様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 22 年 5 月 31 日現在

研究種目：基盤研究(C)
研究期間：2007-2009
課題番号：19560409
研究課題名（和文）ハイブッリドペトリネットの代数的挙動解析の研究

研究課題名（英文）On Algebraic Behavioral Analyses of Hybrid Petri Nets

研究代表者
松本 忠（MATSUMOTO TADASHI）
福井工業大学・工学部・教授
研究者番号：40020193

研究成果の概要（和文）： 離散変数と連続変数を混在することを許すハイブリッドペトリネットは離散ペトリネットと連続ペトリネットから構成される．連続ペトリネットとハイブリッドペトリネットの挙動は，離散ペトリネットの挙動に比し，大変複雑であり，いままでに代数的挙動解析が十分になされてこなかった．本研究では， まず，離散ペトリネットの状態方程式(目標状態と初期状態の差が固定されている)を用いて，任意の発火回数ベクトル(非負整数解)を初等的Ｔインバリアントと基本特解を用いて表現することを基本として，初期状態から目標状態への可到達性を有限の手数で判定することを提案している．次には,これらの手法を連続ペトリネット，ハイブリッドペトリネットへ適用するための条件を明らかにしている．更には，連続変数のみを許す連続システムから離散変数のみで表現する離散システムを得るための新しい一手法を提案している．

研究成果の概要（英文）： A hybrid Petri net containing both discrete and continuous variables is constructed by discrete Petri nets and continuous Petri nets. Comparison with discrete Petri nets, behaviors of both continuous Petri nets and hybrid Petri nets are very complex and have not been analyzed enough from algebraic approach. In this study, first, a state equation for discrete Petri nets is considered, in which the difference between a destination state and an initial state is fixed, and an arbitrary firing count vector (i.e., a nonnegative integer solution) is completely expressed by elementary T-invariants and fundamental particular solutions. Reachability determination from an initial state to a destination state is algebraically proposed in the bounded space and within finite procedures. Secondly, algebraic analytical approaches of discrete Petri nets are applied to continuous Petri nets and hybrid Petri nets and conditions for applicability to those nets are shown. Thirdly, a novel method for obtaining a discrete system containing only discrete variables from a continuous system with only continuous variables.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合　計
2007 年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総　計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：　工学
科研費の分科・細目：　電気電子工学・システム工学
キーワード：　システム工学，制御工学，数理工学，ハイブリッドシステム，ペトリネット，可到達性解析，状態方程式，インバリアント

１．研究開始当初の背景

離散ペトリネットは 1960 年代に提案された．連続，ハイブリッドペトリネットは夫々1987 年,1991 年に提案されて，その後，有用視されてきたが，代数的挙動解析は十分になされていない．それは，ハイブリッドペトリネットが離散と連続のペトリネットの混在形であり，離散と連続のペトリネットの代数的解析が十分になされていなかったためである．本研究では，比較的進展している離散ペトリネットの代数的解析法を連続，ハイブリッドペトリネットに適用せんとする．
ここで，離散ペトリネットの概略を述べる．離散ペトリネットはｍ個のプレースとｎ個のトランジションを節点とする２部グラフであり，プレースからトランジションへの非負整数重み付き有向枝とトランジションからプレースへの非負整数重み付き有向枝を表現する m×n 次接続行列が用いられる．プレースに非負整数値を有するトークン(マーキング)が置かれ，それらは発火可能ルールと発火ルールで変化される．離散ペトリネットの動作は接続行列を係数行列に，目標マーキング(状態)と初期マーキング(状態)の差を強制項ベクトルとし，トランジションの発火回数を未知ベクトルとする状態方程式で与えられる．連続ペトリネットは上記での枝重みとトークンに非負実数値を許したものである．

２．研究の目的

入力，状態，出力に連続変数と離散変数が混在するハイブリッドシステムは，計算機科学，組み込みシステム，制御工学，非線形科学，電気・電子回路などの多くの分野における，今日の重要かつ急務な研究課題になっている．本研究では，特に，交通システム，計算機ネットワーク，生産システム，通信システム，ワークフロー，システムバイオロジー等の解析・設計・制御・評価のための重要なモデルの１つであるハイブリッドペトリネットの代数的挙動解析(状態方程式による特別なかつ重要な可到達問題の解析)の体系化とその応用を目指す．
まず，時間なし離散ペトリネット，時間なし連続ペトリネットの状態方程式の解（T インバリアントの生成元と目標と初期の状態の差を固定したもとでの複数存在する特解）の導出法を明らかにし，次に，それぞれの挙動解析に応用する．そして，最後にはこれらの結果を時間なしハイブリッドペトリネットの代数的挙動解析（ただし，目標と初期の状態の差は固定されている）に適用する．

３．研究の方法

ここでは，時間なしの，離散，連続，ハイブリッドなペトリネットを対象とするので，以下では「時間なし」を省略する．次のように(1)－(4)を考える．

(1) 離散ペトリネットの状態方程式の非負整数解：
本ネットの状態方程式の任意の非負整数解(発火回数ベクトル)は，状態方程式の初等的 T インバリアント集合(Ue) と基本特解集合(Vf) の非負有理係数付きで展開表現される．そこで，
① 状態方程式から Ue と Vf を求める，
② Ue,Vf,1 つの非負整数解が与えられたときに，非負有理展開係数を系統的に求めよ．

