこと等）を継承し、NHPP モデルのノンパラメトリック手法でありながら、ソフトウェア品質の将来的振舞いの予測を可能にした。

次に、申請当初に予期していなかったことにより得られた新たな知見や成果として以下があげられる。

(1) 提案手法を評価する過程の中で、適合できないソフトウェアフォールトデータが存在したため、本研究の土台となるソフトウェア信頼性モデルの確率構造について調べ直した。その結果、信頼性コミュニティの中で一定あるいは単峰と認識されてきたソフトウェアの故障率は多峰性を示す場合があると発見した。

(2) 研究代表者による先行研究も含めて、ハールウェーブレットに着目して研究を進めて来たが、その一般形であるドーブシウェーブレットの適応可能性も検討し、ドーブシウェーブレットを利用した予測手法を提案し、一部の成果を学会にて発表した。

(3) 申請当初は分散安定化変換の forward 変換のみが WSE に影響を与えていたが、inverse 変換によってバイアスが生じることが分かり、バイアス補正を行うことで WSE の精度が向上することが分かった。

最後に、本研究のウェーブレット解析によるソフトウェア信頼性評価手法は世界に先駆けて行われる新しい試みであり、本研究の結果は日本発の次世代ソフトウェア信頼性評価技術になり得るものと期待出来る。例えば、次のテスト日に何個フォールトが発見されるかを見積もることが出来、実際に見つけたフォールト数が見積もった数よりも少ない場合、さらにテストケースを投入する必要があるかどうかといったテスト進捗度管理に活用可能であり、ソフトウェア開発実務に大きく貢献出来る。特に、実データ解析による実証的分析を行うため、実際の開発工程に密着した評価手法という意味では、開発現場への波及効果が極めて高いものとする。また、本研究の成果は、ソフトウェアに対してのみならず、情報システム全体の信頼性評価へ活用可能と考えている。例えば、大規模なネットワークシステムの信頼性を評価する際、障害発生現象の背後にある過程をウェーブレットによってモデリング出来る点においては、ソフトウェア信頼性評価の考え方と一致する。従って、本研究の成果は、ソフトウェア信頼性工学の領域を越え、ネットワークシステムの障害発生メカニズムの究明にも貢献し得る。

#### < 引用文献 >

[A1] M. R. Lyu, (eds.), Handbook of Software Engineering, McGraw-Hill, New York, 1996.

[A2] H. Pham, Software reliability, Springer, Singapore, 2000.

[A3] M. Barghout, B. Littlewood and A. Abdel-Ghaly, "A non-parametric order statistics software reliability model," Software Testing, Verification and Reliability, vol. 8, no. 3, pp. 113-132, 1998.

[A4] O. Kisi, "Wavelet regression model for short-term streamflow forecasting," Journal of Hydrology, vol. 389, pp. 344-353, 2010.

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計3件)

(査読あり) X. Xiao, "NHPP-based software reliability model with Marshall-Olkin failure time distribution," IEICE Transactions on Fundamentals, vol. E98-A, no. 10, pp. 2060--2068, October 2015.

DOI: 10.1587/transfun.E98.A.2060

( 査読あり ) X. Xiao and T. Dohi, " Exponential-like software reliability models based on Binomial process, " International Journal of Reliability and Quality Performance, vol. 6, no. 2, pp. 79--87, December 2014.  
[http://www.serialsjournals.com/journal-detail.php?journals\\_id=175](http://www.serialsjournals.com/journal-detail.php?journals_id=175)

( 査読あり ) X. Xiao and T. Dohi, " Interval estimation method for decision making in wavelet-based software reliability assessment, " IEICE Transactions on Information and Systems, vol. 97, no. 5, pp. 1058--1068, May 2014.  
DOI: 10.1587/transinf.E97.D.1058

[学会発表](計10件)

D. Tada, X. Xiao and H. Yamamoto, " Wavelet shrinkage estimation using unbiased inverse transformation for software reliability assessment, " Proceedings of the 7th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM2016), pp. 493--500, Seoul (Korea), August 24-26, 2016.

多田 大智, 肖 霄, 山本 久志, " 分散安定化変換を用いたウェーブレット縮小推定に関する一考察, " 日本経営工学会 2016 年春季大会予稿集, pp. 144--145, 日本経営工学会・2016 年春季大会, 早稲田大学( 東京都・新宿区 ), 2016 年 5 月 28 日-29 日.

肖 霄, 土肥 正, " ウェーブレット縮小推定における最高解像度レベルの決定方法に関する考察, " 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2016 年春季研究発表会アブストラクト集, pp. 77--78, 日本オペレーションズ・リサーチ学会・2016 年春季研究発表会, 慶應義塾大学( 神奈川県・横浜市 ), 2016 年 3 月 17 日-18 日.

X. Xiao, " A validation study of threshold methods in wavelet shrinkage estimation, " 電子情報通信学会技術研究報告, vol. 115, no. 379, pp. 1--6, 電子情報通信学会・信頼性研究会, 機械振興会館( 東京都・港区 ), 2015 年 12 月 18 日.

X. Xiao, " On the effect of variance-stabilizing transformation to wavelet-based software reliability assessment, " 京都大学数理解析研究所講究録, vol. 1990, pp. 244--251, 京都大学数理解析研究所研究集会報告集--不確実・不確定性の下での数理意思決定モデルとその周辺, 京都大学( 京都府・京都市 ), 2015 年 11 月 11 日-13 日.

X. Xiao, " Software intensity function prediction by Haar wavelet regression, " Supplemental Proceedings of the 2015 IEEE International Conference on Software Quality, Reliability & Security (QRS 2015), pp. 182--183, Vancouver (Canada), August 3-5, 2015.

X. Xiao, " Haar wavelet regression model for NHPP-based software reliability assessment, " Proceedings of the 9th International Conference on Mathematical Methods in Reliability (MMR2015), pp. 56--63, University of Tsukuba ( 東京都・文京区 ), June 1-4, 2015.

X. Xiao, " Wavelet regression model for short-term software reliability prediction, " 京都大学数理解析研究所講究録, vol. 1939, pp. 62--70, 京都大学数理解析研究所研究集会報告集--不確実性の下での数理モデルとその周辺, 京都大学( 京都府・京都市 ), 2014 年 11 月 12 日-14 日.

X. Xiao, " Daubechies wavelet-based software reliability prediction, " 電子情報通信学会技術研究報, vol. 114, no. 256, pp. 7--12, 電子情報通信学会・信頼性研究会, 第一工業大学( 鹿児島県・霧島市 ), 2014 年 10 月 17 日.

X. Xiao, " On applying Marshall-Olkin distribution to NHPP-based software reliability modeling, " Proceedings of the 6th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM2014), pp. 514--521, Hokkai-Gakuen University ( 北海道・札幌市 ), August 21-23, 2014.

[図書](計1件)

X. Xiao and T. Dohi, " NHPP-based software reliability assessment using wavelets, " Reliability Modeling with Applications II - Applied Mathematics and Probability (S. Nakamura, C. Qian and T. Nakagawa, eds.), 24 pages, World Scientific, Singapore, 2016 (in press).

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

肖 霄 (XIAO, Xiao)  
首都大学東京・  
システムデザイン研究科・助教  
研究者番号: 30707477