

# エッジコンピューティングに対する通信環境の周期性変化 を考慮したジャンプ拡散過程モデル

山口大学大学院・創成科学研究科 田村 慶信 (Yoshinobu Tamura) <sup>†</sup>

<sup>†</sup>Graduate School of Sciences and Technology for Innovation, Yamaguchi University

日本アイ・ビー・エム 曾根 寛喜 (Hironobu Sone) <sup>††</sup>

<sup>††</sup>IBM Japan, Ltd.

東京都市大学・総合理工学研究科 上木 僚太 (Ryota Ueki) <sup>†††</sup>

<sup>†††</sup>Graduate School of Integrative Science and Engineering, Tokyo City University

鳥取大学・名誉教授 山田 茂 (Shigeru Yamada) <sup>††††</sup>

<sup>††††</sup>Emeritus Professor, Tottori University

## 1 はじめに

現在、もののインターネット (IoT) により、モノによって膨大なデータが発生している。また、これらのデータをクラウドによる一極集中で処理・記録するのではなく、分散化したエッジサーバで処理するエッジコンピューティングが普及しつつある。コンピューティングデバイスによる直接的な処理では、時間的・コスト的・能力的には劣っていることから、近傍のエッジサーバにその処理を任せることで、システム全体として一定のサービス処理能力を維持するという考え方であり、5G の普及と同時にエッジコンピューティングサービスが注目されている。

特に、オープンソースソフトウェア (Open Source Software, 以下 OSS と略す) も、低コストかつ短納期により開発できることから、クラウドサービス、組み込みシステム、サーバ、およびアプリケーションソフトウェアなど、様々な社会システムにおいて利活用されてきた [1,2]。エッジコンピューティングサービス環境にも、OSS は浸透してきており、OpenStack のようなクラウド OSS にも、StarlingX のようなエッジ OSS コンポーネントが組み込まれつつある。

しかしながら、ソースコードが公開されているため、そのセキュリティや品質上の問題 [3,4] に多くの企業が悩まされているという現状もある。こうした OSS を利用したソフトウェアシステムの品質を定量的に評価する手法は未だ提案されておらず、職人的・試行錯誤的に運用が行われているのが現状である。また、近年の OSS の運用環境について考えた場合、OSS 単体ではなく様々な連携ソフトウェアとのネットワーク経由での通信状況などを考慮することは非常に重要となる。特に、OSS は多くのバージョンアップを繰り返しながら成長する場合が多い。

こうしたエッジコンピューティングについて考えた場合、以下のような特性により、サービス環境が様々な要因によって影響を受けることが考えられる [5]。

1. メジャーバージョンアップ, マイナーバージョンアップ, およびバグフィックスバージョンアップなどに伴うバージョン改訂.
2. エッジサーバとクラウドとのデータ更新と連携処理.
3. IoT デバイスとエッジサーバ層との地理的, 物理的, および環境的なデータ連携環境の違い.
4. 有線, WiFi, 4G, および 5G のようなネットワーク環境の違い.

ソフトウェア故障やソフトウェアフォールトの出現について考えた場合、そのフォールト発見過程は従来型とは異なるといえる。従来のような一般的なウォーターフォール型の開発形態、一つの組織、または企業の集合体としての開発の場合は、開発の方向性や保守作業が定形化されている場合が多い。一方、エッジコンピューティング環境の場合には、上述したようなネットワーク、人的資源、地理的制約、人口動態など、様々な環境による影響を受けやすい。特に、情報ネットワークによる通信環境は、エッジコンピューティング環境に最も影響を与えやすい主要な環境要因であるといえる。

過去に、こうした OSS 環境を考慮したジャンプ拡散過程モデルを提案してきた。本論文では、エッジコンピューティングに対する通信環境の周期性変化を考慮したジャンプ拡散過程モデルについて議論する。その際、情報通信工学分野において信号の周期性を表現するために多用されているフーリエ級数に基づき、ノイズの周期的変化について考察する。さらに、実際のデータを利用した提案手法の数値例を示す。

