

平成 21年 5月 29日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2007～2008

課題番号：19710129

研究課題名（和文） 2変量ソフトウェア信頼性評価技術に関する研究

研究課題名（英文）A Study on Bivariate Software Reliability Assessment Technologies

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

研究成果の概要：ソフトウェア開発プロセスの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テスト時間のみに依存しながら記述するこれまでのソフトウェア信頼度成長モデル（SRGM）に孕んでいた評価精度およびモデル妥当性に関する本質的問題に対して1つの回答を与える研究を行った。特に、本研究では、現実的側面を踏まえながら、信頼度成長過程がテスト時間とテスト労力要因の2要因に依存するような2変量SRGMを提案して、当該モデルの実践的適用手法、提案モデルの性能評価、およびソフトウェア開発管理面からの応用問題などについて議論しながら、ソフトウェア開発プロジェクトを成功に導くための高精度ソフトウェア信頼性評価技術について体系的に議論を行った。

交付額

（金額単位：円）

| | 直接経費 | 間接経費 | 合計 |
|--------|-----------|---------|-----------|
| 2007年度 | 1,000,000 | 0 | 1,000,000 |
| 2008年度 | 1,000,000 | 300,000 | 1,300,000 |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 年度 | | | |
| 総計 | 2,000,000 | 300,000 | 2,300,000 |

研究分野：複合新領域

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学，社会システム工学・安全システム

キーワード：ソフトウェア信頼性評価，ソフトウェア品質管理，2変量ソフトウェア信頼度成長モデル，テスト時間要因，テスト労力要因，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（Software Reliability Growth Model: SRGM）は、テスト工程でのソフトウェア実行過程に伴うソフトウェア故障発生時間もしくはソフトウェア故障発生頻度を確率的現象もしくは事象として捉え、それを確率・統計則に基づいて記述するモデルである。これまでに、実際のテスト工程におけるソフトウェア故障発

生現象もしくはフォールト発見事象に関する様々な特徴を反映しながら、数多くのSRGMが提案されている。

しかしながら、これまでに提案されているSRGMのほとんどは、テスト工程におけるソフトウェア故障発生もしくはフォールト発見メカニズム（デバグging過程）を無視したモデル構築枠組みに基づいたものであり、要求される機能の増加に伴うソフトウェア

システムの大規模化・複雑化・多様化およびソフトウェア開発形態の急激な変化に伴い、上述したモデル構築枠組みによって構築された SRGM の信頼性評価・予測精度の限界が叫ばれるようになった。SRGM に基づいたソフトウェア信頼性評価技術が、定量的なソフトウェア信頼性評価のための基盤技術としてその有効性を高め、今後さらに浸透していくためには、その背景にある本質的な問題を明らかにして、それを解決することで、SRGM によるソフトウェア信頼性評価精度の高精度化を追求していく必要がある。特に、SRGM を用いた信頼性評価技法に関しては、15 年程前に開発された SRGM が未だ主流であり、上述したソフトウェアシステムを取り巻く状況に並行して発展しているとは言い難い状況にあった。

2. 研究の目的

現在までに議論されている SRGM のほとんどは、テスト工程におけるソフトウェア信頼度成長過程は実施されたテスト時間のみに依存するという基本的仮定に基づいて構築されていた。しかしながら、ソフトウェア故障は、設計工程もしくはコーディング工程において作り込まれたソフトウェアフォールトが潜在するプログラムパスが入力データによって実行された際に発生する。このような現実の現象を考えると、実行されたテスト時間のみに依存しながらソフトウェア信頼度成長過程を記述していたこれまでの基本的仮定に疑問を抱く。また、現実的な問題として、テスト工程におけるソフトウェア信頼度成長過程は、テスト工程において費やしたテスト労力やテスト用の入力データ（テストケース）が効率的に設計されているかどうか（テスト効率性）などによって、大きく影響を受けることが数多く報告されている。すなわち、ソフトウェア信頼度成長過程はテスト時間のみに依存するものではなく、テスト労力やテスト効率性などのソフトウェア信頼度成長要因にも依存しているものと考え方が自然であろう。このような現象が確認および報告されているにも関わらず、依然として、テスト時間のみに依存した SRGM の開発がなされ実用に供されている原因は、上述した状況を反映できる SRGM の構築枠組みが未だ確立していないためであると考えられる。このような現状において、テスト実施時間と共に上述したテスト労力やテスト効率性などのソフトウェア信頼度成長過程に影響を与える要因を陽に考慮しながら、それらの状況に応じて観測されるソフトウェア信頼度成長現象を表現し、ソフトウェアの信頼性を計測・評価する技術を開発することは極

