

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 14 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2016

課題番号：26330028

研究課題名(和文) 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

研究課題名(英文) Development of Scalable Algorithms of MRSPN/MRGP Analysis for the Automation

研究代表者

岡村 寛之 (Okamura, Hiroyuki)

広島大学・工学研究院・准教授

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)：本研究課題では MRSPN (Markov Regenerative Stochastic Petri Net) ならびに MRGP (Markov Regenerative Process) に対する解析アルゴリズムの開発を行った。特に、大規模 MRSPN に対する解析手法、および、システムの性能評価で必須となるシステムの過渡状態を評価するための過渡解析手法の開発を行った。さらに、それらを実装したツールの作成を行った。

研究成果の概要(英文)：The project developed algorithms to analyze MRSPN (Markov Regenerative Stochastic Petri Net) and MRGP (Markov Regenerative Process). Especially, the project dealt with the transient analysis to derive quantitative system performance measures for MRSPN with a large number of states. Moreover, the tool was also developed which implements the new algorithms.

研究分野：信頼性工学

キーワード：システム工学 性能評価 確率モデル ペトリネット モデル検査

1. 研究開始当初の背景

現在、多くのシステムにおいて UML (Unified Modeling Language) や SysML (Systems Modeling Language) のような形式的な言語を用いたシステム設計が主流となりつつある。UML/SysML はシステムにおけるコンポーネント構成やそれらの相互作用を、図を用いて記述する体系であり、OMG (Object Management Group) が世界統一の標準規格として管理している。

UML/SysML による設計が広く普及する一方で、UML/SysML の形式的な記述から最終製品であるシステムのふるまいをシミュレートし、要求される品質が確保されるかどうかを設計段階で評価する試みがなされている。これらの多くは UML/SysML におけるシステムのふるまいを表す図 (シーケンス図、アクティビティ図、ステートマシン図など) を何らかのモデル記述に変換した上で解析を行う。Distefano ら [1] は、UML から性能評価を行う独自の記述である PCM (Performance Context Model) に変換することで、システムの動的なふるまいを定量的に評価する体系を提案している。Distefano らの手法における弱点は、PCM が独特な記述であるために、汎用的なツールとの互換性が乏しい点にある。例えば、UML や SysML の設計情報から、システムが好ましくない状態へ推移しないかどうかを検査することは重要であり、これはモデル検査と呼ばれる手法で解析することができる。UML/SysML から一般的な状態遷移モデル記述へ変換できるのであれば、広く普及しているモデル検査ツールである SPIN や PRISM の活用が容易となる。その意味で、UML/SysML から変換するモデル記述としてどのようなものを選択するかは、汎用性や普及の観点から重要な問題である。

Machida ら [2] は SysML における図のある種のペトリネットに変換することに着目した。ペトリネットとは、システムの状態をプレースに配置されたトークン列によって表現し、トランジションと呼ばれるコンポーネントがトークン列を変化させることで、システムの状態遷移を表現する。ペトリネットは情報科学の分野で古くから利用されてきたモデル記述手法であり汎用性が高い。具体的に、Machida らは SysML の、内部ブロック図、アクティビティ図、ステートマシン図からペトリネットの一種である SRN (Stochastic Reward Net) を構成するツールを作成し、既存の解析ツールである SPNP (Stochastic Petri Net Package) と連係させることで SysML からシステムの性能を評価することを可能としている。

SRN は一般化確率ペトリネット (GSPN: Generalized Stochastic Petri Net) に報酬構造を追加したモデル記述である。GSPN は指数分布に従う状態推移の遅れを許容したペ

トリネットであり、状態遷移の確率過程が連続時間マルコフ連鎖と等価となる。指数分布だけ扱う性質は解析を簡単にする一方で、「10 ミリ秒以内に処理が完了する必要がある」といった実時間制約などを厳密に表現することができない。これは設計段階で要求されたふるまいが達成できているかどうかを検証する上で大きな障害となる。

また、ペトリネットによる解析は一般的に状態爆発を引き起こすことが知られている。GSPN に対応した連続時間マルコフ連鎖を構築した場合、簡単な GSPN モデルでも数百万もの状態数になってしまう場合がある。そのため、このような状態爆発を抑制する分析手法を開発することも、実際の UML/SysML で記述された設計を直接扱うための要件となる。

[1] S. Distefano, M. Scarpa, and A. Puliafito. From UML to Petri nets: the PCM-based methodology. IEEE Transactions on Software Engineering, 37(1):65-79, 2011.

