

令和 5 年 5 月 1 日現在

機関番号：22604

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2017～2022

課題番号：17K12663

研究課題名（和文）多次元ウェーブレット解析によるソフトウェア信頼性区間評価方法

研究課題名（英文）Multidimensional evaluation method for software reliability assessment via wavelet analysis

研究代表者

肖 霄 (Xiao, Xiao)

東京都立大学・システムデザイン研究科・准教授

研究者番号：30707477

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、ブートストラップ法をウェーブレット縮小推定と融合し、優れたパフォーマンスを有する新たなソフトウェア信頼性評価方法を開発した。特に、非同次ポアソン過程のシミュレーション方法については、観測データからサンプルを生成するために必要な時間と区間評価値の統計的優位性からして、これまで幅広く使われていた Thinning 法よりも Order Statistics 法の方がより有効であることが分かった。また、ソフトウェアメトリクスデータを入力とし、ソフトウェア信頼性評価指標の区間評価値と提案方法の精度を出力とする、簡易な意思決定支援ツールを開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、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考え、ウェーブレットに基づいたソフトウェア信頼性の区間評価方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バグが発見されるかを見積もることが出来、実際に見つけたバグ数が見積もった範囲を超えた場合、テストケースを見直す必要があるかどうかといったテスト進捗度管理に応用可能であり、プロジェクト責任者のフレキシブルな意思決定を支援し、ソフトウェア開発実務に大きく貢献すると考える。

研究成果の概要（英文）：In this research, we developed a new software reliability evaluation method with excellent performance by integrating the bootstrap method with wavelet shrinkage estimation. In particular, among the simulation methods for nonhomogeneous Poisson processes, the Order Statistics method was found to be more effective than the widely used Thinning method, from the aspect of the time required to generate samples from observed data and the statistical superiority of interval estimates. We also developed a simple decision-making support tool that takes software metrics data as input and outputs the interval evaluation value of the software reliability measures and the accuracy of the proposed method.

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 区間評価 ウェーブレット解析 ブートストラップ法 シミュレーション 実データ解析

1. 研究開始当初の背景

現代社会では、金融、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)の信頼性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。ソフトウェア開発プロジェクト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性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。プロジェクト責任者は、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性の成長現象を可視化し、プロジェクト責任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]。

(1) 国内・国外の研究動向及び位置づけ

意思決定を行うためにプロジェクト責任者は製品品質の現状把握につながる評価方法を必要としている。従来研究の多くは、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算出することに目を向けていた[A1]。評価指標のひとつである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。様々な既存方法の中でも応募者による先行研究は、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基づいたウェーブレット縮小推定(WSE)を世界に先駆けて開発した[A2]。WSEはソフトウェア信頼性の評価指標を他方法より効率良く算出出来るため、国内外から注目を集めており[A3, A4]、本研究開始段階では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とと言える。

(2) それまでの研究成果を踏まえ着想に至った経緯

WSEには1つ大きな課題が残されている。それは、点推定値は現場で必要とされる柔軟な判断に対応しきれないことである。実務的観点からすれば、一点の評価値よりもその変動幅や上下限の方が判断材料としての有用性が高いため、WSEを点評価から区間評価へ拡張する必要がある。限られたソフトウェア故障データから、予測信頼度や残存バグ数を区間として算出することは容易ではない。これまでにベイズ的[A5]と非ベイズ的[A6]観点からこの問題に取り組む研究は多数存在するが、いずれも近似的な解法であった。研究開始前までは、ブートストラップ法(BS法)を用いることで厳密解を求めることが可能になった[A7]。しかし、これらの方法はバグ検出時間データにしか対応せず、バグ検出個数データの解析が出来ない。個数データの収集は時間データに比べて遥かに簡単で安価なため、個数データを解析対象とした区間評価方法の必要性が示唆される。

さらに、ソフトウェアの開発・保守および信頼性評価を行うに当たって、ソフトウェアメトリクス(例えば、ソフトウェアの規模、複雑さ、保守性など、開発工程を特徴付けるパラメータ)から得られるソフトウェア品質に関する深い知見を取り入れるべきであり、ソフトウェアメトリクスを考慮した多次元区間評価方法は切実に望まれる状況にあると考える。

