

短納期開発におけるソフトウェア信頼性評価技術とその実現のための評価シミュレータの開発

代表研究者 井上真二 鳥取大学大学院工学研究科社会経営工学講座 助教

1 はじめに

ソフトウェア信頼度成長モデル[Pham(2000), Yamada (2013)]と呼ばれる数理モデルを用いたソフトウェア信頼性計測・評価・予測では、モデルパラメータを観測データから推定して、ソフトウェア信頼性評価尺度と呼ばれる尺度に基づいて信頼性を定量的に計測・評価・予測する。特に、モデルパラメータの推定では、従来から一般的に点推定に基づいた手法が広く利用されている。しかしながら、実際のソフトウェア信頼度成長過程を反映した点推定結果を得るための十分な信頼性データを、実際のテスト工程から収集できることは極めて少ない。特に昨今、短納期化、再利用率の増加、および外注開発が進む中、時間や予算的制約が次第に強くなり、信頼性評価に十分なデータ数が確保できず、非現実的な評価結果を得ることも少なくない。通常、このように十分なデータが得られない場合、区間推定手法を適用すべきであるが、区間推定を行うためには、対象であるパラメータが従う確率分布を求める必要があり、特に、ソフトウェア故障発生現象を表現する確率過程として多く適用されている非同次ポアソン過程に従う信頼度成長モデル（非同次ポアソン過程モデル）に対しては、その導出のために近似的な手法を適用したとしても解析的かつ理論的に複雑であるため実用的にはあまり好まれない。本研究では、非同次ポアソン過程モデルの中でも適合性および予測妥当性が高いと言われる離散化モデル、特に、モデルの構造が極めてシンプルな離散化指数形ソフトウェア信頼度成長モデル[Inoue and Yamada (2006)]に対して、ブートストラップ法[Efron (1979)]と呼ばれる計算統計手法を適用し、モデルパラメータや定量的なソフトウェア信頼性に有用な信頼性評価尺度などソフトウェア信頼性評価に係る各種推定量の確率分布を求める極めて複雑な解析的アプローチを、信頼性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、それらの各種推定量の区間推定など統計的推測を可能にする信頼性評価技術を開発した。また、ブートストラップ法に基づいた適切な区間推定結果を得るためのブートストラップ信頼区間と呼ばれる手法を適用した信頼性評価技術についても議論した。

2 ソフトウェア信頼性評価のためのブートストラップ法と区間推定

2-1 離散化指数形ソフトウェア信頼度成長モデル

本研究では、ソフトウェア信頼度成長モデルの中でも広く実用に供されている非同次ポアソン過程モデルを取り上げ、テスト工程で観測されるソフトウェア信頼度成長過程を記述する。特に、適合性、予測妥当性、およびモデル構造上観点から、今回は、離散化指数形ソフトウェア信頼度成長モデルを採用した。離散化指数形ソフトウェア信頼度成長モデルは、離散型非同次ポアソン過程の平均値関数（テスト開始後 n 期目までに発見された総期待フォールト数）が、 $H_n = \omega[1 - (1 - \delta\beta)^n]$ ($\omega > 0, \beta > 0$) に従うモデルである。ここで、 ω はテスト開始前にソフトウェア内に潜在する総期待フォールト数、 δ は一定時間間隔、および β は 1 個当りのフォールト発見率を表す。さらに、非同次ポアソン過程の性質から、総期待残存フォールト数やソフトウェア信頼度関数などの定量的なソフトウェア信頼性評価に有用な尺度（ソフトウェア信頼性評価尺度）を導出できる。ここで、総期待残存フォールト数とは、テスト開始後 n 期目においてソフトウェア内に残存している総期待フォールト数を表し、 $M_{\{n\}}$ と表記する。また、ソフトウェア信頼度関数 $R(n, h)$ は、 n 期目までテストが実施された条件の下で、その後のテスト時間区間 (n, h) ($h=1, 2, \dots$) においてソフトウェア故障が発生しない条件付確率として定義される。モデルに含まれるパラメータの推定は、上記の離散化指数形ソフトウェア信頼度成長モデルによって記述されるソフトウェア故障発見数の平均的挙動に対する基本的仮定を表した差分方程式から回帰式が得られるため、通常、回帰分析を行うことでパラメータの推定値をそれぞれ得ることができる。

