A-015

拡張被覆木CRTsに基づく非有界ペトリネットのサイクリック性の部分検知

Partial Detection of Cyclicality in Unbounded Petri Nets based on Extended Coverage Trees : CRTs

太田 真生 †　　和﨑 克己 ††
Mao Ota　　Katsumi Wasaki

1　はじめに

ペトリネットは，事象発生の並列性，非同期性，非決定性を有する離散事象システムの振る舞いを表す数学モデルである [1][2]．非有界なペトリネットを表現する方法として被覆木が存在する．この方法では無限個のトークンを ω で表現することで，非有界なペトリネットの振る舞いを有限節の木で表現することを可能にしている．しかし，実際には数として表現されるものを ω に置き換えるためこの方法ではあらゆる情報の欠損が起こる．欠損する情報の一つにデッドロック性があげられる．この問題を解決するために考えられた手法が Complex Reachability Trees（CRTs）である．この手法を用いることで非有界ペトリネットのデッドロック性を判定することが可能である [3]．本研究では，CRTs 生成の効率化およびデッドロックに至るパターンの探索を行うため，被覆木を成長させる際にプレース毎の増減が一定となるような，ある種のサイクリック性のある部分の検知を試みる．また，デッドロック状態に至る，初期状態からのトランジション発火系列による抽象表現を提案する．

2　諸定義

2.1　構造的準反復性

いくつかのトランジションが無限に生起するような発火系列が存在する．

$$\exists x \geq 0,\ A^T x \geqq 0 \tag{1}$$

2.2　構造的準反復一致性

あるマーキング M_0 と，いくつかのトランジションが少なくとも 1 回発火系列内に生起するような M_0 から始まり M_0 に戻る発火系列が存在する．

$$\exists x \geq 0,\ A^T x = 0 \tag{2}$$

3　従来からの被覆木，その状態表現拡張としての CRTs

3.1　被覆木

ペトリネット（N,M_0）を考える．初期マーキング M_0 から発火可能なトランジションを 1 回発火することにより，発火可能なトランジションと同数の可達マーキングを得られ，さらにそれぞれのマーキングから新しいマーキングを得ることができる．得られたマーキングをノード，トランジションの発火を各アークとすることで木表現が可能となる．

しかし，ネットが非有界である場合新たな状態の数え上げは無限に大きくなる．有限に抑えるために記号 ω を導入し，ω で無限を表すことで木表現を可能にする．これを被覆木という．

3.2　CRTs

リアルマーキングとイマジナリーマーキングの二種の要素をノードが表した木表現である．リアルマーキングは常に一定のマーキングであり，イマジナリーマーキングは ω によって被覆されたマーキングを含む場合がある．被覆木とは異なるアルゴリズムにより生成されるため，デッドロック性の判定が可能である [3]．

図 1 はペトリネットの例である (a) とそこから生成した被覆木 (b) と CRTs(c) である．(b) では表現されないデッドロック状態が (c) では z_{10} のように現れる．また，(a) のネットは t_1 の無限発火が可能であるが，CRTs 生成アルゴリズムではそのようなサイクリック性が現れた際に木の成長を止め，それらを表す目印として，(c) の t_4 と t_5，t_8 と t_9 をつないでいる破線矢印が記述される．

■ω-gone ノード　イマジナリーマーキングが被覆されている状態から発火し得られたマーキングであり，ω による被覆が無いノードのこと．図 1 の (c) では z_6[(1,2,4)(1,2,4)] が該当する．

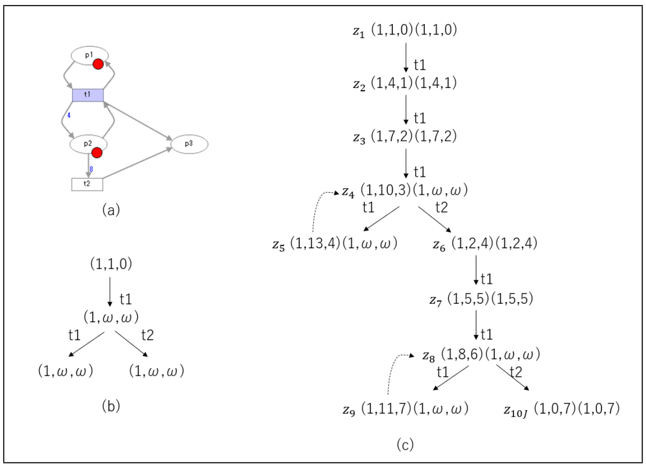

図 1　(a) ペトリネット例 (b) 被覆木 (c)CRTs

† 信州大学大学院総合理工学研究科, Graduate School of Science and Technology, Shinshu University
†† 信州大学工学部電子情報システム工学科, Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Shinshu University

4　非有界ペトリネットのデッドロック性の判定の拡張

4.1　判定法の拡張

CRTs によってデッドロック性を判定可能であるが，これは得られた CRT に ω-gone ノードが無い場合にかぎる．この問題解決のため，一度 CRT 生成を行った後，その CRT が ω-gone ノードを持たなければ，末端のノードを初期マーキングとしさらに生成を行うことを提案する．生成を行った CRT が ω-gone ノードを持たなくなるまで生成を繰り返すことで判定が可能となると考える．また，ω-gone ノードを持ち続けたとしてもそこから得られる発火系列が，今までに得られた CRT と同様なものとなれば以降の発火も同様と考え省略する．