WSEは点推定値を、直接観測データから算出する方法(WSE1)と観測データに正規変換を施してから推定する方法(WSE2)に分かれる。本研究の模索段階ではWSE1に対して、三つあるBS法のうち一つのみを適用することで予測信頼度の信頼区間を算出した。一部の結果は既に応募者により公表済である[A8]。よって、他の二つのBS法についても応用可能性を検討すべきと考える。さらに、WSE2の場合はポアソン分布よりも一般的な正規分布が背後の確率過程に存在すると仮定するため、WSE1に比べてより広い範囲で統計的合理性が保たれると考える。よって、WSE2に対してこそBS法を適用して区間評価方法を完成させるべきと考える。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既に応募者による先行研究で考察を行ったが[A9]、BS法と結合する際の統計的合理性が保持されるかどうかを改めて調査する必要がある。

2. 研究の目的

上記背景の下で、本研究の目的を多次元ウェーブレット解析によるソフトウェア信頼性区間評価方法の提案とする。本研究は「ウェーブレット縮小推定に基づいたソフトウェア信頼性評価技術を学術的観点と実用的観点から熟成させる最終の一環」として位置付けられる。

3. 研究の方法

本研究では、まず、(1) 一次元ソフトウェア故障データを解析対象として、WSEとBS法を融合した区間評価方法、ウェーブレット区間推定(WaveInt)を提案する。次に、(2) 多次元ソフトウェアメトリクスデータを解析対象として、WaveIntを多次元に拡張することによって多次元ウェーブレット区間推定(MulWaveInt)を提案し、効率的な区間評価値算出アルゴリズムを構築する。さらに、(3) 区間評価方法と多次元ウェーブレット解析を有機的に統合する本研究の成

果をより複雑な情報システムの信頼性評価への適用可能性を検討する。

具体的には、3年間計画として進める予定である。初年度は国内外の文献を再調査すると共に、ソフトウェアメトリクスデータの整理を行う。これらの結果を踏まえ、WSE1に対する区間評価方法を確立する。二年度目はWSE2への拡張を考え、ウェーブレット区間推定(WaveInt)を完成させる。また、多次元ウェーブレット区間推定(MulWaveInt)を提案し、アルゴリズムの構築を行う。さらに、提案方法を評価するためにアルゴリズムを実装する。最終年度は簡易評価ツールを開発し、提案方法の評価を行い、その長所・短所を明らかにする。また、評価結果をもとにアルゴリズムの再構築を行い、新たに収集するデータを用いて、提案方法を改善し、再評価しながら本研究を完成形に近づける。

4. 研究成果

本研究では以下のような成果が得られたと考える。

(1) 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厳密に考察を行い、データ変換はウェーブレット縮小推定の精度に多大なる影響を与えることが分かった。この成果の詳細は査読付き論文として公表済みである。

(2) ブートストラップ法の関連文献を統計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縮小推定との融合可能性について検討した。ブートストラップ法を導入することによって開発した新たなソフトウェア信頼性評価方法は予想以上にパフォーマンスの優れたものであった。これら一連の研究の新規性や有用性などが評価され、World Scientific社が出版する図書の一章として収録され、さらに、国内の産業工学分野のワークショップに基調講演を招待された。

(3) 研究計画の「WSE1に対する区間評価方法の確立」において当初予定していた、三つのブートストラップ法を適用することで予測信頼度の信頼区間を算出することに関しては、うち二つのブートストラップ法は数理的な構造により本研究で開発予定の評価方法に適用する必要性はないことが判明した。また、一つ目のブートストラップ法は奥深い学術分野であるシミュレーションに深く関係していることが分かった。

(4) 提案手法の、点推定にブートストラップ法を適用して区間推定を行う部分において、非同次ポアソン過程のシミュレーションが必要であり、8種類のシミュレーション方法を実装し、観測データからサンプルを生成するために必要な時間と区間推定値の統計的性質を基準にパフォーマンス評価を行い、幅広く使われていたThinning法よりも有効なOrder Statistics法を選定出来た。その結果、より高速な推定アルゴリズムを構築出来た。また、研究成果を関連分野の一流学術雑誌(Journal of Systems and Software)に投稿し査読中である。

(5) 提案手法を実装し、ソフトウェアメトリクスデータを入力とし、ソフトウェア信頼度評価指標の区間評価値と提案方法の精度を出力とする、簡易な意思決定支援ツールを開発した。