## 2 ノイズの周期性をもつジャンプ拡散過程モデル

ソフトウェアの信頼性を評価するための数理モデルとして、これまでに数百におよぶソフトウェア信頼性モデルが提案されてきた [3,4]。ソフトウェア信頼度成長モデルはフォールトデータに基づいてソフトウェア信頼性が評価されるが、フォールト発生の原因となるプロジェクト状態を定量的に評価することができれば、ソフトウェア開発と運用において QCD (Quality, Cost, Delivery) の観点から最適化を図ることが可能となるものと考えられる。本論文では、ソフトウェア開発工数に基づくジャンプ拡散過程モデルについて議論する。

時刻  $t = 0$  で OSS の運用が開始され、任意の時刻  $t (t \geq 0)$  までの投入開発工数  $\Lambda(t)$  は以下の常微分方程式によって記述されるものと仮定し、これまでに、ジャンプ項を導入した [6]、以下のような Itô 型の確率微分方程式 [7,8] に基づくジャンプ拡散過程について議論してきた [9-11]。

$$d\Lambda(t) = \left\{ \beta(t) - \frac{1}{2}\sigma^2 \right\} \{\alpha - \Lambda(t)\} dt + \sigma \{\alpha - \Lambda(t)\} d\omega(t) + d \left( \sum_{i=1}^{M_t(\tau)} (V_i - 1) \right). \quad (1)$$

ここで、 $\beta(t)$  は時刻  $t$  における開発工数の変化率を、 $\alpha$  は OSS の特定バージョンのリリースに必要とされる開発工数を表す。また、 $\sigma$  は定数パラメータである。特に、 $M_t(\tau)$  は、 $\omega(t)$  とは独立な強度パラメータ  $\tau$  をもつポアソン過程であり、時刻  $t$  までにジャンプが発生した回数を表す。 $\tau$  はジャンプ事象が生じる確率的な頻度である。さらに、 $V_i$  は  $i$  回目のジャンプ幅を表す独立な確率変数である。式 (1) の確率微分方程式を Itô の公式を用いて変換すると、

$$\Lambda(t) = \alpha \left[ 1 - \exp \left\{ - \int_0^t \beta(s) ds - \sigma \omega(t) - \sum_{i=1}^{M_t(\tau)} \log V_i \right\} \right], \quad (2)$$

となる [9-11]。本論文では、開発工数の変化率  $\beta(t)$  は、簡単のために既存のソフトウェア信頼度成長モデルにおける平均値関数を流用することにより、次式を満たすものとする。

$$\beta(t) \doteq \frac{dF_*(t)}{\alpha - F_*(t)}, \quad (3)$$

$$F_e(t) = \alpha(1 - e^{-\beta t}), \quad (4)$$

$$F_s(t) = \alpha \{1 - (1 + \beta t)e^{-\beta t}\}. \quad (4)$$

ここで、 $\beta$  は開発工数の変化率を表す。本論文では、Wiener 過程およびジャンプ拡散過程のノイズ項に

対して重み関数を付与することにより、投入開発工数のサンプルパスを

$$\Lambda_{je}(t) = \alpha \left[ 1 - \exp \left\{ -\beta t - p(t)\sigma\omega(t) - q(t) \sum_{i=1}^{M_t(\tau)} \log V_i \right\} \right], \quad (5)$$

$$\Lambda_{js}(t) = \alpha \left[ 1 - (1 + \beta t) \exp \left\{ -\beta t - p(t)\sigma\omega(t) - q(t) \sum_{i=1}^{M_t(\tau)} \log V_i \right\} \right], \quad (6)$$

と定義する．ここで、情報通信工学分野特有の、通信環境におけるノイズの変化を周期的であるものと仮定する．このとき、フーリエ級数展開に基づく以下のような重み関数を定義する．

$$p(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos \left( \frac{2\pi n t}{T} \right) + b_n \sin \left( \frac{2\pi n t}{T} \right) \right]. \quad (7)$$

