

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2019

課題番号：17K00033

研究課題名(和文)非マルコフモデルに対する位相型近似の適用可能性の拡大

研究課題名(英文)Expansion of Applicability of Phase Approximation for Non-Markovian Models

研究代表者

岡村 寛之 (Okamura, Hiroyuki)

広島大学・工学研究科・教授

研究者番号：10311812

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では MRGP における位相型近似における精度保証ならびに状態爆発の問題を解消し、実用面における位相型近似の適用可能性を拡大した。特に、位相型近似に対する精度保証として確率順序による上下限値の評価および全変動距離による評価を行った。さらに、状態爆発の問題に対しては位相型近似したマルコフモデルに対する完全サンプリングの開発を行った。完全サンプリングでは上下限値を得るための数理計画問題を定義し、これをSMTソルバで解くことによって、より広いクラスのモデルに対して適用することを可能にした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ここで得られた成果は位相型近似で従来から指摘されてきた精度保証と状態爆発の問題をある程度可決し、その適用可能性を大幅に向上させた。確率モデルによるシステム評価は、これからIoT/CPSシステムで利用されるモデルベース開発などでのシステム検証に対して有効である。そのため、ここで得られた成果はシステム全体の高信頼化に対して大きく寄与するものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：This project partially solved the problems of accuracy guarantee and state explosion in the phase type approximation in MRGP, and expanded the applicability of the phase type approximation in practical use. In particular, as the accuracy guarantee for the phase approximation, we evaluated the upper and lower bounds by using the stochastic order and the total variation. Furthermore, we have developed perfect sampling for Markov model with phase type approximation, and relaxed the problem of state explosion. In perfect sampling, we defined a mathematical programming problem to obtain the upper and lower bounds of system states, and it is solved with an SMT solver. Our algorithm made it possible to apply the perfect sampling to a wide class of models.

研究分野：情報学

キーワード：システムモデリング 位相型近似 性能評価 マルコフモデル シミュレーション

1. 研究開始当初の背景

背景と関連研究

近年、IoT (Internet of Things) や CPS (Cyber Physical System) などのこれまでにない形態のシステム開発が進められている。IoT や CPS では、システムがこれまで以上に我々の生活に深く入り込むため、信頼性や安全性の確保が大きな問題となる。信頼性や安全性の確保には、設計段階でシステムのふるまいをモデル化し、システムが正しく動作することを定性的・定量的に検証することが重要となる。一般に、モデルによるシステム動作検証ではシステム状態とその時間変化に着目した状態依存型のモデル化を行い、そのモデルを分析することで障害状態へ至る確率などの定量評価を行うことができる。状態依存型のモデル化にはマルコフ連鎖が使われることが多い。マルコフ連鎖は状態遷移時間が指数分布(離散時間の場合は幾何分布)によって決定することを仮定したモデル化であり、解析的な取り扱いの容易さから様々なシステムモデリングに用いられてきた。実際、確率的モデル検査ツールとして有名な PRISM (<http://www.prismmodelchecker.org>)でも離散時間・連続時間マルコフ連鎖によるモデル化が基本となっている。

一方で、マルコフ連鎖は状態間の推移時間が仮定されているので、リアルタイムシステムなどのように確定的な時間内での処理制約があるようなシステムの振る舞いを正確に表現することができない。リアルタイム性は IoT や CPS では必須であるため、マルコフ連鎖を用いた IoT、CPS の検証結果が現実とかけ離れるリスクがある。これを解決するためには、状態遷移時間を一般分布(確定的な時間も含む)で表現することが必要となる。

一般分布による状態遷移を含むモデルは非マルコフモデルと呼ばれ、マルコフモデルと比べて解析が格段に難しくなる。非マルコフモデルの記述方法のうち本研究では MRGP (Markov Regenerative Process) と呼ばれる確率点過程に着目する。MRGP は発生時間間隔が一般分布に従う再生点と、発生時間分布が指数分布あるいは幾何分布に従う非再生点が混在した離散状態の確率点過程であり、通常マルコフ連鎖やセミマルコフ過程などを包括する一般的な確率点過程である。申請者自身も平成 26~28 年度基盤研究(C)「MRSPN/MRGP 解析の自動化に向けたスケーラブルアルゴリズムの開発」においてシステム動作を検証するための基盤技術として MRGP を取り扱っている。MRGP は数理的に解析可能な確率点過程のクラスであり、隠れマルコフ連鎖による定常解析(定常状態の状態確率を算出)を行うことができる。一方、現実のシステム検証では「時間制約を違反する障害が起きるかどうか」などの検証を行うため、定常解析よりも過渡解析(任意時間における状態確率を算出)が必要になることが多い。MRGP に対する過渡解析は定常解析よりも困難であり、一般分布を何らかの近似によって表現することが必要となる。位相型近似(Phase-Type Approximation)は MRGP の過渡解析を実現するための有力な手法として位置づけられている。

