A-013

拡張被覆グラフを用いた無条件公平解析器の ペトリネットツール HiPS への実装

Implementation of Unconditional Fairness Analyzer Using the Extension Coverability Graph to Petri Net Tool HiPS

三井 雄太 †　張江 洋次朗 ††　和崎 克己 †††
Yuta Mitsui　Yojiro Harie　Katsumi Wasaki

1.　あらまし

ペトリネット（Petri net）とは，離散事象システムの振る舞いをモデル化することができるツールであり，振る舞いや構造の解析を行うことでシステムの様々な性質を知ることができる [1][2]．既存のペトリネットツールの記述性，操作性，再利用性の問題を解決するために，本学で開発されたペトリネット設計ツール HiPS (Hierarchical Petri net Simulator) がある．HiPS には様々な解析機能 [3] が備わっているが，いくつかの重要な性質を解析する機能が不足している．本研究ではペトリネット設計ツール HiPS における解析機能として無条件公平解析器の設計および，その実装に必要な拡張被覆グラフ生成器を作成する．

2.　ペトリネットと設計ツール HiPS

ペトリネットの性質で，初期マーキングに依存するものを動的性質 (behavioral property) と呼ぶ．マーキング M_0 をマーキング M_n に変換する発火の系列が存在するとき，マーキング M_n はマーキング M_0 から可達 (reachable) であるという．既存のペトリネットツールの記述性，操作性，再利用性の問題を解決するため，本学で開発されたペトリネット設計ツール HiPS (Hierarchical Petri net Simulator) を図 1 に示す．HiPS は，直感的で一般的な操作方法の GUI をもち，ランダム発火のみに対応したペトリネットシミュレーション設計ツールである．また，階層化や時間ペトリネットにも対応している．

3.　公平性の定義

公平性の概念には，二つのタイプがある．一つはトランジション発火の有界性に関するものであり，もう一つは発火系列に関するものである．二つのトランジションが有界公平 (bounded-fair)(あるいは B-公平) 関係にあるとは，いずれか一方が発火しないでいる間に，他方が発火できる最大回数が有界であることである．無限長発火系列の公平性は，無限長の系列 σ の中にネット内の全てのトランジションが無限回現れているとき，系列 σ は無条件に（大域的に）公平 (unconditional (global) fair) であると定義される [1]．

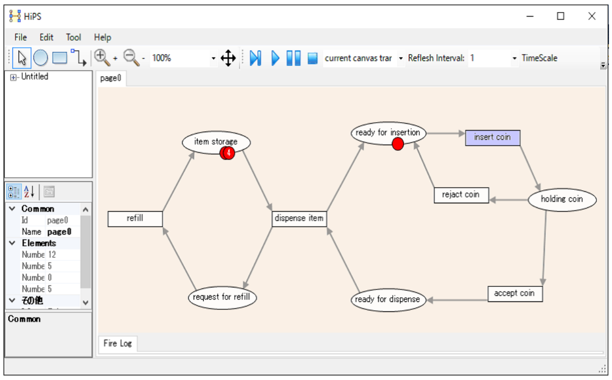

図 1　ペトリネット設計ツール HiPS

4.　被覆グラフ

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「新しい」可達マーキングを得ることができる．それぞれの新しいマーキングから，またさらに新しい可達マーキングを得ることができる．この木表現は，ネットが有界でなければ，無限に大きくなってしまう．木を有限に抑えるために，特別な記号 ω を導入する．ω は「無限」を表すと考えることができる．

4.1.　被覆グラフの情報欠落の問題

従来の被覆グラフには情報の欠落がある．無条件公平解析のときに障害となる情報の欠落は，ω によって畳み込まれた状態のトークンが $\{0, 1\}$ となるか不明なことである．トークンを減少させるトランジションを発火させ続けると，いずれトークンが無くなり他のトランジションを発火させなければならない．しかし，従来の被覆グラフでは他のトランジションを発火せずに，無限に発火可能なトランジションとして検知されてしまう．従ってトークンが減少するプレースに基づいたループ検知を正しく行えないと無条件公平を正しく解析できない．

4.2.　拡張被覆グラフの提案

被覆グラフにおける情報の欠損を解決するために，拡張被覆グラフを提案する．拡張被覆グラフは，従来の被覆グラフにおける無限を表す状態を 3 値に拡張したアルゴリズムによって生成される（図 2）．具体的には無限状態 ω を，プレース内トークン数の増加 (Nu)・一定 (Nc)・減少 (Nd) に拡張することにより，被覆している部分のトークン数の増減を表す．トークン数の増加・減少のステップ幅は 1 に限定する (ordinary)．拡張被覆

† 信州大学大学院総合理工学研究科，Graduate School of Science and Technology，Shinshu University.
†† 信州大学大学院総合工学系研究科，Interdisciplinaty Graduate School of Science and Technology，Shinshu University.
††† 信州大学工学部，Faculty of Engineering，Shinshu University.