[2] F. Machida, E. Andrade, D. S. Kim, and K. S. Trivedi. Candy: Component-based availability modeling framework for cloud service management using SysML. In Proc. 30th Int. Conf. on Reliable Distributed Systems, pages 209-218. IEEE CS, 2011.

2. 研究の目的

本研究は、MRSPN (Markov Regenerative Stochastic Petri Net) と呼ばれるペトリネットに対する解析手法の確立を行う。特に、大規模 MRSPN に対する解析手法、および、システムの性能評価で必須となるシステムの過渡状態を評価するための過渡解析手法の確立を行う。

MRSPN とは、一般分布に従った遅れを許容する確率ペトリネットであり、一般分布にはどのような確率分布を適用しても良いため、実時間制約があるシステムなどのふるまいを GSPN よりも厳密に表現することができる。また、ペトリネットに準じた記述であるため汎用性・互換性も非常に高い。そのため、UML/SysML からの変換に適した表現である。

また、MRSPN の状態推移は MRGP (Markov Regenerative Process) と呼ばれる確率過程となる。MRGP とは、発生時間間隔が一般分布に従う再生点と、発生時間間隔が指数分布に従う非再生点が混在した離散状態・連続時間の確率過程であり、連続時間マルコフ過程、セミマルコフ過程、マルコフ再生過程などを特殊系として含む一般的な確率過程である。特に、待ち行列理論などでは、MAP/G/1 や GI/PH/1 などの M/G/1 型や G/M/1 型のようの一つの一般分布を持つ

ような待ち行列過程が MRGP として表現できることが知られている。

本研究の課題は、(i) MRSPN 解析における状態爆発の抑制、(ii) MRGP の過渡解析である。

MRSPN はペトリネット表現であるため、GSPN と同様に状態爆発の問題が生じる。これは、実際の UML/SysML で記述されたシステムを評価する際に大きな障害となる。この問題に対して、本研究では BDD (Binary Decision Diagram) を用いた状態表現の圧縮と、MRSPN の分割で状態爆発の抑制を行う。BDD とは、論理式をグラフ表現する手法であり、システムの状態に対して適切な符号化を行うことで、非常に大きな状態集合に対してもコンパクトな表現を得られる。一方、MRSPN の分割は、MRSPN から生成される MRGP をいくつかの小さな MRGP の重畳で表現する可能な点に着目し、対応するクロネッカー和・積による表現を適用する。これは指数的な状態爆発を押さえる有効な手法である。このような解析を MRSPN/MRGP に適用した前例はなく、解析可能な MRSPN/MRGP のサイズを大きく改善できるものと期待される。

一方、確率的モデル検査ではある特定の状態に固定時間以内に到達するか確率が基準以下かどうかを調べることができる。このような解析を行う場合 MRGP の過渡解析が必要となる。過渡解析とは任意の時刻における状態確率を算出する。MRSPN から生成される MRGP は一般的な確率過程であるため、連続時間マルコフ連鎖と比較して過渡解析が極端に難しくなるため何らかの近似手法を適用する必要がある。そこで本研究では、位相型近似による過渡解析手法を考える。位相型近似とは、一般分布を位相型分布で近似する手法であり、これを適用することで MRGP を連続時間マルコフ連鎖へ還元することができる。申請者は、位相型近似に対して高速かつ高精度なアルゴリズムを開発しており、それらの成果を応用する。