解決すべき課題

位相型近似(Phase-Type Approximation)とは一般分布をマルコフ連鎖で定義される位相型分布(Phase-Type Distribution)や、一般の確率点過程をマルコフ到着過程(Markovian Arrival Process)で置き換える手法である。位相型分布やマルコフ到着過程はマルコフ連鎖で定義されるため、近似された非マルコフモデルがマルコフモデルに帰着できる。つまり、近似されたモデルに対して通常マルコフ連鎖の定常・過渡解析手法が直接適用できる。一方、位相型近似は次の欠点を持つ:(i) 精度保証が困難、(ii) 状態数の増加。(ii)の問題については、平成 26~28 年度基盤研究(C)「MRSPN/MRGP 解析の自動化に向けたスケーラブルアルゴリズムの開発」でクロネッカー表現を用いることである程度解決された。しかしながら、精度保証の問題においては世界的にも未解決の問題である。

2. 研究の目的

研究課題の目的と特徴

本研究では MRGP における位相型近似における精度保証ならびに状態爆発の問題を解消し、実用面における位相型近似の適用可能性を拡大することを目指す。

伝統的に位相型近似はモーメントマッチにより行われており、近似精度は近似する分布のモーメントとどれくらいまで一致させるかで制御していた。しかし、モーメントマッチにより高精度の近似を行うことに限界があり、近年ではカルバック・ライブラー情報量に基づいた手法に移行しつつある。カルバック・ライブラー情報量による手法は近似したい分布とのカルバック・ライブラー情報量を最小にするように位相型分布を決定するが、カルバック情報量そのものが単純に誤差を表すものではないため「どのくらいカルバック・ライブラー情報量を小さくすればよいかの判断が困難」というのが位相型近似の精度が厳密に保証できない原因となっている。この問題に対して、本研究では、(a) 確率順序による上下限値の評価、(b) 全変動距離による誤差限界の評価という二つの観点から位相型近似の精度保証を試みる。これは従来まで考えられていた単純なモーメントや二乗誤差の概念ではなく、全く新しい発想で確率的視点から誤差の評価を与えることをねらっている。

状態爆発の問題については、平成 26~28 年度基盤研究(C)「MRSPN/MRGP 解析の自動化に

向けたスケーラブルアルゴリズムの開発」でクロネッカー表現を用いることである程度の規模の問題について扱えるようになった。しかしながら、IoT や CPS などのより大規模かつ複雑なシステムの検証では、状態の増加に対する問題は避けて通れない。本研究では、10 の 10 乗から 30 乗程度の状態を有する MRGP に対する解析手法として、シミュレーションによるアプローチを再考する。よく知られているようにシミュレーションによるアプローチは一般分布の取り扱いが容易であるため、位相近似を行う必要はない。しかしながら、位相型近似を適用することでマルコフ連鎖に対して開発された完全サンプリング (Perfect Sampling) 手法や重点サンプリング (Importance Sampling) などの効率的な手法を組み合わせることができるという利点がある。一方で、先の精度保証と合わせることで、単純なモンテカルロシミュレーションを行うよりも精度を保証した上で、より効率のよいシミュレーションを実行できることが期待される。さらに、パラメータの感度解析も評価における重要な視点として考えられるため、シミュレーションに基づいた感度解析についても検討する。

期待される効果

位相型近似は近似した後のモデルがマルコフ連鎖に帰着でき、マルコフ連鎖の解析技術が直接使えることから古くから大きな期待が寄せられていた。しかしながら、「パラメータをどう決めるのか」などの実用面での問題が解決されなかったため、現在でもあまり普及しているとは言えない。現在の最新アルゴリズムでは数百の位相数を扱えるアルゴリズムの開発がなされ、さらにそれを実装したツールなどの配布により、高い精度の近似を手軽に得ることができる環境が整備されている。一方で、位相型近似の精度を保証するためのスキームが確立されてないことから、現実の問題に対して利用できるレベルに至っていない事実がある。そのため、実用的な誤差規範のもとで位相型近似の精度が保証されることで、位相型近似による評価体型の利用が様々な分野で一気に加速するものと考えられる。また、その精度保証を加味した上で、完全サンプリングや重点サンプリングなどと統合されたシミュレーション技術を開発することで、シミュレーションによる確率的モデル検査などの発展が見込まれる。現在、モデル検査などはソフトウェアの動作検証に有効な手段と考えられているが、状態数の問題により利用できる範囲が限られている。そこに対して、精度が保証された完全サンプリングなどを用いたモデル検査が実現できれば非常に大きなブレークスルーとなり得る。