めて興味深い問題である。

本研究では、上述した問題に対して1つの回答を与える研究を遂行することを目的とする。すなわち、テスト工程において観測されるソフトウェア信頼度成長現象をテスト実施時間要因とソフトウェア信頼度成長過程に影響を与える要因との2種類の情報に基づいて記述すべきであるとの観点から、それらをソフトウェア信頼性評価へと有機的に反映可能な2変量 SRGM の構築枠組みについて議論を行うと共に、それによって構築された2変量 SRGM に基づいたソフトウェア信頼性評価手法を含めた2変量ソフトウェア信頼性評価技術の体系的確立を目指すことを本研究の目的として、本研究を遂行した。

3. 研究の方法

研究初年度（平成 19 年度）における具体的な研究の方法を以下に挙げる。

(1) 2変量ソフトウェア信頼度成長モデルにおける確率諸量の定義

本研究では、ソフトウェア信頼度成長過程がテスト時間要因とソフトウェア信頼度成長要因との2つの情報に依存しながら観測される場合におけるソフトウェア故障発生現象もしくはフォールト発見事象に関する確率諸量を定義する共に、それらを図示しながら、当該諸量の関係を体系的にまとめた。

(2) 2変量確率過程に基づいた SRGM の構築枠組みの開発

体系的に定義された2変量ソフトウェア故障発生現象もしくはフォールト発見事象に関する確率諸量に基づいて、ソフトウェア故障発生頻度を2変量確率過程として取り扱うことにした。具体的には、比較的構造が単純であり、1変量 SRGM においても多く適用されている非同次ポアソン過程（NHPP）を2変量へと拡張した2変量 NHPP、また、それとは別に2変量二項過程をそれぞれ今回取り扱う確率過程として適用することにした。

(3) 2変量ソフトウェア信頼性解析手法の開発

2変量 SRGM に基づきながらソフトウェア信頼度成長過程を記述した後は、それを評価するための定量的な尺度が必要となる。本研究では、信頼性工学の概念に基づいて、ソフトウェア信頼度成長過程が2変量によって表現できることを十分に考慮しながら、2変量 SRGM において導出可能な種々のソフトウェア信頼性評価尺度を導出した。

また、研究最終年度（平成 20 年度）では、以下の研究方法に従って研究を遂行した。

(4) 提案した SRGM 構築枠組みおよび SRGM の適合性および有効性の検証

実際のソフトウェア開発工程において観測された信頼性データ（フォールト発見数データ）を用いながら、本研究において提案した 2 変量 SRGM の適合性および予測妥当性に関する検証を行った。主に、当該検証における評価基準としては、平均偏差平方和と予測相対誤差を用いた。

(5) ソフトウェア開発管理技術に関する諸問題への応用

ソフトウェア信頼度成長過程をテスト時間要因とソフトウェア信頼度成長要因の 2 つの情報に依存しながら記述するため、従来のテスト時間のみに依存した 1 次元 SRGM に基づいた議論よりも、より現実的な状況の下で議論ができるため、当該議論も合わせて行う。

(6) ソフトウェア信頼性評価高精度化のための種々の SRGM の開発

当研究目的の柱でもある SRGM に基づいたソフトウェア信頼性評価の高精度化という目的に従いながら遂行した研究であり、実際のテスト工程において観測されるデバッグ環境もしくはテスト環境を反映したソフトウェア信頼性評価手法についても議論を行う。

4. 研究成果

「3. 研究の方法」に示した手順に従って、本研究において得られた成果を述べる。

(1) 2 変量 SRGM 枠組み形成のための確率諸量の定義

本研究では、テスト工程におけるソフトウェア信頼度成長過程を確率・統計則に基づいてモデル化を行うことが、主な研究目的の 1 つであった。まず、テスト時間要因とソフトウェア信頼度成長要因（テスト労力要因と呼ぶことにする）の 2 要因にて表現される 2 変量ソフトウェア故障発生現象もしくはフォールト発見事象に関する確率諸量を、図 1 のように定義した。これらは、これまでのソフトウェア信頼性工学における知見に基づいて定義した諸量であり、ソフトウェア故障発生時間間隔および関連するテスト労力の増分が、それぞれ、連続型確率変数に従う。また、これにより、任意のテスト時間およびそれまでに投入されたテスト労力量において