2-2 ブートストラップ標本の生成

回帰分析に基づいた離散化指数形ソフトウェア信頼度成長モデルにおけるパラメータ推定手法に着目しながら、ブートストラップ標本の生成手順を述べる。

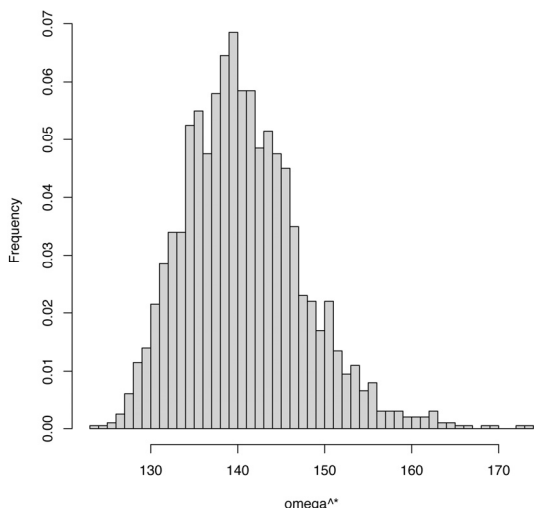


図 1: ω のブートストラップ分布.

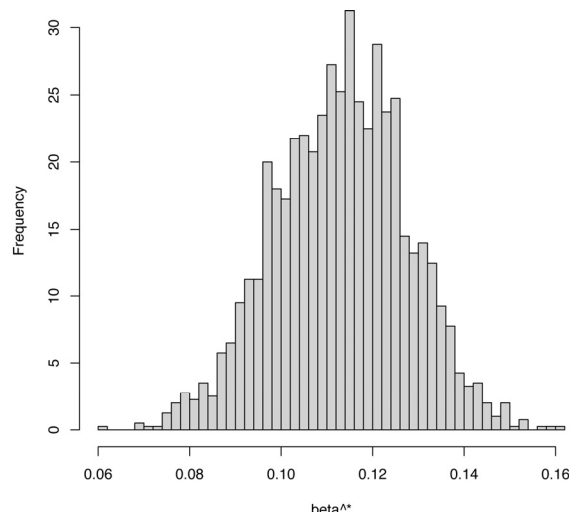


図 2: β のブートストラップ分布.

- Step 1: 観測されたフォールト発見数データから、導出した回帰式に含まれるパラメータ（偏回帰係数）を推定する。また、推定した偏回帰係数を用いて累積発見フォールト数データから求められる回帰分析を行うためのデータの推定値と実測値との差（誤差）を観測時点毎に算出する。
- Step 2: 観測時点ごとに算出された残差はそれぞれ独立かつ同一の分布に従うものと仮定し、これらを昇順に並べ、残差の各点に等確率を付与することで経験分布関数を生成する。
- Step 3: ブートストラップ反復回数の上限值を設定する（通常 2000～3000 回程度に設定する）。
- Step 4: 0 から 1 までの乱数を発生させ、逆変換法に基づいて経験分布関数から重複を許しながら残差を抽出し、残差に関するブートストラップ標本を生成する。
- Step 5: Step 1 で得た推定された回帰式に、残差に関するブートストラップ標本を観測時点ごとに加え、回帰分析に必要なブートストラップ標本を生成する。
- Step 6: Step 5 で生成したブートストラップ標本を用いて回帰分析を行い、新たに偏回帰係数を推定する。その後、得られた偏回帰係数から離散化指数形ソフトウェア信頼度成長モデルのパラメータを算出する。
- Step 7: Step 6 で得られたモデルパラメータを各種ソフトウェア信頼性評価尺度へも適用して、それぞれ推定値を求める。
- Step 8: ブートストラップ反復回数が設定した上限値に達するまで、Step 4～Step 7 を繰り返す。
- 上記の手順に従うことで、実行した反復回数だけモデルパラメータや信頼性評価尺度に関するブートストラップ推定値を得る。また、これらのブートストラップ推定値に基づいて、モデルパラメータや信頼性評価尺度に関するヒストグラムを形成することで、シミュレーションに基づいた確率分布を形成できる。確率分布の特性値についてはモンテカルロ近似に従って算出できる。

