

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：15101

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330081

研究課題名(和文) 計算統計による実践的ソフトウェア信頼性評価システムとその開発管理への応用

研究課題名(英文) On Practical Software Reliability Assessment System Based on Computational Statistics and Its Applications to Software Management

研究代表者

井上 真二 (Inoue, Shinji)

鳥取大学・工学(系)研究科(研究院)・助教

研究者番号：60432605

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)：計算統計学の中でもブートストラップ法と呼ばれる手法を適用して、パラメータ推定量の確率分布や標準誤差を求めるための極めて複雑な解析的アプローチを、データのリサンプリングによる多数の疑似データの生成に置き換え、ソフトウェア信頼性評価結果の不確実性を考慮した手法を実現するためのデータ発生シミュレータを開発した。また、ブートストラップ法独自の信頼性評価手法についても議論すると共に、これらの提案技術をソフトウェア最適リリース問題などの開発管理手法へ応用することで、評価リスクを考慮した、ソフトウェア信頼度成長モデルに基づく最適リリース時刻の区間推定を可能とした。

研究成果の概要(英文)：We developed a bootstrapping simulator for conducting software reliability assessment with their uncertainty. This simulator enables us to obtain the probability distributions of parameters in a software reliability growth model and software reliability assessment measures and conduct interval estimation of them. Regarding the interval estimation, we applied several bootstrap confidence intervals for obtaining the appropriate result of interval estimation from the bootstrap distribution. Furthermore, we discussed methods for the bootstrapping interval estimation of optimal software release time by applying our bootstrapping method to so-called optimal software release problem, which is one of the problems in software management.

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 ブートストラップ区間推定 ソフトウェア信頼度成長モデル ソフトウェア信頼性評価 ソフトウェア最適リリース問題

### 1. 研究開始当初の背景

ソフトウェア信頼度成長モデルに基づいた信頼性解析では、ソフトウェア実行過程に沿って観測される信頼性データ(ソフトウェア故障発生時間データやソフトウェア故障発生数データ)に基づいて、適用したモデルに含まれるパラメータを推定し、推定されたモデルに基づいてソフトウェア信頼度や平均ソフトウェア故障発生時間間隔などの推定を行い、信頼性の解析を行う。したがって、実際に観測可能な信頼性データに基づいてある程度精度が高い信頼性評価結果を得るには、ソフトウェアの実行環境をできるだけ緻密に反映しながらモデルを改良する必要があり、この概念に基づいてこれまで数多くのソフトウェア信頼度成長モデルが提案されている。一方、このように一定の説得力をもつモデルを開発することは、モデル自体が複雑になっていくだけでなくモデルパラメータが急増するため、推定が困難となり、本質的な意味でも実用性に欠けるモデルを開発している場合も少なくない。したがって、このような概念に基づいたモデルの新規開発は、現実のソフトウェア実行環境を反映したモデリングアプローチをより発展させるために重要な課題であるが、モデル過多と言える現状において、そのようなアプローチが今後の実践的なソフトウェア信頼性評価技術の発展に大きく貢献できるか懐疑心を拭えない部分がある。

実践的なソフトウェア信頼性評価における問題では、観測される信頼性データがいわゆる不完全データ(起こりうるすべてのソフトウェア故障発生時間を完全に観測・記録できていないデータ)であり、一組のデータに含まれる観測データ数も不十分な場合が多く、パラメータの点推定値やそれに基づいた信頼性評価結果に対する信ぴょう性の問題がある。また、このようにデータ数が必ずしも十分でない状況下では、パラメータ推定量の不確実性を考慮しながら推定量の標準誤差に関する検討や、パラメータの区間推定を行いながら、モデルに基づいた信頼性評価結果の不確実性を考慮したアプローチをとるべきであるが、理論や数式に基づく複雑な解析的アプローチを用いる必要があると共に、近似的なアプローチを用いても実際に有効な解を得ることは難しく、この問題を解決できる技術は未だ確立されていないのが現状である。既存のモデルを適用して実際に信頼性評価を行う際のこのような問題は、ソフトウェア信頼性評価技術を効果的かつ有効的に実践する上で極めて重要な問題であり、モデルの新規開発よりも議論の焦点となってしまうべきである。