3. 研究の方法

研究計画と方法概要

本研究は、次の目標から構成される。

- (a) 位相型近似の精度保証技術の確立、
- (b) 位相型近似を応用したシミュレーション技術の開発、
- (c) ツールの作成。

さらに、各目標は次のタスクに分割される。位相型近似の精度保証技術の確立は、

- (a-1) 確率順序による上下限値の評価、
- (a-2) 全変動距離による誤差評価

により達成される。また、位相型近似を応用したシミュレーション技術の開発は、

- (b-1) 位相型近似を応用した重点サンプリングの開発、
- (b-2) 位相型近似を適用したモデルに対する完全サンプリングの開発

に分割される。さらにツールの作成は

- (c-1) 計算ライブラリの構築
- (c-2) パッケージの開発

により達成される。

研究計画

全体の研究スケジュールは以下の通りとなる。

平成 29 年 4 月 ~ 平成 30 年 3 月 (a) 位相型近似の精度保証技術の確立
平成 30 年 4 月 ~ 平成 31 年 3 月 (b) 位相型近似を応用したシミュレーション技術の開発
平成 29 年 10 月 ~ 令和 2 年 3 月 (c) ツールの作成

平成 29 年度は主に位相型近似の精度保証の確立とツールの作成に関する一部の作業を行う。

(a) 位相型近似の精度保証の確立

位相型近似の精度保証では、(a-1) 確率順序による上下限値の評価と (a-2) 全変動距離による誤差評価を行う。なお (a-1) で開発するアルゴリズムの有効性の検証を行う。

(a-1) 確率順序による上下限値の評価

位相型分布はマルコフ連鎖によって定義される。位相型分布を定義するマルコフ連鎖の状態数を位相数、状態遷移の構造を位相構造と呼び、位相数と位相構造により近似精度が変わる。位相

構造については、多くの場合、標準形と呼ばれる位相型分布を用いる。標準形は隣の状態への遷移だけが許されると言う非常に単純な位相構造をもっている。そのため、ある標準形が与えられた時、その標準形よりも確率順序の意味で小さい/大きい分布を容易に作成することができる。本研究ではこの性質を利用して、与えられた一般分布よりも確率順序の意味で小さい/大きい位相型分布を同定するアルゴリズムの開発を行う。このアルゴリズムの開発によって、一般分布に対して単調な性質をもつ MRGP で記述されるシステムの性能指標などの上下限值を得ることができる。また、裾の重い分布に対しては厳密な意味で大きい分布を得ることができないため、確率順序を緩和したもので対応することを考える。

(a-2) 全変動距離による誤差評価

全変動距離とは確率測度に関する一つの距離である。一般的に全変動距離とカルバック・ライブラー情報量の関係は Pinsker の不等式で与えられ、これによりカルバック・ライブラー情報量を用いた位相近似のある種の精度保証が得られる。一方で、位相近似したモデルから算出されるシステムの性能評価指標に対する全変動距離による誤差評価は明らかになっていない。ここでは、モデルクラスをいくつか仮定した上で、性能評価指標に対する誤差評価に関する解析的な結果を導出する。一方で、大偏差理論とカルバック・ライブラー情報量の関係、その他の情報理論における既知の結果を調査し、それらを用いたアプローチも試みる。特に、大偏差理論との関係は (b-1) で行う重点サンプリングの開発ともつながる。

平成 30 年度以降は、位相型近似を応用したシミュレーション技術の開発およびツールの開発を行う。

(b) 位相型近似を応用したシミュレーション技術の開発

シミュレーション技術の開発およびツールの開発では

(b-1) 位相型近似を応用した重点サンプリングの開発、

(b-2) 位相型近似を適用したモデルに対する完全サンプリングの開発、
を行う。

(b-1) 位相型近似を応用した重点サンプリングの開発

重点サンプリングは希にしか起こらないイベント(レアイベント)などの評価に重要である。標本を生成する分布(シミュレーション分布)による測度変換でレアイベントの発生確率を高くし、シミュレーション分布に応じた重みによる加重平均で性能評価指標を算出する。位相型近似で MRGP をマルコフ連鎖に帰着させることで、Twisted マルコフ連鎖などのマルコフ連鎖に対する重点サンプリングを利用できる。また、カルバック・ライブラー情報量による位相型近似とクロスエントロピー法による重点サンプリングを統合した新しい重点サンプリングの枠組みの構築も行う。