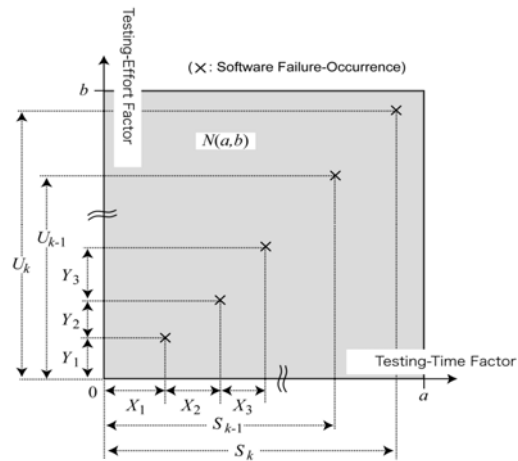


図 1：2 変量ソフトウェア故障発生現象およびフォールト発見事象に関する確率諸量。

発見される総フォールト数は、2 変量確率過程に従うことも容易に理解できる。

(2) 2 変量 SRGM 構築枠組みおよびそれらに基づいた 2 変量 SRGM の構築

(1)において定義したソフトウェア故障発生現象もしくはフォールト発見事象に関する確率諸量に基づいて、2 変量 SRGM 構築のためのモデリング枠組みと当該枠組みに基づいた 2 変量 SRGM の構築を行った。本研究では、コブ・ダグラス関数を用いた時間拡張アプローチ、2 変量ソフトウェア故障発生時間分布にに基づいたアプローチの 2 種類のアプローチに基づいた 2 変量 SRGM 構築枠組みを提案した。

(3) 2 変量ソフトウェア信頼性解析手法の開発

本研究では、既存の信頼性評価尺度を含めながら、2 変量 SRGM に基づいた信頼性評価尺度の導出を行った。また、提案したモデルの実践的適用も視野に入れながら、実際のテスト工程において得られたデータに基づいたモデルパラメータの推定手法などについても、それぞれのモデリングアプローチに対して議論を行った。なお、によって構築したモデルでは、プログラム規模が所与の下で、それ以外のパラメータを最尤法により推定する手法を用いたが、理論的に適切なパラメータ推定値が得られにくいなど、実用化への問題を認識するに至った。統計学からの知見、特に計算機統計学に基づいた推定手法等を適用しながら、今後、当該問題を解決するための手法を開発する必要があるものと考えている。

続いて、上記の適用手法に基づいて、実際のソフトウェア開発工程において得られた信頼性データ（フォールト発見数データ）を

用いながら、ソフトウェア信頼性解析例を示した。図2には、その一例として、のアプローチに基づいて構築された2変量ワイブル型SRGMの推定された平均値関数(発見された総フォールト数の期待値)と実測データの時間的挙動を示す。図2より、今回議論した2変量SRGMの特徴としては、これまでの1変量SRGMとは異なり、テスト時間要因とテスト労力要因の2つの要因に依存しながらソフトウェア信頼度成長過程を曲面として記述している点である。また、推定された2変量SRGMの挙動から、たとえ長い時間テストを実施したとしても、テスト網羅度(テスト労力)が伴わない限りソフトウェア故障は追加的に観測されにくく、除去されるフォールト数はほとんど検出されない状況や、一方、短いテスト時間において高いテスト網羅度を効率的に達成できた場合、それに応じて、ソフトウェア内に潜在するフォールトが多く検出できるという状況など、1変量SRGMでは表現することができなかつたより現実的なソフトウェア信頼度成長過程を記述できていることがわかった。

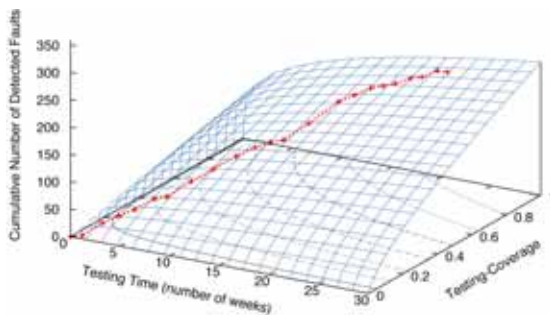


図2：推定された2変量ワイブル型SRGM。

(4)モデルの適合性評価および性能比較

今回議論した2変量ソフトウェア信頼性評価技術の有効性を検証するために、構築した2変量SRGMの実測データに対する適合性および予測妥当性について検証を行うと共に、従来の1変量SRGMとの性能比較を行った。なお、のアプローチにおいて構築されたSRGMに対しては、前述の通りパラメータ推定において理論的に適切な推定値を得ることが難しく、当該性能評価および比較に耐え得る程のパラメータ推定結果が得られなかったため、主に、のアプローチにおいて構築された2変量ワイブル型SRGMに重点をおいてモデルの適合性評価および性能比較を行った。ここでは、2変量による効果を確認するため、1変量ワイブル型SRGMおよびテスト網羅度依存型SRGMを取り上げた。また、1変量SRGMとして、多く実用に供されている指数型SRGMおよび遅延S字形SRGMも取り上げることにした。