MRSPN/MRGP によるシステム性能評価は、現在主流となりつつある UML/SysML を用いたシステム性能評価にとって必要不可欠な基盤技術である。また、実際の設計情報を分析するためには状態爆発の問題は避けて通れない。本研究では、MRSPN の分析などを分割して行うなど画期的なアイデアが用いられている。ここで開発する分析手法とツールはこの分野における先駆的な研究となることは間違いなく、UML/SysML からの性能評価が大きく発展することが期待される。

3. 研究の方法

本研究は、次の目標から構成される。

- (a) MRSPN の解析手法の開発
- (b) MRGP の過渡解析手法の開発

(c) ツールの作成。

さらに、各目標は次の作業に分割される。

- (a) MRSPN の解析手法の開発
 - (a-1) BDD による MRSPN の状態探索アルゴリズムの構築、
 - (a-2) MRGP の分割アルゴリズムの構築
- (b) MRGP の過渡解析手法の開発
 - (b-1) クロネッカー表現による位相型近似の適用
 - (b-2) 過渡解析の並列アルゴリズム
 - (b-3) モデル検査への拡張
- (c) ツールの作成
 - (c-1) MRSPN, MRGP を定義する XML スキームの開発、
 - (c-2) 解析ツールの実装

全体の研究スケジュールは以下の通りとなる。

- 平成 26 年 4 月 ~ 平成 26 年 12 月 (a) MRSPN の解析手法の開発
- 平成 26 年 12 月 ~ 平成 28 年 3 月 (b) MRGP の過渡解析手法の開発
- 平成 28 年 4 月 ~ 平成 29 年 3 月 (c) ツールの作成

(a) MRSPN の解析手法の開発

MRSPN の解析手法は、(a-1) BDD による MRSPN の状態探索アルゴリズムの構築と (a-2) MRGP の分割アルゴリズムの構築によって実現される。

(a-1) BDD による MRSPN の状態探索アルゴリズムの構築

MRSPN を解析するためには、全プレースのトークン配置（マーキングと呼ばれる）を網羅的に抽出し、抽出したマーキングを状態空間とした離散状態・連続時間の確率過程（マーキングプロセスと呼ばれる）を考えることが基本となる。MRSPN の場合、対応するマーキングプロセスは MRGP と呼ばれるクラスの確率過程となる。これは、一般分布に従う再生点と指数分布に従う非再生点が含まれた確率過程であり、連続時間マルコフ連鎖やマルコフ再生過程を特殊系として含む。

ペトリネットからマーキングプロセスを生成するためのアルゴリズムはグラフ上の探索問題になる。そのため、一般的に深さ優先探索や幅優先探索が行われている。ペトリネットからマーキングプロセスを生成するアルゴリズムに関する研究はそれほど多く見受けられない。これは、もととなるペトリネットが人間の手によって作成されることが多かったことが理由の一つとして挙げられる。ペトリネットはモデル記述方法として古くから知られているが、本研究で考えるように、さらに上位のモデリング言語を入力として、解析のための中間的な表現として用いられる例が少なかった。そのため、与えられたペトリネットに対して、単純な深さ優先や幅優先探索を適用すれば、実的に十分な時

間でマーキングプロセスを生成することができた。しかしながら、本研究では UML/SysML のコンポーネントに対応する MRSPN モジュールを考える。そのため、生成されるペトリネット自体のコンポーネント数（プレース数、トランジション数）が大きくなり、マーキングプロセスそのものを生成することに対する計算困難性が生じるものと考えられる。本研究では、実際の設計で用いられる粒度の UML/SysML を扱うため、MRSPN から MRGP を生成する効率の良いアルゴリズムを考える。そこで BDD (Binary Decision Diagram) を用いたマーキングプロセス生成アルゴリズムの開発を行う。BDD は論理式をグラフによって表現する手法であり、ある種の探索・列挙問題に対して非常に強力なアルゴリズムを提供することが知られている。本研究でも、SIMPATh で用いられているアイデアを用いることにより、MRSPN から生成されるすべてのマーキングを列挙し、効率よくマーキングプロセスが生成されることを実験により検証する。