グラフでは 2 以上の自然数は N を用いて表現することから，N*（または N*遷移）と表す．トークン数が減少している Nd に遷移するアークがある場合，ガード条件を付けて分岐するアークを生成する．従来の被覆グラフでは 1 以上の被覆可能ならば ω に置換していたが，拡張被覆グラフでは有界部と N*に被覆する非有界部の境界をはっきりさせるためにトークン数が $\{0,\ 1\}$ の場合は有界部としてトークン数が 2 以上で被覆可能な場合 N*に被覆する．被覆グラフは生成された被覆木をグラフとして表現したものである．図 3 に示すペトリネットに対する被覆グラフと拡張被覆グラフを図 4 に示す．例えば従来の被覆グラフ M_3, M_4 状態間の遷移は，プレース p_3 に対するトークン減少のループであるが，有界部分への遷移が欠落している．一方，拡張被覆グラフ M_8, M_9 状態間の遷移も同様のループであるが，有界部分の状態 M_{11} への遷移が生成されており，可逆性等の性質が正しく判定できる．

5. 無条件公平解析器のツール上への実装

無限長の発火系列 σ 中にネット内のすべてのトランジションが無限回現れているとき，系列 σ は無条件公平であると言える．すなわち σ の中にネットで定義された

ステップ 1： 初期マーキング M_0 をに根と付記し，「新」としておく．

ステップ 2： 「新」マーキングがある間，以下を繰り返す．

ステップ 2.1： 新マーキング M を，選択する．

ステップ 2.2： 根から M までの経路上のマーキングに M と同一のものがあれば，M を，「既存」として別の新マーキングに進む．

ステップ 2.3： M において，発火可能なトランジションがなければ，M を「終端」とする．

ステップ 2.4： M に発火可能なトランジションがある間，すべての発火可能なトランジション t に対して，以下の処理を行う．

ステップ 2.4.1： M において t を発火することによって得られるマーキング M' を求める．

ステップ 2.4.2： 根から M' までの経路に，すべてのプレース p に対して，$M'(p) > 1$ でかつ $M'(p) \geq M''(p)$ でかつ $M' \neq M''$ であるような M'' が存在すれば，すなわち M'' が $M'(p) > 1$ で被覆であれば，$M'(p) > M''(p)$ であるようなすべての p に対して，$M'(p)$ を N*で置き換える．N*に対して，以下の処理を行う．

ステップ 2.4.2.1： N*は，直前のマーキング $M(p)$ のトークン数と比較し，1 増加していれば Nu，同数であれば Nc，1 減少していれば Nd とする．

ステップ 2.4.3： M' をノードとして取り入れる，M から M' へのアークを描き，t と付記する，M' を「新」とする．

ステップ 2.4.3.1： $M'(p)$ が Nd のとき，Nd を 1 に置き換え，M から M' へのアークを描き，t と付記する．

図 2　拡張被覆グラフ生成アルゴリズム

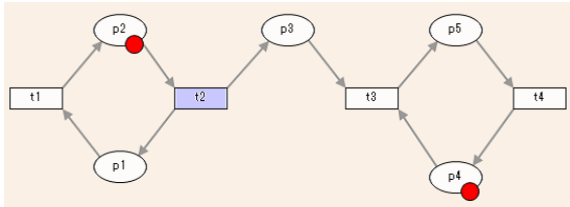

図 3　ペトリネットモデル例

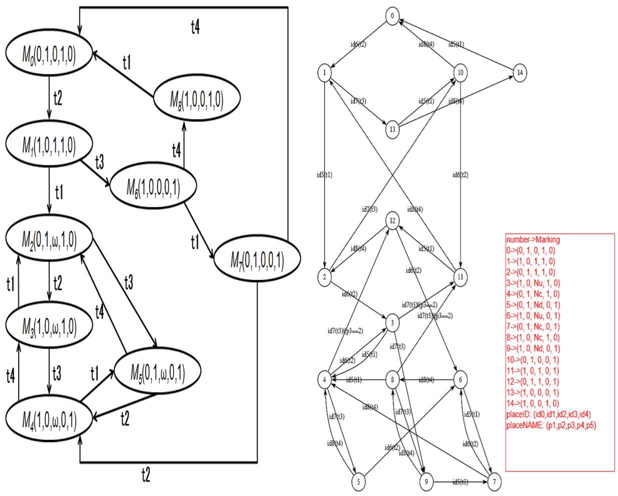

図 4　図 3 のネットに対する被覆グラフと拡張被覆グラフ

トランジションのうち出現しないものが一つ以上存在する場合，その σ は無条件公平では無いということが言える．無条件公平ネットは M_0 から可達なすべてのマーキング $R(M_0)$ 内のマーキング M からのすべての σ が無条件公平であることなので，ひとつでも無条件公平でない発火系列を発見することができれば，そのペトリネット (N, M_0) は無条件公平ネットでない．

6. まとめと今後の課題

本研究では HiPS の拡張被覆グラフ生成器，および拡張被覆グラフを用いた無条件公平解析器の実装を行った．拡張被覆グラフ生成器は，従来の被覆（可達）グラフ生成器の機能は保ちながら，被覆した部分の増減を判別できるようにしたことで新たなグラフの作成，また新たな発火系列の生成を実現した．無条件公平解析器は，拡張被覆グラフ生成器から得られる発火系列を用いることで，トークンが減少するループを判別し，無条件公平性について解析することを実現した．

本研究で実装した拡張被覆グラフ生成器は他の解析器等に応用が可能と考えられる．トランジション活性判定はトランジションの発火可能回数に対する判定であるので，拡張被覆グラフの発火系列を用いることで判定が可能になる．

参考文献

[1] T. Murata： “Petri Nets: Properties, Analysis and Applications”, Proc. of the IEEE, 77(4), (1989)

[2] J.L. ピーターソン：“ペトリネット入門　情報システムのモデル化”, 共立出版 (1984)

[3] 張江洋次朗，和崎克己：“ペトリネット設計検証ツール HiPS における On-the-fly LTL モデル検査器”，FIT2015（第 14 回情報科学技術フォーラム）講演論文集, (A-015), 139-142, (2015)