(2) 離散ペトリネットの可到達性判定法：
本研究では，離散ペトリネットの状態方程式の非負整数解の発火実行可能性を判定することを目的としているが，初等的 T インバリアントと基本特解を判定処理の最小単位とする代数的特徴を活用することを以下のように目指す(ここで，目標状態と初期状態の差が固定されていることに留意されたい)．
① 無限解集合 X を考えることの意義．
② X の有限部分解集合 X*を考えることの意義．

(3)連続ペトリネットの状態方程式の非負実数解の導出法：
連続ペトリネットの可到達性などの挙動は一般に複雑である．本研究では有限桁近似(状態方程式の係数行列および強制項ベクトルの各要素は有限桁である)を仮定する．この仮定のもとで，(１)の①と②をここでも検討する．

(4) ハイブリッドペトリネットの代数的挙動解析法の検討:
離散ペトリネットと連続ペトリネットが混在するものがハイブリッドペトリネットであるが，David と Alla (R. David and

H. Alla, Discrete, Continuous, and Hybrid Petri Nets, Springer, 2004.)によれば，離散プレースと連続トランジション間に枝はない(ただし，往復枝は許される)としてよい．更に，連続プレースと離散トランジション間に枝はない(ただし，往復枝は許される)を初等的ハイブリッドペトリネットと呼んでいる．本研究では，上記(3)の連続ペトリネットの有限桁近似のもとで，以下のことを検討する．

①状態方程式の非負実数解の導出法

②挙動の特徴と解析法

４．研究成果

ここでも，「時間なし」を省略する．また，§3 の研究の方法の順序にしたがって，以下に研究成果の概要を(1)－(6)として述べる．

(1)離散ペトリネットの状態方程式の非負整数解の表現法:

①状態方程式の拡大システム(未知ベクトルの次数が１次高い同次方程式.換言すれば，目標状態を初期状態へ戻すための新たなトランジションを挿入して得られる拡大ペトリネットの状態方程式であり，このとき，強制項ベクトルは零である)の極小 T インバリアント集合（$\tilde{U}$）を，Fourier-Motzkin 法で求めることによって，状態方程式の初等的Ｔインバリアント集合(Ue) と基本特解集合(Vf)が同時に得られることを明らかにした．このとき，基本特解の凸結合が特解(すなわち，極小ベクトル)になっている．

②Ue,Vf，１つの非負整数解が与えられたときの非負有理重み係数を求めることは，①で特解を求めることに還元されることを示した．すなわち，非負整数解の Ue と Vf による展開表現において，展開係数を未知ベクトルとして書き改めれば，①で，特解だけを求める問題となり，①と同じアルゴリズムが使える．

③Ue と Vf を求めるための別法として，Grobner 基底を求めるアルゴリズムを使えるが，現時点では，数式処理ソフトウエアの扱える規模に限界があることと，Ue,Vf のすべてを保証することが困難であるので，これは今後の課題である．

④本研究では，目標状態と初期状態の差が固定されたもとで，任意の非負整数解を既知の Ue,Vf，非負有理重み係数で表現することを基本としている．このことにより，可到達判定（すなわち，非負整数解の実行可能性の判定）が次の (2) -②のごとく体系化可能となる．

(2)離散ペトリネットの可到達性判定法：

①一対の初期状態，目標状態に対して，Ue と Vf による非負有理係数重み付き展開表示される非負整数解(発火回数ベクトル)は，一般にＴインバリアントを含むため，無限個存在し，無限解集合 X を形成する．それゆえ，初期状態から目標状態への到達可能性の判定は一般には困難な問題である．

②そこで，X の有限部分解集合 X*を生成し，その各要素の実行可能性を判定することにより，無限問題を回避する．また，判定には，非負整数解の Ue と Vf による展開表示を活用する(すなわち，判定処理の最小単位として初等的Ｔインバリアント，基本特解をとり，線形計画法，行列不等式を活用して効率的な判定を行う)．

③X*の生成は，状態方程式の非負整数解の要素の最大値と非零要素数を制約したもとで，ランダムサーチで求めると早く行える．ただし，元のシステムの可到達性を保証できる X*の生成法は今後の課題であるが，近似的判定法を許すならば，本手法は非常に有用である．

④最近，Duan Li 等(2009-6)は，離散ペトリネットの非負整数解を求めることの緩和問題を考え，非負実数解空間を(n-m)個の直交基底で区分される超平面の各セルから非負整数解を求めるセル数え上げ法を提案している．ここでは有限整数空間を考えており，その手数は $O(nw^{(n-m)})$ であり，w はトランジションの最大発火回数である．これは，等価的に X*を考えることに相当する．