まず、平均偏差平方和(MSE)による性能

評価を行った。MSEによる適合性比較を行った結果、本研究において提案した2変量ワイブル型SRGMは、今回取り上げた1変量SRGMよりも極めて高い精度で実測データが示すソフトウェア信頼度成長過程を表現できていることが分かった。

次に、予測妥当性の観点からモデルの性能比較を行った。当該比較結果から、提案モデルは、通常の信頼性評価開始時点(テスト進捗率60%~70%前後時点)よりも早い段階から、テスト終了時刻までに発見される総(期待)フォールト数を安定的かつ精度良く予測できていることがわかった。以上の検証結果から、実務における2変量ソフトウェア信頼性評価技術の有効性が大いに期待される結果を得た。ただし、今後も多くの実測データを採取しながらかつ様々な視点に基づきながら、提案した2変量SRGMの有効性をさらに十分に検証していく必要があるものとする。

(5)2変量SRGMのソフトウェア開発管理技術への応用

本研究において議論した2変量ソフトウェア信頼性評価技術に基づきながら、ソフトウェア開発管理に関する問題、とりわけ、ソフトウェア開発管理者が特に興味をもっている問題の1つであるソフトウェアの最適労力投入問題についても議論を行った。

ソフトウェア信頼度成長過程を2次元時間空間上で記述する2次元ソフトウェア信頼性評価技術においては、これまでの1変量SRGMに基づいた議論よりも、より現実的な議論が可能である。すなわち、契約時に決定された納期と総合テストの前工程までに費やした期間によって、総合テストの期間そのものは、ほぼ限られており、実際のソフトウェア開発管理者は、コスト最小化の下で、最適リリース時期よりもむしろ、ある程度定められた期間にどれだけのテスト労力を費やせばよいのかという問題に興味を有している。今回議論した2変量ソフトウェア信頼性評価技術に基づいた場合、上記のような現実的な問題に対してもある1つの回答を与えることができる。

本研究では、まず、2次元時間空間上において、テスト工程とそれ以後の運用段階におけるソフトウェア故障発生パターンを整理した。上述した概念に基づいたソフトウェアの最適テスト労力投入問題の解法としては、まず、各ソフトウェア故障発生領域における1個当りのフォールト修正コストやテストコストに関するコストパラメータを定義して、2変量SRGMを用いながら総期待ソフトウェアコストの定式化を行い、目的関数を導出した。また、のアプローチに基づいて構築された2変量SRGMを適用して、当該状況

下における最適なテスト労力投入量を推定するための、最適リリース政策も解析的に導出することができた。

ソフトウェア信頼度成長過程を2次元(2要因)時間軸上で記述するようなソフトウェア信頼性評価を行う枠組みにおいて、上述のように理論的かつ解析的に最適テスト労力投入問題を議論した研究成果は世界的に見ても類がないものと思われ、上述した概念に基づいた今後の研究の発展が大いに期待されるものと考えられる。

(6) 2変量ソフトウェア信頼性評価技術の体系化

上述した2変量ソフトウェア信頼性評価技術に関する研究成果は、適時、国際会議および国内学会の研究発表会等において積極的に公表した。また、研究最終年度では、当該成果の一部を国内学会論文誌にて公表でき、ソフトウェア開発管理面への応用問題も含めた研究成果を体系的に整理した内容も国内学会および国外の研究機関等においても広く公表することができた。

(7) 高精度ソフトウェア信頼性評価のための種々の1変量SRGMの開発

2種類のSRGMについて議論を行った。1つ目のSRGMとして、チェンジポイントにおけるソフトウェア故障発生率の変化を考慮したSRGMの構築枠組みおよび当該枠組みに基づいたSRGMの開発を行った。また、当該モデルに基づいて、コスト最小化の観点から、最適なチェンジポイントと出荷時期を同時に推定する問題についても議論した。2つ目としては、高精度なソフトウェア信頼性計測・評価を行うためには、実際のテスト工程におけるデバギング過程やテスト環境を陽にモデルへと反映する必要があるとの考えに基づいて、それを実現するためのモデリング手法についても議論を行った。これらの研究は、2変量ソフトウェア信頼性評価技術に関する研究と並行に行った研究であり、同様に適切な学会等において公表した。なお、これらの研究成果は、2変量ソフトウェア信頼性評価技術とは多少手法が異なる研究成果であるが、ソフトウェア信頼性評価の高精度化につながる有効なアプローチとして大いに考えられ、今後、モデルの適合性や予測妥当性、および実用性等に関する検証を行うことによって、当該アプローチの有効性を検証していく必要がある。