(b-2) 位相型近似を適用したモデルに対する完全サンプリングの開発

マルコフ連鎖における完全サンプリングは厳密に定常分布に従うサンプル生成させる手法あり、定常状態とみなせる状態までシミュレートする必要がない。MRGP では一般分布による状態遷移があるため完全サンプリングの取り扱いが非常に難しい。一方、位相型近似によってマルコフ連鎖に帰着させた場合は直接適用することができる。本研究では、位相型近似により生成されたマルコフ連鎖に対する完全サンプリングの開発を行う。具体的に、完全サンプリングでは更新関数と呼ばれる推移を決定する関数を単調性を持つように決定することが重要になるが、位相近似されたマルコフ連鎖の構造的な特徴から、効率的な更新関数の決定アルゴリズムを開発する。

(c) ツールの作成

ツールの作成は

(c-1) 計算ライブラリの構築、

(c-2) R/MATLAB/Mathematica パッケージの開発
からなる。

(c-1) 計算ライブラリの構築

本研究では開発したアルゴリズムを利用できるパッケージの開発を行う。そのため、開発されたアルゴリズムが様々なツールから呼び出されるように汎用的なプログラム言語によってアルゴリズムの実装を行う。これらは GitHub によって適切に管理される。

(c-2) パッケージの開発

計算アルゴリズムの普及の観点から、様々な分野で標準的に利用される統計分析ツール R、数値解析ツール MATLAB、数式処理ツール Mathematica のパッケージなどでの利用を視野に入れて作成する。これらも GitHub を利用して適切に管理ならびに配布が行われる。

4. 研究成果

平成 29 年度は主に位相型近似の精度保証の確立とツールの作成に関する一部の作業を行った。具体的には、位相型近似の精度保証の確立する手段として確率順序による上下限値の評価を行った。位相型分布はマルコフ連鎖によって定義される。位相型分布を定義するマルコフ連鎖の状態数を位相数、状態遷移の構造を位相構造と呼び、位相数と位相構造により近似精度が変わる。位相構造については、多くの場合、標準形と呼ばれる位相型分布を用いる。標準形は隣の状態への遷移だけが許されると言う非常に単純な位相構造をもっている。そのため、ある標準形が与えられた時、その標準形よりも確率順序の意味で小さい/大きい分布を容易に作成することができる。この性質を利用して与えられた一般分布よりも確率順序の意味で小さい/大きい位相型分布を同定するアルゴリズムの開発を行った。このアルゴリズムの開発によって、一般分布に対して単調な性質をもつ MRGP で記述されるシステムの性能指標などの上下限値を得ることができるようになった。また、裾の重い分布に対しては厳密な意味で大きい分布を得ることができないため、確率順序を緩和したもので対応した。ここで得られた結果の精度を検証するため、平成 30 年度に予定していたシミュレーション技術開発を前倒しし、位相近似を確率モデルに適用した際の完全サンプリングに関する研究を一部行った。マルコフ連鎖における完全サンプリングは厳密に定常分布に従うサンプル生成させる手法あり、定常状態とみなせる状態までシミュレートする必要がない。本研究では MRGP を位相型近似によってマルコフ連鎖に帰着させた上で、マルコフ連鎖に対する完全サンプリング手法の適用を行った。特に、位相型近似により生成されたマルコフ連鎖では構造的な特徴があるため、その構造的な特徴から効率的な更新関数の決定するアルゴリズムの開発を行った。

平成 30 年度は主にマルコフモデルのシミュレーション技術の開発とツール作成に関する一部の作業を行った。具体的には、位相型近似を行った非単調なマルコフ連鎖に対するパーフェクトサンプリング手法の開発を行った。特に、パーフェクトサンプリング手法では、応用面を鑑みて、マルコフモデルよりも詳細なシステム記述が可能な確率ペトリネットに対して SMT ソルバを用いた手法の開発を行った。また確率ペトリネットよりもより広いクラスである一般化確率ペトリネットに対する SMT ソルバを用いたパーフェクトサンプリング手法の開発も行った。一般化確率ペトリネットは一般的な確率モデルの位相型近似として得られる。そのため、ここで開発した技術により、ほとんどすべての確率モデルに対して効率的なパーフェクトサンプリングを行うことが可能となった。さらに、それらを Python によって実装したツールの開発も行った。さらに精度保証の観点から、全変動距離とコルモゴロフ・スミルノフ検定統計量の類似性を用いて位相型分布の精度を統計的な検定によってテストする手法の開発を行った。一方、パーフェクトサンプリングより加速させる手法として、クロスエントロピー法と組み合わせるアプローチを展開した。現時点では定常確率に対する重み計算のためペトリネットの状態を予め導出する必要があり、従来の MDD (Multi-valued Decision Diagram) を用いた手法などとの組み合わせを検討している。