ここで、 $n$  はサイクル回数、 $T$  は実際のデータ数を表す．このとき、各パラメータは以下のように定義される．

$$a_0 = 0, \quad a_n = 0, \quad b_n = \frac{2}{n\pi} \{1 - (-1)^n\}.$$

このとき、 $q(t)$  は、 $p(t)$  の Y 軸に対して対象となる以下のような関数として定義する．

$$q(t) = \frac{a_0}{2} - \sum_{n=1}^{\infty} \left[ a_n \cos \left( \frac{2\pi n t}{T} \right) - b_n \sin \left( \frac{2\pi n t}{T} \right) \right]. \quad (8)$$

情報通信ネットワークにおける研究分野について考えた場合、フーリエ級数に基づく通信環境の数学的表現は、ネットワーク工学の観点からも周期信号や周波数を数学的に取り扱う際に多用されている．本論文では、こうした情報通信工学の分野において多用されているフーリエ級数に基づき、ネットワーク環境からの影響を周期的に変化するノイズとして考える．

提案モデルに含まれているパラメータ  $\alpha$ 、 $\beta$ 、および  $\sigma$  については、通常確率モデルにおいて一般的に知られている最尤推定法を適用する．本論文におけるジャンプ拡散過程モデルについては、Wiener 過程とジャンプ拡散過程の混合確率過程であることから、パラメータ推定については、その取り扱いが難しいことも知られている．例えば、その代表的なものとしてモーメント法なども提案されているが、決定的なパラメータ推定法は提案されていない．一方、ジャンプ項に含まれるパラメータ集合  $\theta$  は一般には既知ではないので、実測データなどの利用可能なデータを使って値を推定しなければならない．本論文における提案モデルは、混合確率過程であることから、異なる確率過程とデータ構造の統計的独立性という観点から、ジャンプ項に含まれるパラメータ集合  $\theta$  については、実測データと提案モデルとの誤差関数を目的関数とし、この目的関数を最小化するために、遺伝的アルゴリズムを適用した [12–14]．

### 3 数値例

*OpenStack* プロジェクト [15] から得られた開発工数データに基づく数値例を示す．図 1 および図 2 は、 $\Lambda_{je}(t)$  および  $\Lambda_{js}(t)$  の場合における推定された累積開発工数を表す．次に、 $n = 3$  の場合における重み関数  $p(t)$  および  $q(t)$  の推定結果を図 3 に示す．この場合、 $n$  の値を大きくするほど、矩形波に近づくことが分かる．

さらに、 $p(t)$  および  $q(t)$  の場合におけるノイズ項  $N_w(t)$  および  $N_j(t)$  に対する推定結果を図 4 および図 5 に示す．