5. 主な発表論文等

{雑誌論文}(計10件)

Shinji Inoue and Shigeru Yamada, Software reliability measurement based on a discrete binomial model with program size, *Asia-Pacific Journal of Industrial Management*, to be appeared, 2009, 査読有

Shinji Inoue and Shigeru Yamada, Software reliability measurement with change of software failure-occurrence phenomenon, *Asia-Pacific Journal of Industrial Management*, to be appeared, 2009, 査読有

井上真二, 山田茂, 2次元ソフトウェア信頼性モデルに基づく最適リリース問題に関する一考察, 統計数理研究所共同研究レポート 229「最適化:モデリングとアルゴリズム 22」, 統計数理研究所, pp. 238-243, 2009年3月, 査読無。

Shinji Inoue and Shigeru Yamada, Optimal software release policy with change-point, *Proceedings of the 2008 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Singapore, December 8-11, 2008, pp. 531-535, 査読有。

井上真二, 山田茂, 2変量ワイブル型ソフトウェア信頼度成長モデルとその適合性評価, *情報処理学会論文誌*, Vol. 49, No. 8, pp. 2851-2861, 2008年8月。

Shinji Inoue and Shigeru Yamada, A framework for two-dimensional software reliability modeling with program size, *Proceedings of the Fourteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design*, Orlando, Florida, U.S.A., August 7-9, 2008, pp. 198-202, 査読有。

Hirofumi Kuwada, Shinji Inoue, and Shigeru Yamada, Software reliability assessment with relationships of inter-failure times before and after change-point, *Proceedings of the Fourteenth ISSAT International Conference on Reliability and Quality in Design*, Orlando, Florida, U.S.A., August 7-9, 2008, pp. 188-192, 査読有。

Shinji Inoue and Shigeru Yamada, Two-dimensional software reliability assessment with testing-coverage, *Proceedings of the Second IEEE International Conference on Secure System Integration and Reliability Improvement (SSIRI 2008)*, Yokohama, Japan, July 14-17, 2008, pp. 150-157, 査読有。

井上真二, 山田茂, プログラム規模を考慮した2次元ソフトウェア信頼性モデルとそ

の応用, 電子情報通信学会技術研究報告[信頼性], Vol. 108, No. 72, pp. 1-6, 2008年5月, 査読無.

井上真二, 山田茂, 信頼度成長要因に基づいた2次元ソフトウェア信頼性評価に関する一考察, 京都大学数理解析研究所講究録1589「不確実な状況における意思決定の理論と応用」, 京都大学数理解析研究所, pp. 104-109, 2008年4月, 査読無.

[学会発表](計5件)

井上真二, 山田茂, ソフトウェア信頼性評価のためのテスト環境を考慮した無限サーバ待ち行列モデル, 日本オペレーションズ・リサーチ学会 2009年春季研究発表会, 2009年3月, 筑波大学つくばキャンパス春日地区, 茨城県つくば市.

井上真二, 山田茂, 2変量ソフトウェア信頼性評価技術とその応用, (社)日本オペレーションズ・リサーチ学会中国・四国支部平成20年度定例シンポジウム, 2008年12月22日, RCC文化センター, 広島市中区.

桑田裕文, 井上真二, 山田茂, チェンジポイントを考慮したソフトウェア信頼性モデルに関する研究, 第10回IEEE広島支部学生シンポジウム(HISS), 2008年11月21-23日, 広島県立広島産業会館, 広島市南区.

桑田裕文, 井上真二, 山田茂, チェンジポイント前後におけるソフトウェア故障発生時間間隔の関係によるソフトウェア信頼性評価, 平成20年度電気・情報関連学会中国支部第59回連合大会, 2008年10月25日, 鳥取大学, 鳥取県鳥取市.

井上真二, 山田茂, チェンジポイントを考慮したソフトウェアの最適リリース政策, 日本オペレーションズ・リサーチ学会2008年秋季研究発表会アブストラクト集, 2008年9月10日 札幌コンベンションセンター, 札幌市白石区.

[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