### 2. 研究の目的

上述した背景から、本研究課題では、これまでのモデルの新規開発から一旦離れ、既存のモデルを適用して信頼性評価を行う際に

発生する上述した問題に焦点を当てた。すなわち、理論や数式に基づく複雑な解析的アプローチや近似的なアプローチを用いずにパラメータ推定量やソフトウェア信頼性評価尺度の不確実性を考慮しながら区間推定が行える技術を、計算統計学の手法に基づいて開発することにした。具体的には、実際に観測された信頼性データに対して、計算統計手法の1つであるブートストラップ法(文献 )と呼ばれるリサンプリング手法を適用しながら、観測データに基づいた疑似データ(ブートストラップ標本)を生成するためのシミュレータを開発した。さらに、観測データに基づいてシミュレータから生成された疑似データに対して、適用したソフトウェア信頼度成長モデルのパラメータや信頼性評価尺度に対する推定量の確率分布を捉え、それらの区間推定など、これまで現実的に難しかったソフトウェア信頼性評価に関する包括的な統計的推測に関する議論まで展開することを、今回の研究課題に対する大きな目的とした。

また、この手法をソフトウェアの最適リリース(出荷)問題などのソフトウェア開発管理に関する問題へ適用することで、最適リリース時刻やコストの区間推定が可能となり、信頼性水準を計測リスクとして捉え、さらにモデルによって把握できる信頼性達成状況を考慮することで、リスクに基づいた信頼性指向型の新たなソフトウェア開発管理手法を開発することも目的の1つとして位置づけた。

### 3. 研究の方法

実際のソフトウェア開発の実際のテスト工程において多く実施されているソフトウェア故障発生数データの離散的な収集方法とも整合性があり、観測データとの適合性、テスト終了時までの総ソフトウェア故障数をテスト早期に高い精度で予測できることが検証されている離散化ソフトウェア信頼度成長モデル(文献 )を、ソフトウェア信頼性評価に適用する場合を考えた。離散化ソフトウェア信頼度成長モデルは、テスト工程において観測されるソフトウェア故障発生数の累積値の平均的な振る舞いを、厳密解をもつ差分方程式によって記述する離散時間モデルの1つであり、モデルに含まれるパラメータは差分方程式から得られる回帰式から回帰分析を行うことで得られる。

本研究課題では、観測データとそのデータに基づいて推定された回帰式との残差に焦点を当てながら、観測データのリサンプリングを行うことにした。具体的には以下の手順でブートストラップ法を適用した：

- (1) 観測データから回帰式に含まれるパラメータを回帰分析に基づいて推定し、信頼度成長モデルに含まれるモデルパラメータや信頼性評価尺度も同時に推定する(これらの推定値をイテレーション

- (繰り返し)回数0の推定値と呼ぶことにする)。
- (2) 観測データと推定された回帰式との各観測時点における残差をそれぞれ算出する。
  - (3) 算出した各観測時点における残差を昇順に並べそれぞれのポイントに等確率を与えながら、残差に関する経験分布を形成する。
  - (4) 形成された経験分布に基づいて、観測点の数だけ残差をランダムサンプリングする。
  - (5) サンプリングしたデータをはじめに推定した回帰式に加え、回帰分析に必要なデータを再生成する。
  - (6) 再生成されたデータに基づいて、再度、回帰分析を行い回帰式に含まれるパラメータを推定し、信頼度成長モデルに含まれるモデルパラメータや信頼性評価尺度も同時に推定する(これをイテレーション回数1の推定値と呼ぶ)。
  - (7) この作業を事前に設定したイテレーション回数だけ実施することで、繰り返し回数分のモデルパラメータや信頼性評価尺度の推定値が得られる。

上記の手順によって得られたイテレーション回数分だけのモデルパラメータの推定値や信頼性評価尺度によって、各モデルパラメータおよび信頼性評価尺度に関する確率分布をそれぞれ生成した。

生成された各モデルパラメータおよび信頼性評価尺度の確率分布に基づいて、区間推定を行う必要がある。区間推定では、いわゆるブートストラップ信頼区間として知られている基本、標準正規、パーセントイルと呼ばれる3つのブートストラップ信頼区間を適用した。また、偏りがある確率分布が得られた場合には、これらの信頼区間は適切ではないため、新たにブートストラップ- $t$ 信頼区間やBCa信頼区間などのブートストラップ信頼区間も必要に応じて適用し、一定の信頼水準における区間推定を実施した。