$$N_w(t) = p(t)\sigma\omega(t), \quad (9)$$

$$N_j(t) = q(t) \sum_{i=1}^{M_t(\tau)} \log V_i. \quad (10)$$

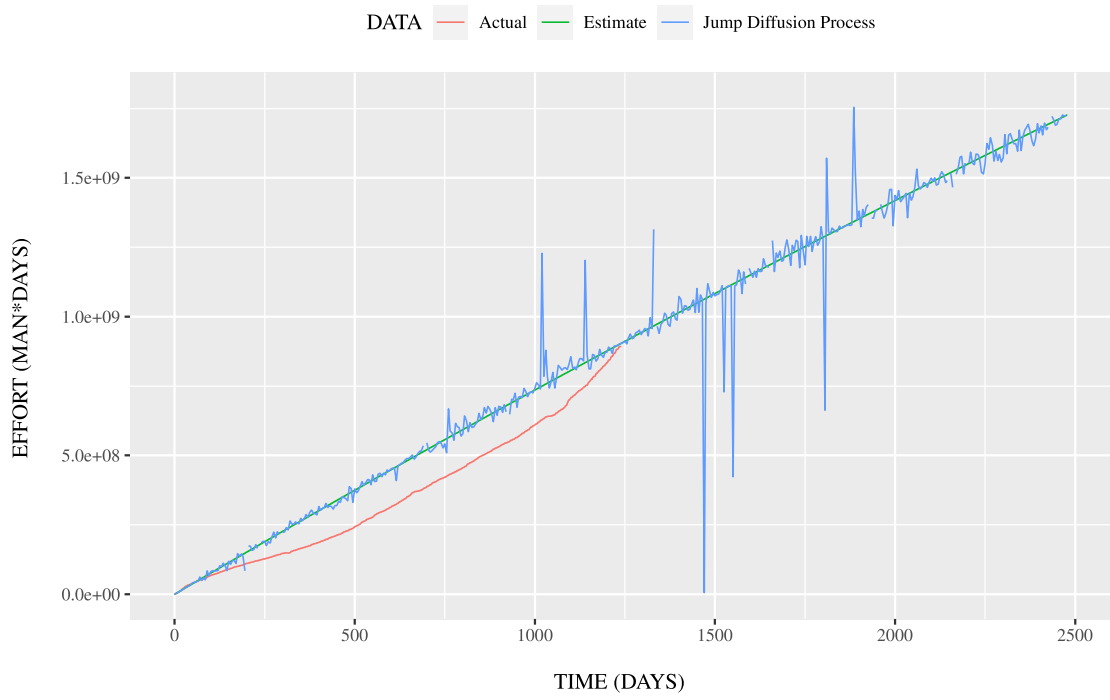


図 1 :  $\Lambda_{je}(t)$  の場合における推定された投入開発工数のサンプルパス.

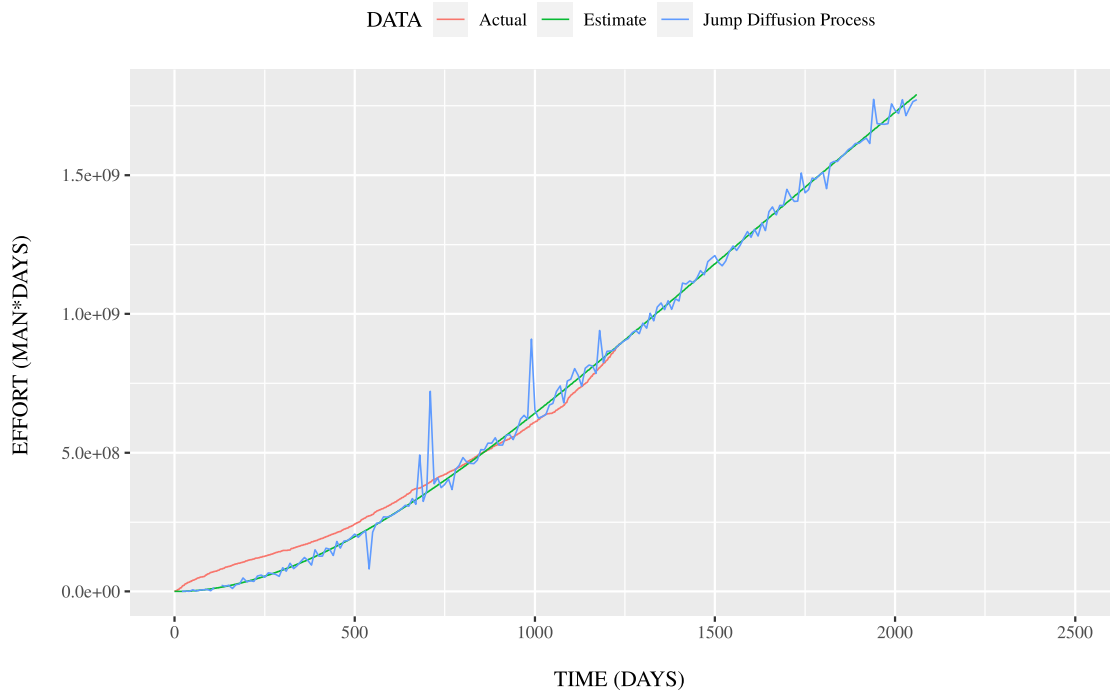


図 2 :  $\Lambda_{js}(t)$  の場合における推定された投入開発工数のサンプルパス.