(a-2) MRGP の分割アルゴリズムの構築

本研究で扱う MRSPN はコンポーネント数が大きくなるため、生成される MRGP の状態数も非常に多くなる。つまり状態爆発を引き起こす。これを緩和するために、MRGP の分割アルゴリズムと、クロネッカー和・積による MRGP の表現方法を考える。例えば、二つの互いに依存関係のない MRSPN を考え、それら二つが合成された一つの MRSPN を考える。このとき、合成された MRSPN の MRGP は二つの MRSPN それぞれに対する MRGP の重畳となる。連続時間マルコフ連鎖の重畳はクロネッカー和・積で与えられるため、これをもととして MRGP に対するクロネッカー表現も考える。

(b) MRGP の過渡解析手法の開発

MRGP の過渡解析は、(b-1) クロネッカー表現による位相型近似の適用、(b-2) 過渡解析の並列アルゴリズム、(b-3) モデル検査への拡張からなる。

(b-1) クロネッカー表現による位相型近似の適用

MRGP の過渡解析に対して位相型近似による手法を開発する。位相型近似とは一般分布を位相型分布と呼ばれる分布で近似する手法である。位相型分布が連続時間マルコフ連鎖で定義できることから、一般的な MRGP を連続時間マルコフ連鎖の解析に還元することができる。しかしながら、一般分布に対して位相型近似を適用した場合、近似されたマルコフ連鎖の状態数も多くなる。そのため、(a-2) と同様にクロネッカー表現を適用することで、状態数の増加を低減させることを考える。また、クロネッカー表現によって、計算すべきマルコフ連鎖の無限小生成行列を分割す

ることで、(b-2) に述べるような高速化も考える。

(b-2) 過渡解析の並列アルゴリズム

(a-2) や (b-1) によるアプローチにより、計算すべき連続時間マルコフ連鎖の無限小生成行列が構造化されたため、重畳する MRGP 毎に独立なプロセスで過渡解析が可能となる。また、過渡解析ではある時刻列に対する状態確率を求めることを行うが、各時刻列毎の並列化についても考える。具体的には、変分法による状態確率の近似を適用することで、粗粒度な並列計算アルゴリズムが構築できる。

(b-3) モデル検査への拡張

モデル検査では、状態推移モデル上で指定された時間に依存した性質が成立するかどうかを検査する。確定的なモデル検査は BDD や SAT を用いた条件を満たす状態を探索することが主な解析手法となるが、状態が確率的に推移するモデル上での検査は本質的に状態依存モデルの過渡解析に対応する。そのため、(b-1) や (b-2) で議論した解析手法を確率的モデル検査に応用することを考える。確率的モデル検査では特定の状態しか注目しないため、より高速な過渡解析を行う。

(c) ツールの作成

ツールの作成は、(c-1) MRSPN, MRGP を定義する XML スキーマの開発、(c-2) 解析ツールの実装の作業からなる。

(c-1) MRSPN, MRGP を定義する新たな XML スキーマの開発

本研究では他のツールからの利便性を考慮して MRSPN と MRGP の定義を行うための XML スキーマを開発する。XML スキーマは XML 文書中のタグなどの意味づけを行うものであり、このような定義はモデルの自動変換に役立つ。本研究では、既存のペトリネットに対する XML に対して MRSPN を記述できるような拡張を行う。また、MRGP を定義するための XML の開発も行う。これらは、それぞれ (b-2) で開発する MRSPN 構造解析ツールおよび MRGP 過渡解析ツールの入力として利用される。

(c-2) 解析ツールの実装

本研究では、二つのツールを実装する。MRSPN 構造解析ツールは MRSPN を入力として、(a-1)、(a-2) におけるアルゴリズムを実装することで、分割された MRGP の XML を出力とする。一方、MRGP 過渡解析ツールでは (b-1)、(b-2)、(b-3) で開発された数値計算アルゴリズムを実装したツールであり、性能評価指標の過渡特性や確率的モデル検査の結果を出力とする。このように、ツールチェーンとして MRSPN の解析ツールを準備することで、解析ツールの置き換えなどを容易に