2-3 ブートストラップ信頼区間

上述した手順に基づいて得られたモデルパラメータや各種ソフトウェア信頼性評価尺度に関するブートストラップ推定値を用いて、それらの区間推定を行うためのブートストラップ信頼区間[Efron (1987)]の適用も行った。具体的には、基本、標準正規、パーセンタイルの各種ブートストラップ信頼区間と合わせて、推定量のバイアスと歪みの大きさの影響を考慮したブートストラップ信頼区間として、ブートストラップ- t 信頼区間、BCa (bias-corrected and the accelerated confidence interval) 信頼区間も適用した。

3 適用例

実際に観測されたフォールト発見数データ： $(n, y_{\{n\}})$ ($n=1,2,\dots,25; y_{\{25\}}=136$) を用いて、離散化指数形ソフトウェア信頼度成長モデルを用いながら、今回議論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法の適用例を示す。また、本研究では、実測データを用いた適用例を示すため、フリー（無料）

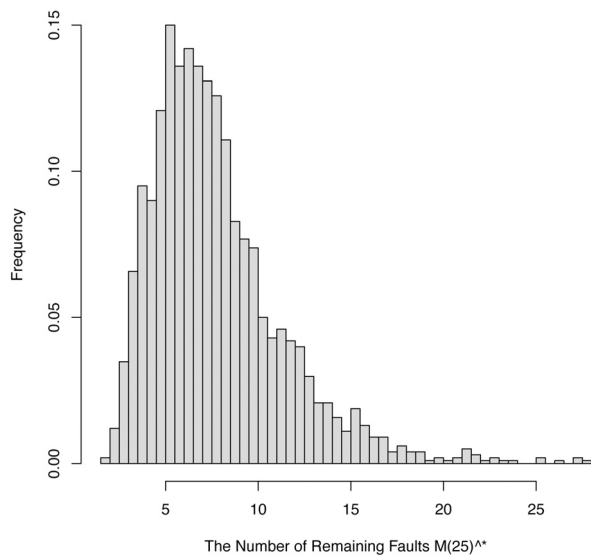


図 3 : $M_{\{25\}}$ のブートストラップ分布.

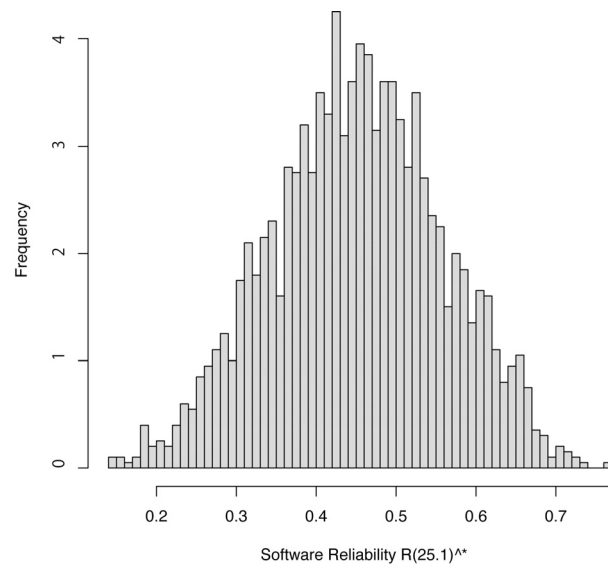


図 4 : $R(25,1)$ のブートストラップ分布.

表 1 : モデルパラメータとソフトウェア信頼性評価尺度の区間推定結果 (危険率 5%).

		Basic	Std. Normal	Percentile	Bootstrap-t	BCa
ω	Lower	124.0544	127.0015	129.528	121.5892	128.1697
	Upper	150.3849	152.9114	155.8585	150.8473	153.2575
β	Lower	0.08620381	0.08543655	0.08511091	0.08425478	0.09073159
	Upper	0.143164	0.1411854	0.1404343	0.1441438	0.1481078
$M_{\{25\}}$	Lower	-2.835469	-0.1235227	3.002461	-4.10847	2.300986
	Upper	10.84297	13.96896	16.6809	11.50142	13.80817
$R(25,1)$	Lower	0.2567593	0.2462621	0.2416085	0.2425933	0.2794992
	Upper	0.6711605	0.6664069	0.6560098	0.6915697	0.7010343

の統計解析環境である R を用いて、今回議論した手法を実現するためのシミュレータを開発した。図 1 および図 2 に、開発したシミュレータを用いて得られたモデルパラメータ ω および β に対するブートストラップ分布をそれぞれ示す。また同様に、図 3 および図 4 には、テスト終了時における期待残存フォールト数 $M_{\{25\}}$ およびテスト終了後から 1 期間の間ソフトウェア故障が発生しない確率 $R(25,1)$ に対するブートストラップ分布をそれぞれ示す。特に、図 3 より、期待残存フォールト数 $M_{\{25\}}$ に対するブートストラップ分布は、左は歪んだ非対称な分布であることがわかる。