(3)連続ペトリネットの状態方程式の非負実数解の導出法：

①連続ペトリネットの挙動は一般に非常に複雑であるので，本研究では§3-(3)で定義した状態方程式の係数行列と強制項ベクトルの有限桁近似を仮定する．

②①より，係数行列と強制項ベクトルの各要素は有理数で表される．

③更に，各要素の分母の最小公倍数を求め，各要素にかければ，状態方程式は整数要素を有する係数行列と強制項ベクトルとなり，非負有理数解を考えれば十分となる．

④①の仮定のもとでは，非負実数解は非負有理数要素の初等的 T インバリアント集合(Ue) と基本特解集合(Vf)を用いて非負有理重み係数付きで展開表現される．ここで，Ue と Vf は離散ペトリネットの場合と同様にして求められ，非負有理展開係数も同じアルゴリズムを用いて系統的に求められる．

⑤①の仮定のもとでは，連続ペトリネットの可到達判定も離散ペトリネットの場合と同様に行えることになる．

(4)ハイブリッドペトリネットの代数的挙動解析法の検討:

連続ペトリネットの挙動は一般に大変複雑であるため，ハイブリッドペトリネットの挙動も一般に同じ問題がある．本研究では先ず，連続ペトリネットの有限桁近似のもとで考えれば，次の①を得る．

①初等的ハイブリッドペトリネットの状態方程式の解の導出と挙動解析は，離散ペトリネット，連続ペトリネットと同様に行える．

したがって，次のことが重要となる．

②初等的でないハイブリッドペトリネットの解の導出法や挙動解析は今後の課題として残るが,連続ペトリネットの有限桁近似の効果がどのように現れるかが興味深い．

(5)連続状態システムから離散状態システムを得る一手法：

①上述の(2)-④で述べたDuan Li 等(2009-6)の手法は，状態方程式の係数行列は実数としても良いものである．そこで，更に，実用上許容される係数行列，強制項ベクトルの各要素は有限桁と仮定することにする．すると，上述の(3)の連続状態システムに関して述べたことがそのまま成立し，整数要素からなる係数行列，強制項ベクトルを有する状態方程式がえられ，そのときの非負整数解がセル数え上げ法で求められている．

②更には，係数行列がネット構造を反映しているならば，たとえば，①からペトリネットモデルを得ることができる．そこでは，強制項ベクトルは目標状態と初期状態との差として多様に分解される．

(6)その他の今後の改良，課題：

① 可到達性判定のアルゴリズムのインプリメントには，更なる改良が残っている．

②また，基本特解の必要十分条件の詰めとそれによる効果的な求解アルゴリズムの導出が重要である．

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１件）

① 松本忠，恐神正博，茂呂征一郎，P/T ペトリネットの状態方程式の非負整数解の代数的構造に関する基礎的考察，福井工業大学研究紀要,査読有,第 39 号,2009, pp. 23-30.

〔学会発表〕（計７件）

① 松本忠，恐神正博，茂呂征一郎，定常連続システムから離散状態システムを得る一手法，電子情報通信学会技術報告書，vol.110, no.***(コンカレント工学)，pp.13-18, 於金城学院大学（金沢），2010-8-2.

② Tadashi Matsumoto, Masahiro Osogami and Seiichirou Moro, Reachability Judgement in P/T Petri Nets by Approximate Algebraic Approach, Procs. of the 9th WSEAS International Conference on Signal Processing, Robotics and Automation (ISPRA`10), pp.318-323, at University of Cambridge, UK, February 20-22, 2010.

③ Tadashi Matsumoto, Masahiro Osogami, and Seiichirou Moro, On Particular Solutions for State Equation of Autonomous Continuous Petri Nets, Procs. of 2008 International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications (NOLTA`08), pp.668-671, in Budapest, Hungary, September 7-10, 2008.

④ 松本忠，恐神正博，茂呂征一郎，時間なし連続ペトリネットの状態方程式の解について，電子情報通信学会技術報告書，vol.108, no.176(コンカレント工学),pp.53-58, 於静岡大学, 2008-8-9.

⑤ 松本忠，恐神正博，茂呂征一郎，P/T ペトリネットの可到達性判定の代数的試みについて,電子情報通信学会技術報告書，vol.107, no.264(コンカレント工学)，pp.27-30, 於新潟大学, 2007-11-30.

⑥ 松本忠，恐神正博，茂呂征一郎，P/T ペトリネットの可到達性判定の代数的試み,平成 19 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集,E-44, 於福井工業大学, 2007-9-8.

⑦ 恐神正博，松本忠，茂呂征一郎， P/T ペトリネットの初等的インバリアントの導出法の比較，検討，平成 19 年度電気関係学会北陸支部連合大会講演論文集,E-43, 於福井工業大学, 2007-9-8.

６．研究組織

(1)研究代表者

松本　忠 (MATSUMOTO TADASHI)
福井工業大学・工学部・教授
研究者番号：40020193

(2)研究協力者

恐神　正博 (OSOGAMI MASAHIRO)
福井工業大学・工学部・準教授
研究者番号：70298389
茂呂　征一郎 (MORO SEIICHIROU)
福井大学・大学院工学研究科・準教授
研究者番号：00303363