行うことができる。また、位相型近似に関しては申請者が開発した既存ツールを適用できる利点もある。

4. 研究成果

平成 26 年度は MRSPN の解析手法の検討を行った。特に、BDD を用いた MRSPN の状態探索アルゴリズムと MRGP の分割アルゴリズムの検討を行った。

MRSPN を解析するためには、全プレースのトークン配置（マーキングと呼ばれる）を網羅的に抽出し、抽出したマーキングを状態空間とした離散状態・連続時間の確率過程（マーキングプロセスと呼ばれる）を考慮することが必要である。一般的には深さ優先探索や幅優先探索が行われるが、プレース数やトークン数の増加により比較的小規模な MRSPN でも状態爆発を引き起こす。そこで、BDD を用いた状態網羅のアルゴリズムを構築した。一つのプレースに対して一つのトークンしか存在しない場合については既知の成果があったが、これを複数トークンへ拡張した。いくつかの実験を通じて、中規模サイズのペトリネットについては、従来の深さ優先あるいは幅優先探索が高速であるが、ある一定のサイズを超えると、メモリの関係から BDD による状態探索が有効に機能することがわかった。また、Java に基づいたペトリネットの解析ツールの作成も行った。

また、ペトリネットの分割アルゴリズムについては、t-インバリアント、p-インバリアントの性質に着目した分割アルゴリズムの考察を行った。このアルゴリズムでは、ペトリネットの静的な解析によって、インバリアン部分ネットワークを抽出し、それらの部分ネットワークの直積として、ペトリネットの状態空間を定義することを考えた。部分ネットワークを独立と見なすため、見かけ上の状態数は増加するが、BDD における直積表現が容易である点と、クロネッカー和・積による表現が容易である点から、扱いやすいものと考察される。

平成 27 年度は MRGP の過渡解析手法に関する研究を行った。まず、MRGP の過渡解析に対して位相型近似による手法を開発した。位相型近似とは一般分布を位相型分布と呼ばれる分布で近似する手法である。位相型分布が連続時間マルコフ連鎖で定義できることから、一般的な MRGP を連続時間マルコフ連鎖の解析に還元することができる。ここでは、状態数の低減を行うためクロネッカー和・積による位相型近似の表現を行った。また、これらを MRSPN から状態間の依存関係を分析して、自動的に分割するためのアルゴリズムを構築し、有効性の検証をおこなった。探索では、一般分布による推移に基づいた状態分類を効率的に行うことによって、過渡解のみならず MRGP の定常解析にも利用できる表現を得ることができた。

また、位相型近似では近似によって得られた連続時間マルコフ連鎖の状態数が大きくなるため、通常の解析では現実的な時間で結果を得ることが困難な場合がある。そのため、クリロフ部分空間法に基づいた解析手法の検討も行った。クリロフ部分空間法によるマルコフ連鎖の解析はこれまでに知られていたが、連続時間マルコフ連鎖の定常解・準定常解を利用することにより、より高速な解析手法の構築を行った。

平成 28 年度は「モデル検査への拡張」と「ツール作成」を行った。

【モデル検査への拡張】モデル検査では、状態推移モデル上で指定された時間に依存した性質が成立するかどうかを検査する。確定的なモデル検査は二分決定木（BDD）や充足可能性問題（SAT）を用いた条件を満たす状態を探索することが主な解析手法となるが、状態が確率的に推移するモデル上での検査は本質的に状態依存モデルの過渡解析に対応する。そのため、ここまでで確立した解析手法を確率的モデル検査に応用した。さらに、確率的モデル検査では特定の状態しか注目しないため、確定的なモデルチェック手法と組み合わせた過渡解析アルゴリズムの開発を行った。

【ツールの作成】ツールの作成では「MRSPN/MRGP を定義する XML スキーマの開発」、「解析ツールの実装」を行う。他のツールからの利便性を考慮して MRSPN/MRGP の定義を行うための XML スキーマ開発した。XML スキーマは XML 文書中のタグなどの意味づけを行うものであり、このような定義はモデルの自動変換などに役立つ。本研究では、既存のペトリネットに対する XML に対して MRSPN を記述できるような拡張を行った。また、MRGP を定義するための XML の開発も行った。さらに、MRSPN 解析ツール JSPetriNet の実装を行った。MRSPN 構造解析ツールは MRSPN を入力として、連続時間マルコフ連鎖の生成行列を出力する。また、連続時間マルコフ連鎖を数値的に評価するツールを R 上に作成した。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 10 件)