上述したアプローチを、ソフトウェアの最適リリース(出荷)問題にも適用することでコストや達成した信頼度を評価基準とした最適リリース時刻の区間推定も可能とした。具体的には、テスト工程におけるソフトウェアフォールト1個当りの修正コスト、運用段階におけるフォールト1個当りの修正コスト、さらに単位時間当りのテスト実施コストを表すコストパラメータを設定した上で、適用した離散化ソフトウェア信頼度成長モデルを用いて総期待ソフトウェアコストを求め、この総期待ソフトウェアコストが最小となるテスト時刻を解析的に求める(達成した信頼度を評価基準とする場合は、離散化ソフトウェア信頼度成長モデルからソフトウェア信頼度関数を導出し、一定の信頼度を得るために最低限必要なテスト時刻を最適リリース時刻とした)。この解析的に求めた最適

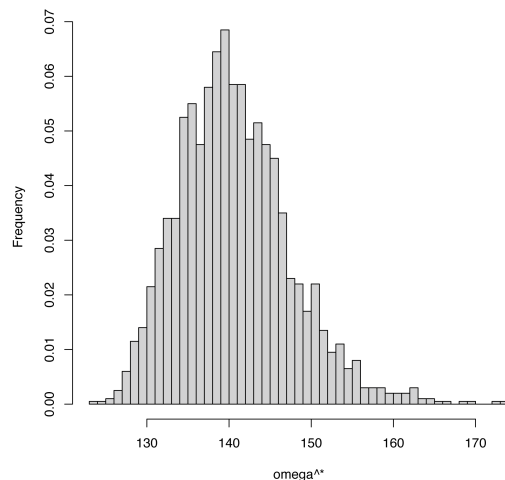


図1: テスト開始前にソフトウェア内に潜在する総フォールト数の期待値に対する確率分布。

リリース時刻は、離散化ソフトウェア信頼度成長モデルのモデルパラメータの関数であるため、前述したブートストラップ実施手続きに、これらを組込むことで、最適リリース時刻に関する確率分布を生成することができた。

#### 4. 研究成果

「3. 研究の方法」で述べたアプローチに基づいて、実際のテスト工程で観測されたフォールト発見数データ(文献)を適用しながら、今回の研究課題で開発したアプローチが期待通りに機能するかどうか確認も行った。なお、「3. 研究の方法」で述べたアプローチ自体も今回の研究課題で得られた成果であるが、本章では、その成果を実装することでどのような結果を得ることができるかを示すことを主な目的とする。

まず、適用したデータについては、実際のテスト工程において観測された25組のフォールト発見数データであり、指数形信頼度成長曲線を示すデータであるため離散化ソフトウェア信頼度成長モデルの1つである離散化指数形ソフトウェア信頼度成長モデルを適用することにした。本研究課題で開発したソフトウェア信頼性評価のためのブートストラップアルゴリズムは、フリー(無料)の統計解析環境であるRを利用し、ソフトウェア信頼性データリサンプリングシミュレータとして実装した。ここでは、イテレーション回数を2000回として得られた結果を示す。図1には、適用した離散化指数形ソフトウェア信頼度成長モデルに含まれるモデルパラメータの1つである「テスト開始前にソフトウェア内に潜在する総フォールト数の期待値」に関して、本研究課題で議論したブートストラップ法によって得られた確率分布である。ここで、特に述べておきたいことは、モデルパラメータに関するこのような確率分布を得るだけでも、従来手法では、実務