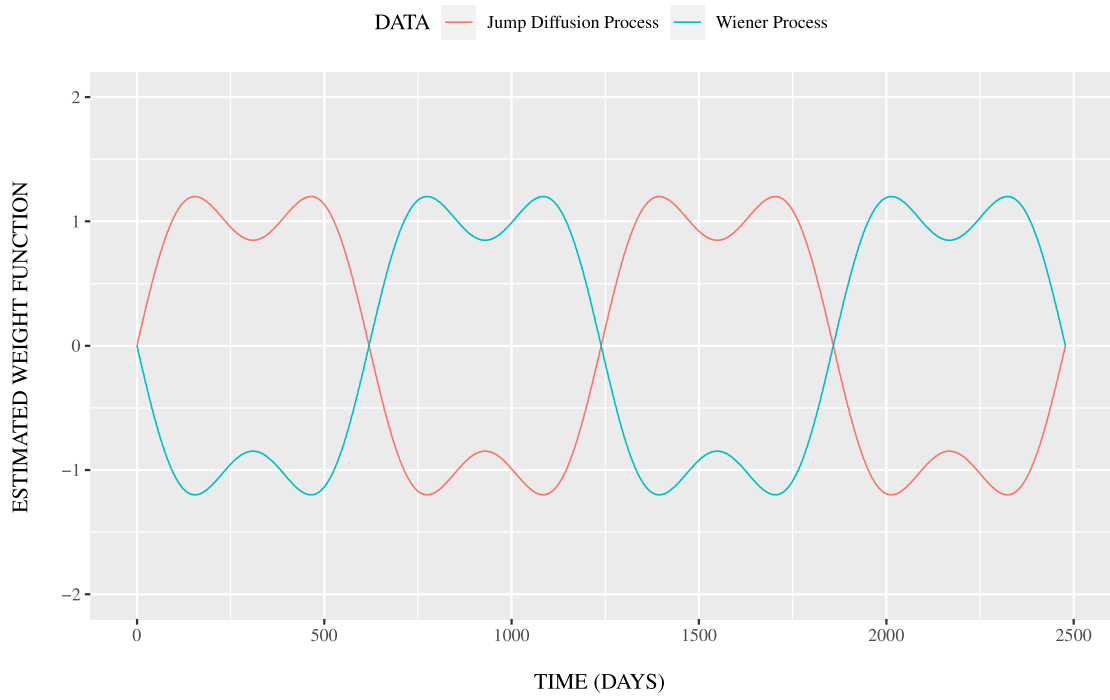


図 3 :  $\Lambda_{je}(t)$  および  $\Lambda_{js}(t)$  の場合における推定された重み関数  $p(t)$  および  $q(t)$ .