令和元年度はパーフェクトサンプリングの高速化ならびにツール開発を行った。開発したパーフェクトサンプリングでは SMT ソルバを複数回解く必要があるため、一つのサンプルを選ぶまでの時間が長い。しかしながら、SMT ソルバで解くべき問題は各ステップでほとんど同一であるため類似性を利用した高速化の検討を行った。一般に SMT ソルバでは矛盾する節を発見して伝搬することで探索範囲を小さくする。本手法でも前のステップの上下限を得る際に得られた矛盾節などの情報を次のステップの上下限を得るために利用することで高速化が期待できる。しかしながら、汎用的に利用できる SMT ソルバでは、その情報の保存が難しい。そのため、元の問題を CSP (制約充足問題) として再記述して CSP ソルバの自作による再構築を行った。これにより、前回までの充足問題を解く際の情報を保存することに成功した。また、CSP から整数計画問題としての定式化も行い、実験を通じて、これらの比較を行い高速化の検討を行った。一方、位相型近似の頑強性を検討するため、位相型近似で得られる位相分布パラメータに対する感度解析手法を検討した。具体的には、位相型近似を実現する EM アルゴリズムに対して推定値の微分値を求めるアルゴリズムを組み込むことを行った。頑強性は実用的な推定に必要な一つの要素であり、これをもとにして位相型分布の近似精度を評価するアプローチを検討した。また上述の計算は Julia 言語で行われ一般的なパッケージとして利用できるように整理を行った。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 C. Li, H. Okamura, T. Dohi	4. 巻 7
2. 論文標題 Parameter Estimation of Mt/M/1/K Queueing Systems With Utilization Data	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 42664-42671
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） http://dx.doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2906796	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -
1. 著者名 Junjun Zheng, Hiroyuki Okamura, Tadashi Dohi	4. 巻 3
2. 論文標題 Reliability importance of components in a real-time computing system with standby redundancy schemes	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 International Journal of Mathematical, Engineering and Management Sciences	6. 最初と最後の頁 64-89
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） https://dx.doi.org/10.33889/IJMEMS.2018.3.2-007	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 -
1. 著者名 Hiroyuki Okamura, Tadashi Dohi, Kishor Trivedi	4. 巻 -
2. 論文標題 Parametric Uncertainty Propagation through Dependability Models	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Proceedings of Latin-American Symposium on Dependable Computing	6. 最初と最後の頁 9
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 J. Zheng, H. Okamura, L. Li, T. Dohi	4. 巻 66
2. 論文標題 A comprehensive evaluation of software rejuvenation policies for transaction systems with Markovian arrivals	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Reliability	6. 最初と最後の頁 1157-1177
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TR.2017.2741526	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 -

1. 著者名 H. Okamura, J. Zheng, T. Dohi	4. 巻 -
2. 論文標題 A statistical framework on software aging modeling with continuous-time hidden Markov model	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 36th International Symposium on Reliable Distributed Systems	6. 最初と最後の頁 114-123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/SRDS.2017.24	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 -

1. 著者名 H. Okamura, T. Dohi	4. 巻 -
2. 論文標題 A generalized bivariate modeling framework of fault detection and correction processes	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Proceedings of the 26th International Symposium on Software Reliability Engineering	6. 最初と最後の頁 35-45
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISSRE.2017.22	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 -

〔学会発表〕 計4件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件)

1. 発表者名 張家豪, 鄭俊俊, 岡村寛之, 土肥正
2. 発表標題 階層型フォールトツリーの感度解析に関する考察
3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会春季研究発表会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 J. Zhang, J. Zheng, H. Okamura, T. Dohi
2. 発表標題 A Moment-Based Approximation for Uncertainty Propagation in Fault Trees
3. 学会等名 24th IEEE Pacific Rim International Symposium on Dependable Computing (PRDC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Okamura, J. Zheng, T. Dohi
2. 発表標題 On Algorithm for High-Order Derivatives of Markov Reward Models
3. 学会等名 11th International Conference on Mathematical Methods in Reliability (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡村寛之, 森原和也, 土肥正
2. 発表標題 SMTソルバを用いた確率ペトリネットのパーフェクトサンプリングアルゴリズム
3. 学会等名 2018 年度待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」
4. 発表年 2019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