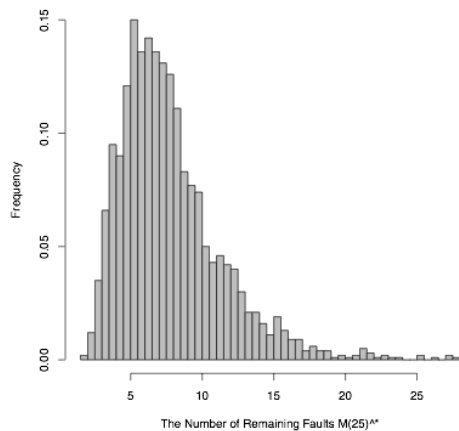


図2：テスト終了時刻においてソフトウェア内に残存するフォールト数の期待値に関する確率分布。

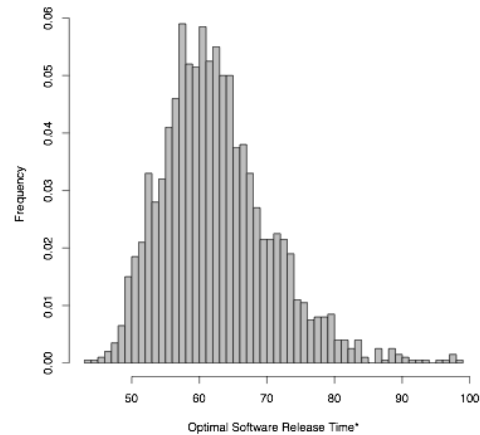


図3：コスト評価基準によるソフトウェアの最適リリース時刻の確率分布。

者にとって非常に複雑な解析的アプローチを用いる必要があると共に、ソフトウェア故障発生現象に与えた確率規則によってはそれに基づいた理論的に厳密な区間推定が不可能な場合があることに対して、本研究課題では計算統計手法の活用によって、それらの問題を回避しつつ、各推定量の確率分布が得られる点である。図2は、適用した離散化指数形ソフトウェア信頼性モデルから導出された信頼性評価尺度の1つである「テスト終了時刻においてソフトウェア内に残存するフォールト数の期待値」に関する確率分布である。従来手法では、これらの値は点推定で行われていたが、特に、観測データ数が少ない場合は、その結果の信ぴょう性は評価できない。本研究課題で議論したアプローチでは、信頼性評価尺度に関する確率分布についても導出でき、それらの不確実性を考慮したソフトウェア信頼性評価が可能となることは、実践的なソフトウェア信頼性評価において極めて意義のある成果であると考えられる。

このようにして得られたモデルパラメータや信頼性評価尺度に対する確率分布から、ブートストラップ信頼区間推定法に基づいて、一定の信頼水準の下での区間推定を実施した。その結果は、紙面の都合上割愛させて頂くが、「5. 主な発表論文等」において列挙した発表論文に記載されている。

ソフトウェアの最適リリース時刻に関する区間推定についても、上述したアプローチに基づいて、コスト評価基準のみを考慮した場合の最適リリース時刻、および、達成すべき信頼度を評価基準とした最適リリース時刻に対する確率分布をそれぞれ得ることができた。図3は、その一例として、コスト評価基準のみを考慮した場合の最適リリース時刻に対する確率分布を示す。この確率分布に基づいて、ブートストラップ信頼区間推定

手法を適用しながら、危険率を評価リスクとして捉えながら最適リリース時刻の区間推定も可能となった。従来の点推定によるソフトウェアの最適リリース時刻の推定に比べ、不確実性を考慮した最適リリース出荷時刻の見積りを支援できるものとする。

ここでは、離散化指数形ソフトウェア信頼度成長モデルに基づいた具体的なアプローチについて議論したが、もう1つの離散化モデルである離散化習熟S字形ソフトウェア信頼度成長モデルに関するブートストラップ推定手続きについても同様に議論した。また、実践的なソフトウェア信頼性評価手法に関して今後の展開がされる様々な課題についても本研究課題と並行して議論し、関連分野における適切な学会等で公表した。

#### <引用文献>

B. Efron, "Bootstrap methods: another look at the jackknife," *The Annals of Statistics*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-26, 1979.

S. Inoue and S. Yamada, "Discrete software reliability assessment with discretized NHPP model," *Computers & Mathematics with Applications: An International Journal*, Vol. 51, Issue 2, pp. 161-170, January 2006.

#### 5. 主な発表論文等 〔雑誌論文〕(計7件)

- [1] S. Inoue and S. Yamada, "A nonparametric bootstrap method for software reliability assessment and release planning," *Advances in Reliability*, Vol. 1, No. 1, pp. 51-59, 2014.  
( [http://www.escitechpublishing.com/j\\_fair/air\\_volume.html](http://www.escitechpublishing.com/j_fair/air_volume.html) )( 査読有 )
- [2] S. Inoue and S. Yamada, "Interval