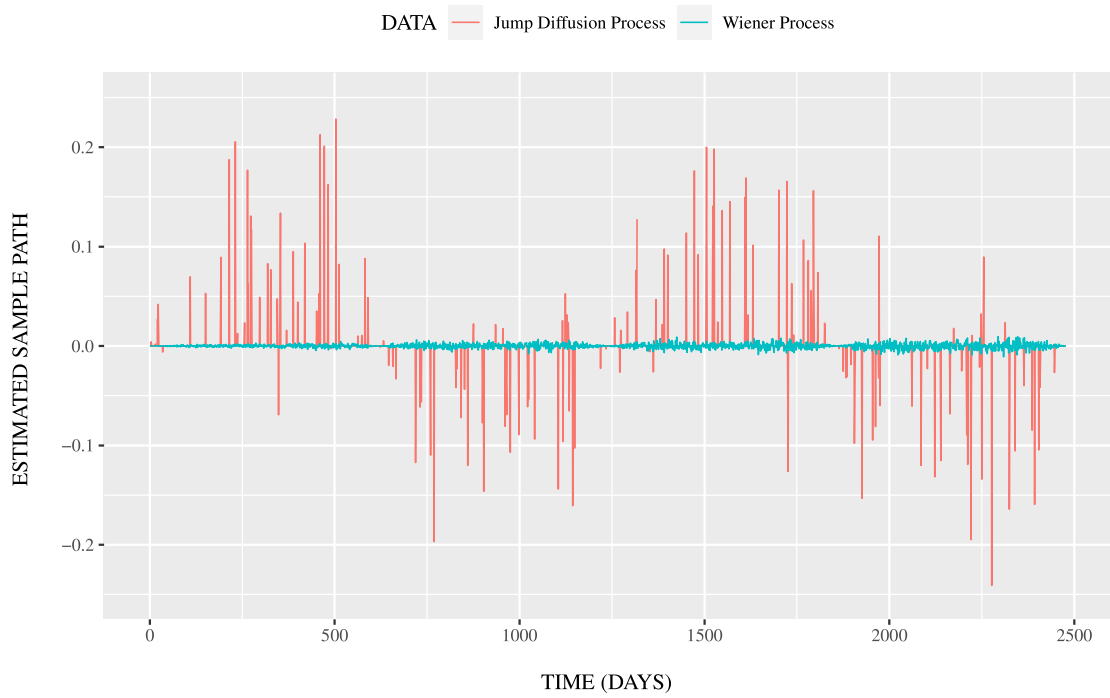


図 4 :  $\Lambda_{je}(t)$  の場合における推定された  $N_w(t)$  および  $N_j(t)$  のサンプルパス.

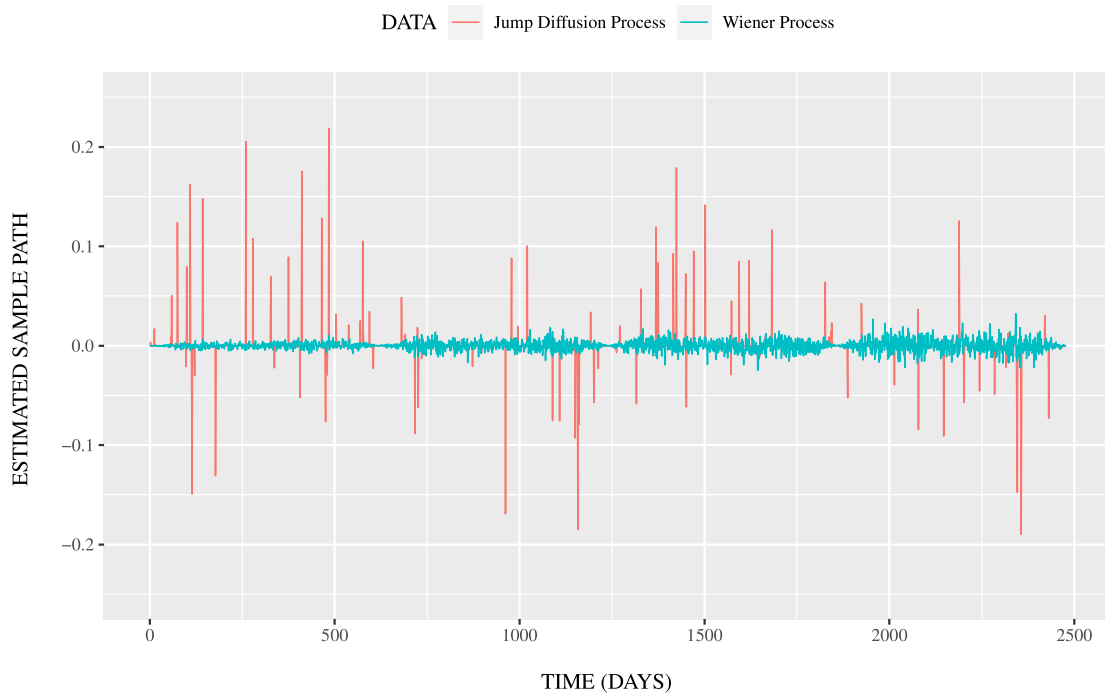


図 5:  $\Lambda_{j_s}(t)$  の場合における推定された  $N_w(t)$  および  $N_j(t)$  のサンプルパス。

## 4 おわりに

ソフトウェア信頼性分野における研究者により、数百にのぼるソフトウェア信頼度成長モデルが精力的に開発されてきた。開発工数とフォールトの関係性に着目した場合、これら両者には原因と結果のような依存関係が存在する。例えば、テスト労力依存型ソフトウェア信頼度成長モデルは、その典型的な一例である。開発工数を適切に管理することは、フォールト発生抑制につながるものと考えられる。