5　非有界ペトリネットのサイクリック性の判定と応用

末端のノードから生成を行う際にサイクリック性を用いて効率化を図る．その際にサイクリック性の検知の方法として以下を提案する．

5.1　ω 領域内での増減

CRTs におけるイマジナリーマーキングでは無限となる部分を単に ω に置き換えている．しかし，無限となる部分であっても発火によって減少する可能性があり，これがネットのデッドロックに大きく関わる．本研究では発火による増減を新たな情報として追加することを提案する．具体的には，発火の始点となるマーキング，発火系列，発火後のトークンの増減の情報を追加する．発火後のトークンの増減情報は，発火系列内で増減するプレース，ω で被覆されるプレース，関係のないプレースに分け表現する．反復する発火系列において，ω で被覆されるプレースの増減情報が減少となっていた場合，そのネットはデッドロックの可能性があると考えられる．一方で，増加となっていた場合その系列内に ω-gone ノードが含まれていたとしてもデッドロック性が無いと考えることができるため，その先の CRTs 生成を省略し，効率化を図ることが可能である．

5.2　準反復性・準反復一致性の利用

CRTs がサイクリック性を持つ場合，準反復性，準反復一致性が関わると考える．そのため，事前に準反復性，準反復一致性を調べることで，それらの特徴を持つトランジションの集合を得ることができ，集合の組み合わせがサイクリック性のある部分に関わると考えられる．

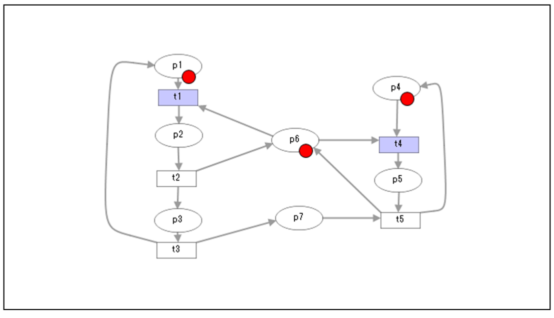

図 2　構造的準反復性・準反復一致性を有するネット例

一方で ω で被覆されるプレースのみ減少し，その他のプレースのトークンが前後で変化しない発火系列が存在した際に準反復性が得られない．図 2 は構造的準反復性・準反復一致性を有するネットの例である．t_4t_5 は準反復性をもたず，これは p_7 からトークンが減少するためである．しかし，一度目の CRTs 生成で p_7 が非有界となることがわかっているため，t_4t_5 は無限に生起する可能性があるといえる．このことから，一度目の CRTs 生成で ω で被覆されるプレースを検知可能であり，そのプレースを除いたネットで準反復性・準反復一致性を調べることでサイクリック性の事前検知が可能となると考える．

5.3　発火系列による表現への応用

図 1 のネットにおけるデッドロック状態である，$z_{10}[(1,0,7)(1,0,7)]$ ノードまでの発火系列を式で表した場合以下のように表すことができる．

$$\rho = \rho_1(\alpha_1)^{k_1}\rho_2(\alpha_2)^{k_2}\rho_3$$
$$\rho_1 = z_1 \to z_2 \to z_3 \to z_4$$
$$\rho_2 = z_4 \to z_6 \to z_7 \to z_8$$
$$\rho_3 = z_8 \to z_{10}$$
$$\alpha_1 = z_4 \to z_5$$
$$\alpha_2 = z_8 \to z_9$$

α_1，α_2 は無限回発火することが可能な遷移であり k_1，k_2 はそれぞれの発火回数である．これにより，このネットのマーキングは $(1{,}3k_1{+}3k_2{,}7{+}k_1{+}k_2)$ と表すことができる．

図 1 のネットは準反復性がないため，このように表現可能であるが，準反復性のあるネットの場合 α が大量に出現してしまう．さらに，準反復一致性がある場合には，マーキングの増減が無い遷移も存在する．そのような場合に 5.2 節で提案したように事前に準反復性・準反復一致性の検知を行うことで α のパターンの内，準反復性・準反復一致性に関わるものを事前に特定可能となる．また，発火系列による表現をする際に，検知によって得られた集合を用いることで表現の簡略化を行えると考える．

6　まとめと今後の課題

本研究では，サイクリック性のある部分の検知の手法について提案を行った．CRTs に対してサイクリック性を用いた生成の効率化を行うことで，より多くの非有界なネットでデッドロックを検知可能となり，システムの局所活性化を期待できる．今後の課題として，ここで述べたサイクリック性検知の手法を CRTs 生成アルゴリズムに組み込み効率化を図ることができるか検証していく必要がある．また，本学で開発されているペトリネット援用ツール HiPS[4] に本解析機能の実装を行う．

参考文献

[1] Tadao Murata: “Petri Nets: Properties, Analysis and Applications”, Proc. of the IEEE, 77(4), 1989
[2] 村田忠夫：ペトリネットの解析と応用, 近代科学社, 1992
[3] Faming Lu, Qingtian Zeng, MengChu Zhou, Yunxia Bao, Hua Duan：Complex Reachability Trees and Their Application to Deadlock Detection for Unbounded Petri Nets, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems,　Vol.49, No.6, June 2019
[4] HiPS Tools：https://sourceforge.net/projects/hips-tools/
[5] Google OR-Tools：https://github.com/google/or-tools