- estimation of optimal software release time by simulation-based approach,” *Asia-Pacific Journal of Industrial Management*, Vol. V, Issue 1, pp. 47-53, 2014. (査読有)
- [3] 井上真二, 山田茂, 「離散時間ソフトウェア信頼性モデルに基づいた最適リリース時刻の区間推定に関する一考察」, 京都大学数理解析研究所講究録 1912 「不確実性の下での数理的意思決定法の理論と応用」, pp. 59-64, 2014年8月. (査読無)
- [4] 井上真二, 山田茂, 「ブートストラップ法を用いたソフトウェア最適出荷時期の区間推定に関する一考察」, 統計数理研究所共同研究レポート 323 「最適化: モデリングとアルゴリズム 26」, 統計数理研究所, pp. 154-159, 2014年3月 (査読無)
- [5] 井上真二, 山田茂, 「離散化ソフトウェア信頼度成長モデルに基づいたブートストラップ信頼性評価法」, 京都大学数理解析研究所講究録 1864 「確率的環境下での意志決定解析」, pp. 151-156, 2013年11月. (査読無)
- [6] S. Inoue, S. Yamada and H. Matsuno, “Nonparametric bootstrap interval estimation of software reliability and its application to an optimal release problem based on a discretized model,” *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 20, No. 5, pp. 1350019 (14 pages), October 2013. (DOI: 10.1142/S0218539313500198) (査読有)
- [7] S. Inoue and S. Yamada, “A bootstrapping approach for software reliability measurement based on a discretized NHPP model,” *Journal of Software Engineering and Applications*, Vol. 6, No. 4A, pp. 1-7, April 2013. (DOI: 10.4236/jsea.2013.64A001) (査読有)
- [学会発表] (計 1 1 件)
- [1] 井上真二, 山田茂, “Simulation-based software reliability assessment based on an inflection S-shaped SRGM”, 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, 2016年3月17-18日, 慶應義塾大学矢上キャンパス, 横浜市港北区, pp. 79-80.
- [2] S. Inoue and S. Yamada, “Bootstrapping interval estimation for software reliability assessment based on an S-shaped discretized model,” *Proceedings of the 2nd East Asia Workshop on Industrial Engineering*, Seoul, Korea, November 6-7, 2015, pp. 89-95.
- [3] S. Inoue and S. Yamada, “Simulation-based interval estimation of optimal software release time,” *Proceedings of the Twelfth International Conference on Industrial Management*, Chengdu, China, September 3-5, 2014, pp. 74-78.
- [4] S. Inoue, “A nonparametric bootstrapping approach for optimal software release planning,” presented at the 2014 Spring Conference on the Korea Reliability Society (Invited Talk), Jeju KAL Hotel, Jeju, Republic of Korea, 30 May, 2014, pp. 401-416.
- [5] S. Inoue and S. Yamada, “Interval estimations of software reliability and optimal release time based on better bootstrap confidence intervals” *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM 2013)*, Bangkok, Thailand, December 10-13, 2013, USB-Memory, pp. IEEM13-P-0093 (5 pages)
- [6] S. Inoue and S. Yamada, “Nonparametric bootstrapping interval estimations for software release planning with reliability objective,” *Proceedings of the 24th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE 2013)*, Pasadena, California, U.S.A., November 4-7, 2013, pp. 81-89.
- [7] S. Inoue and S. Yamada, “Bootstrap interval estimation methods for cost-optimal software release planning,” *Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC 2013)*, Manchester, United Kingdom, October 13-16, 2013, pp. 621-626.
- [8] 井上真二, 山田茂, 「ブートストラップ法を用いたソフトウェア最適リリース時刻の区間推定に関する一考察」, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2013年秋季研究発表会アブストラクト集, 2013年9月11-12日, 徳島大学常三島キャンパス, 徳島県徳島市, pp. 158-159.
- [9] S. Inoue and S. Yamada, “An interval estimation approach of optimal software release time based on a nonparametric bootstrap method,” *Proceedings of the Nineteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design*, Honolulu, Hawaii, U.S.A., August 5-7, 2013, pp. 113-117.
- [10] S. Inoue, H. Matsuno, and S. Yamada, “Bootstrapping interval estimations for software reliability assessment based on a discrete NHPP model,” *Proceedings of the Nineteenth ISSAT International*

*Conference on Reliability and Quality in Design*, Honolulu, Hawaii, U.S.A., August 5-7, 2013, pp. 108-112.

- [11] 井上 真二, 山田 茂, 「離散化 NHPP モデルに基づいたソフトウェア信頼性評価尺度のブートストラップ区間推定」, 電子情報通信学会技術研究報告 [信頼性], Vol. 113, No. 162, pp. 1-6, ホテルオホーツクパレス紋別, 北海道紋別市, 2013年7月26日.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕  
出願状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
出願年月日：  
国内外の別：

取得状況(計0件)

名称：  
発明者：  
権利者：  
種類：  
番号：  
取得年月日：  
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等  
<http://www.sse.tottori-u.ac.jp/hp-jouhou/hpsubmit/index.html>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

井上 真二 (INOUE, SHINJI)  
鳥取大学・大学院工学研究科・助教  
研究者番号：60432605