過去に、開発工数を予測するためのジャンプ拡散過程モデルをいくつか提案してきた。本論文では、情報通信工学の分野において多用されているフーリエ級数に基づき、ネットワーク環境からの影響が周期的に変化するノイズとして考えた。このとき、エッジコンピューティング環境を再現することを目指し、Wiener 過程とジャンプ拡散過程の独立したノイズ項に対して重み関数を取り入れることにより、具体的な数値例とともに提案モデルについて議論した。

## 謝辞

本研究の一部は、JSPS 科研費基盤研究 (C) (課題番号 20K11799) の援助を受けたことを付記する。

## 参考文献

- [1] S. Yamada and Y. Tamura, *OSS Reliability Measurement and Assessment*, Springer International Publishing, Switzerland, 2016.
- [2] J. Norris, “Mission-critical development with open source software,” *IEEE Software Magazine*, Vol. 21, No. 1, pp. 42–49, 2004.
- [3] S. Yamada, *Software Reliability Modeling: Fundamentals and Applications*, Springer-Verlag, Tokyo/Heidelberg, 2014.

- [4] P.K. Kapur, H. Pham, A. Gupta, and P.C. Jha, *Software Reliability Assessment with OR Applications*, Springer-Verlag, London, 2011.
- [5] S. Wang, Y. Zhao, J. Xu, J. Yuan, and C.H. Hsu, “Edge server placement in mobile edge computing,” *Journal of Parallel and Distributed Computing*, Vol. 127, pp. 160-168, 2019.
- [6] R.C. Merton, “Option pricing when underlying stock returns are discontinuous,” *Journal of Financial Economics*, Vol. 3, Issues 1–2, pp. 125–144, 1976.
- [7] L. Arnold, *Stochastic Differential Equations—Theory and Applications*. John Wiley & Sons, New York, 1974.
- [8] S. Yamada, M. Kimura, H. Tanaka, and S. Osaki, “Software reliability measurement and assessment with stochastic differential equations,” *IEICE Transactions on Fundamentals*, Vol. E77–A, No. 1, pp. 109–116, 1994.
- [9] Y. Tamura, H. Sone, and S. Yamada, “Productivity assessment based on jump diffusion model considering the effort management for OSS project,” *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering* (World Scientific), Vol. 26, No. 5, pp. 1950022-1–1950022-22, 2019.
- [10] Y. Tamura, H. Sone, K. Sugisaki, and S. Yamada, “A method of parameter estimation in flexible jump diffusion process models for open source maintenance effort management,” *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, Macau, China, December 15-18, 2019, CD-ROM (Reliability and Maintenance Engineering 2).
- [11] Y. Tamura, H. Sone and S. Yamada, “Flexible jump diffusion process models for open source project with application to the optimal maintenance problem,” *International Journal of Reliability, Quality and Safety Engineering*, Vol. 27, No. 6, World Scientific, pp. 2050020-1–2050020-18, 2020.
- [12] Y. Tamura and S. Yamada, “Maintenance effort management based on double jump diffusion model for OSS project,” *Annals of Operations Research*, DOI: 10.1007/s10479-019-03170-w, Springer US, Online First, pp. 1-16, February 2019.
- [13] J.H. Holland, *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975.
- [14] K. Sugisaki, Y. Tamura, and S. Yamada, “OSS effort expense optimization based on Wiener process model and GA,” *Journal of Software Engineering and Applications*, Vol. 14, No. 1, pp. 11-25, 2021.
- [15] The OpenStack project, Build the future of Open Infrastructure, <https://www.openstack.org/>