(6) 本研究で培ったソフトウェアメトリクスデータに関する知見をもとに、本研究の成果の関連分野への応用可能性を検討した。その結果、本研究の副産物として、ソフトウェアメトリクスを考慮したソフトウェア信頼性モデルやソフトウェアメトリクスデータを取り入れたソフトウェア開発工数予測方法の提案を行い、初期成果を国内外の学会会議において公表した。

<引用文献>

- [A1] H. Pham, Software reliability, Springer, Singapore, 2000.
- [A2] X. Xiao and T. Dohi, "Wavelet-based approach for estimating software reliability," Proceedings of the 20th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE '09), pp. 11-20, IEEE CS Press, 2009.
- [A3] X. Xiao and T. Dohi, "Estimating software intensity function based on translation-invariant Poisson smoothing approach," IEEE Transactions on Reliability, vol. 62, no. 4, pp. 930-945, 2013.
- [A4] X. Xiao and T. Dohi, "Wavelet shrinkage estimation for non-homogenous Poisson process-based software reliability models," IEEE Transactions on Reliability, vol. 62, no. 1, pp. 211-225, 2013.
- [A5] H. Okamura, H. Grottko, T. Dohi and K. S. Trivedi, "Variational Bayesian approach for interval estimation of NHPP-based software reliability models," Proceedings of the 37th Annual IEEE/IFIP, International Conference on Dependable Systems and Networks (DSN '07), pp. 698-707, IEEE CPS, 2007.
- [A6] H. Joe, "Statistical inference for general-order statistics and nonhomogeneous Poisson process software reliability model," IEEE Transactions on Software Engineering, 15 (2), pp. 1485-1490, 1989.
- [A7] M. C. van Pul, "Simulations on the Jelinski-Moranda model of software reliability; application of some parametric bootstrap methods," Statistics and Computing, 2, pp. 121-136, 1992.

- [A8] 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, 2014.
- [A9] X. Xiao and T. Dohi, "A comparative study of data transformations for wavelet shrinkage estimation with application to software reliability assessment," *Advances in Software Engineering*, vol. 2012, Article ID 524636, 9 pages, 2012.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 3件／うち国際共著 3件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Xiao Xiao	4. 巻 32
2. 論文標題 Estimating software intensity function via multiscale analysis and its application to reliability assessment	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Communications of Japan Industrial Management Association	6. 最初と最後の頁 126, 131
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 X. Xiao, D. Tada and H. Yamamoto	4. 巻 vol. 26, no. 1
2. 論文標題 On the role of unbiased inverse variance-stabilizing transformation in wavelet shrinkage estimation for NHPP-based software reliability assessment	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice	6. 最初と最後の頁 59, 70
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 X. Xiao and T. Dohi	4. 巻 -
2. 論文標題 NHPP-based software reliability assessment using wavelets	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Reliability Modeling with Computer and Maintenance Applications	6. 最初と最後の頁 23, 44
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1142/9789813224506_0002	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件／うち国際学会 6件）

1. 発表者名 座間 渉, 肖 雷
2. 発表標題 リカレントニューラルネットワークを用いたソフトウェアフォールト発見数予測
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2023年春季研究発表会アブストラクト集
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 X. Xiao, H. Okamura and T. Dohi
2. 発表標題 Incorporating software metrics data in software reliability assessment via penalized regression
3. 学会等名 Proceedings of the 10th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 X. Xiao and T. Dohi
2. 発表標題 Interval estimation for non-parametric NHPP-based software reliability model via simulation-based bootstrap
3. 学会等名 The 8th International Conference on Dependable Systems and Their Applications (DSA2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 X. Xiao
2. 発表標題 Interval estimation for wavelet-based software reliability assessment
3. 学会等名 The 19th Japan-China Workshop on Industrial Engineering and ICT (J-C Workshop 2020) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 H. Inokuchi, X. Xiao and H. Yamamoto
2. 発表標題 Software reliability model with software metrics by Logistic regression
3. 学会等名 Proceedings of the 20th Asia Pacific Industrial Engineering and Management Systems Conference (APIEMS2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Inokuchi, X. Xiao and H. Yamamoto
2. 発表標題 Software reliability assessment using Cox regression considering software metrics
3. 学会等名 Proceedings of 2018 Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM2018) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Xiao Xiao and T. Dohi
2. 発表標題 Simulation-based interval estimation of software reliability measures
3. 学会等名 電子情報通信学会・信頼性研究会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関