1. 岡村寛之, 土肥正, マルコフ再生確率ペトリネットによる信頼性評価事例, 日本信頼性学会誌(学会誌特集: 情報通信システムにおける信頼性モデル研究の動向), vol. 38, no. 6, pp. 340-349, 2016. (査読あり)
2. J. Zheng, H. Okamura and T. Dohi, Performance evaluation of VM-Based intrusion tolerant systems with Poisson arrivals, Proceedings of the

- 4th International Symposium on Computing and Networking (CANDAR 2016), 7 pages, 2016. DOI 10.1109/CANDAR.2016.0041 (査読あり)
3. H. Okamura and T. Dohi, A phase expansion approach for transient analysis of software rejuvenation model, Proceedings of the 8th International Workshop on Software Aging and Rejuvenation (WoSAR 2016), 6 pages, 2016. DOI 10.1109/ISSREW.2016.53 (査読あり)
 4. H. Okamura and T. Dohi, Phase-type software reliability model: Parameter estimation algorithms with grouped data, Annals of Operations Research, vol. 244, issue 1, pp. 177-208, 2016. DOI 10.1007/s10479-015-1870-0(査読あり)
 5. H. Okamura and T. Dohi, Performance comparison of algorithms for computing parametric sensitivity functions in continuous-time Markov chains, Proceedings of the 7th Asia-Pacific International Symposium on Advanced Reliability and Maintenance Modeling (APARM 2016), pp. 415-422, 2016. (査読あり)
 6. H. Okamura and T. Dohi, PH fitting algorithm and its application to reliability engineering, Journal of the Operations Research Society of Japan, vol. 59, no. 1, pp. 72-109, 2016. DOI 10.15807/jorsj.59.72 (査読あり)
 7. H. Okamura, Z. Yi and T. Dohi, Network survivability modeling and analysis for power-aware MANETs by Markov regenerative processes, Telecommunication Systems Journal, 60, 471-484, 2015 DOI 10.1007/s11235-015-9989-5(査読あり)
 8. H. Okamura, J. Guan, C. Luo and T. Dohi, Quantifying resiliency of virtualized system with software rejuvenation, IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences (A), E98-A(10), 2051-2059, 2015. DOI 10.1587/transfun.E98.A.2051 (査読あり)
 9. H. Okamura, R. Watanabe and T. Dohi, Variational Bayes for phase-type distribution, Communications in Statistics -Simulation and Computation, vol. 43, no. 8, pp. 2031-2044, 2014. DOI 10.1080/03610918.2013.848895 (査読

あり)

10. H. Okamura, K. Yamamoto and T. Dohi, Transient analysis of software rejuvenation policies in virtualized system: phase-type expansion approach, Quality Technology and Quantitative Management Journal, vol. 11, no. 3, pp. 335-352, 2014. DOI 10.1080/16843703.2014.11673349 (査読あり)

[学会発表](計2件)

1. H. Okamura and T. Dohi, mapfit: An R-based tool for PH/MAP parameter estimation, The 14th International Conference on Quantitative Evaluation of Systems (QEST2015), Madrid, Spain, September 1-3, 2015.
2. H. Okamura, J. Guan, C. Luo and T. Dohi, Quantifying resiliency of virtualized system with software rejuvenation, Proceedings of The 2014 International Conference on Quality, Reliability, Risk, Maintenance, and Safety Engineering (QR2MSE 2014), Beijing, China, July 22-25, 2014.

[その他]

JSPetriNet

<https://github.com/rellab/JSPetriNet>

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

岡村 寛之 (HIROYUKI OKAMURA)

広島大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号 : 1 0 3 1 1 8 1 2