3 おわりに

本研究では、非同次ポアソン過程モデルに基づいたソフトウェア信頼度成長モデルに含まれるパラメータや導出されたソフトウェア信頼性評価尺度に関するブートストラップに基づいた区間推定手法について議論した。特に、本研究では、離散化非同次ポアソン過程モデルを取り上げ、ノンパラメトリックブートストラップ法に基づくソフトウェア信頼性評価手法について議論した。また、実測データを適用した提案手法の数値例として、5 つのブートストラップ信頼区間に基づいたモデルパラメータやソフトウェア信頼性評価尺度に対する区間推定結果を示した。今回議論した手法の特徴としては、離散化非同次ポアソン過程モデルを利用することによって回帰分析に基づいたノンパラメトリックブートストラップ法が適用でき、非同次ポアソン過程を特に意識したソフトウェア故障発生時間データを生成することなくブートストラップ法が適用できる点である。その一方で、ブートストラップ標本を生成する際に非同次ポアソン過程を特に意識した疑似データの生成を行ってはいないため、厳密な理論上では問題が残る。今後は、非同次ポアソン過程の性質に基

づいたブートストラップ標本の生成を行い、今回の手法に基づいた結果と照らし合わせながら、今回の手法の有用性について検証する必要がある。また、ブートストラップ信頼区間についても、様々な基準を与えながらソフトウェア信頼性評価において有用なブートストラップ信頼区間を選定する必要がある。

【参考文献】

- H. Pham, *Software Reliability*. Springer-Verlag, Singapore, 2000.
- S. Yamada, *Software Reliability Modeling –Fundamentals and Applications –*, Springer-Varlag, Tokyo, 2013.
- S. Inoue and S. Yamada, “Discrete software reliability assessment with discretized NHPP models,” *Computers & Mathematics with Applications: An International Journal*, Vol. 51, Issue 2, pp. 161-170, 2006
- B. Efron, “Bootstrap methods: another look at the jackknife,” *The Annals of Statistics*, Vol. 7, No. 1, pp. 1-26, 1979.
- B. Efron, “Better bootstrap confidence intervals,” *Journal of the American Statistical Association*, Vol. 82, No. 397, pp. 171-185, 1987.

〈発 表 資 料〉

題 名	掲載誌・学会名等	発表年月
ソフトウェア信頼性モデルにおけるチェンジポイントの検出と信頼性評価への適用	電子情報通信学会技術研究報告 [信頼性], Vol. 113, No. 44, pp. 37--42, グリーンヒルホテル尾道, 広島県尾道市.	2013 年 5 月
Toward practical software reliability assessment with change-point based on hazard rate models	Proceedings of The 37th Annual International Computer Software and Applications Conference (COMPSAC 2013), Kyoto, Japan, July 22--26, 2013, pp. 268--273.	2013 年 7 月
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
A software optimal release problem based on a hazard rate model with change-point	Proceedings of the Nineteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design, Honolulu, Hawaii, U.S.A., August 5--7, 2013, pp. 103--107.	2013 年 8 月
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.	2013 年 8 月
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.	2013 年 8 月
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, 徳島大学常三島キャンパス, 徳島県徳島市, pp. 158--159.	2013 年 9 月

Cost-reliability-optimal software testing-effort expending problems based on a two-dimensional reliability growth model	Proceedings of the 17th International Conference on Industrial Engineering: Theory, Applications and Practice, Busan, Korea, October 6--9, 2013, pp. 481--487.	2013 年 10 月
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.	2013 年 10 月
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).	2013 年 10 月
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
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.	2013 年 11 月
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 (IEEE Catalog Number: CFP13IEI-USB, ISBN: 978-1-4799-0985-8), pp. IEEM13-P-0093 (5 pages).	2013 年 12 月
ソフトウェア信頼性モデルに基づいた信頼性評価におけるチェンジポイントの検出手法に関する一考察	日本オペレーションズ・リサーチ学会 2014 年春季研究発表会アブストラクト集, 2014 年 3 月, 大阪大学豊中キャンパス, 大阪府豊中市, pp. 50--51.	2014 年 3 月
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リポート 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