A-008

可達条件が既知であるサブクラス判定機能のパイプライン型並列処理による実現

Realization of Subclass Decision Function known to be Reachability Conditions by Pipelined Parallel Processing

渡貫 正也 †　　張江 洋次朗 ††　　和崎 克己 ††
Masaya Watanuki　　Yojiro Harie　　Katsumi Wasaki

1　はじめに

ペトリネット（Petri Net）とは，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]．ペトリネットの動的性質の解析における重要な概念の一つに可達性がある．可達性の解析とは，モデルが特定のトークンの配置（マーキング）に遷移可能であるか検証することである．しかし，一般ペトリネットに適用可能な条件は，現在も判明していないため．条件が判明しているサブクラスペトリネットを利用する方法 [2] が知られている．

ペトリネットの記述・解析を実現するために，本学でペトリネット援用ツール HiPS（Hierarchical Petri Net Simulator）が開発されている [3]．HiPS は，直感的で一般的な操作方法の GUI をもち，構造的・動的性質の解析機能等の様々な機能を備えている．

本研究では，可達判定条件が判明しているサブクラス群に対して，モデルが包含されているか判定する機能を HiPS 上で実現する．また，サブクラス判定処理によって，指定サブクラスの包含情報だけでなく，閉路やサイフォン・トラップ構造等の，他にも有意な情報も得ることができる．検査の判定結果を体系的に保持し，利用するための階層クラスを提案する．

2　可達条件が既知であるペトリネットサブクラス

2.1　可達解析

可達性は，モデルの振る舞いを解析する上で基盤となる概念である．マーキング M_n からマーキング M_m へ遷移させるようなトランジションの発火系列が存在するとき，M_m は M_n から可達であるという．ペトリネットにおける可達解析とは，M_m が M_n から可達であるための必要十分条件を満たすか検証することである．可達であるための必要十分条件が判明しているペトリネットサブクラス群について図 1 にその包含関係を示す．以下でその定義について述べる．

2.2　対象サブクラス定義

ネットのアークの重みが 1 である時，正規であるという．対象サブクラスネットは，すべて正規である．

マークグラフ（MG）：すべてのプレースの入出力トランジションが高々 1 つであるネットである．

前向き無競合ネット（FCF）：すべてのプレースの出力トランジションが高々 1 つであるネットである．

† 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

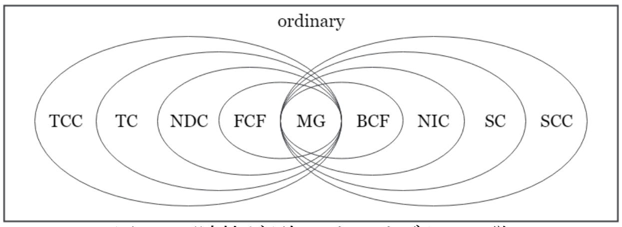

図 1　可達性が既知であるサブクラス群

後ろ向き無競合ネット（BCF）：すべてのプレースの入力トランジションが高々 1 つであるネットである．

非減少閉路ネット（NDC）：すべての閉路のトークン総数が，常に減少しないネットである．

非増加閉路ネット（NIC）：すべての閉路のトークン総数が，常に増加しないネットである．

トラップ閉路ネット（TC）：すべての閉路がトラップであるネットである．

サイフォン閉路ネット（SC）：すべての閉路がサイフォンであるネットである．

トラップ包含閉路ネット（TCC）：すべての閉路がトラップを含むネットである．

サイフォン包含閉路ネット（SCC）：すべての閉路がサイフォンを含むネットである．

また，便宜的に，NDC・NIC・TC・SC・TCC・SCC を閉路ネット群と総称する．

2.3　サブクラス判定に必要な処理

MG・FCF・BCF の判定方法は，ネットのすべてのプレースの入出力アークの本数を数え上げることで，判定することができる．閉路ネット群の判定方法は，ネットの閉路を探査した後に，発見された閉路に対して構造解析を行うという手順を採用する．閉路探査と構造解析は，互いに独立した処理であるため，並列的に処理することで，計算効率を向上させる．

3　パイプライン型並列処理によサブクラス判定

3.1　ネット構造解析

NDC の定義は 2.2 より示したが，これは，閉路のトークンを消費するトランジションの発火が行われても，そのトランジションから消費数以上のトークンを戻すようなアークが閉路に接続されていることと同値である．閉路を構成するプレース集合 C，C の任意のプレース p，p の出力トランジション集合における任意のトランジション t，t の出力プレース集合を $t\bullet$，t の入力プレース集合を $\bullet t$ を考える．任意の閉路について以下を満足するとき，ネットは NDC である．

$$|t \bullet \cap C| \geq |\bullet t \cap C| \tag{1}$$

また，p の入力トランジション集合における任意のトランジション t を考え，任意の閉路について以下を満足するとき，ネットは NIC である．

$$|t\bullet \cap C| \leq |\bullet t \cap C| \tag{2}$$

TC・SC 判定は，任意の閉路を構成するプレース集合がトラップ・サイフォンの定義を満足するか判定する問題に帰着できる．ここで，プレース集合 P の出力トランジション集合 $P\bullet$ と，入力トランジション集合 $\bullet P$ を以下の様に定義する．

$$P\bullet = \bigcup_{p\in P} p\bullet \qquad \bullet P = \bigcup_{p\in P} \bullet p$$

空でないプレース集合 Q がトラップである時，$Q\bullet \subseteq \bullet Q$ を満たす．また，空でないプレース集合 S がサイフォンである時，$\bullet S \subseteq S\bullet$ を満たす．

TCC・SCC 判定は，論理式の充足可能性問題に帰着できる．この問題は，補 NP 完全であることが知られている [4]．閉路 $C_k(k > 0)$ がサイフォンを含む時，以下の論理式を満足する．

$$\bigwedge_{p\in C_k}\left(p \to \bigwedge_{t_i\in\bullet p}\left(t_i \to \bigvee_{p_i\in\bullet t_i\cap C_k} p_i\right)\right) \tag{3}$$

また，閉路 $C_k(k > 0)$ がトラップを含む時，以下の論理式を満足する．

$$\bigwedge_{p\in C_k}\left(p \to \bigwedge_{t_o\in p\bullet}\left(t_{i_o} \to \bigvee_{p_o\in t_o\bullet\cap C_k} p_i\right)\right) \tag{4}$$

任意の閉路について (3) を満足するとき，ネットは SCC である．また，任意の閉路について (4) を満足するとき，ネットは TCC である．論理式は充足可能性問題に変換して，SAT ソルバーの機能を備える Google OR-Tools[5] を利用して解く．

3.2 閉路探査

閉路ネット判定の際に必要となる処理である．ネットの閉路を探査し，発見された閉路を順次 Queue に格納する．そして，Queue から閉路を取得し，対象閉路ネットの構造解析を行う．閉路探査と構造解析を非同期に実行し，Queue で接続することで，次に説明するパイプライン型並列処理を実現する．また，閉路探査のアルゴリズムは [6] を採用する．

3.3 パイプライン型並列処理の概要

閉路探査の計算量は，[6] のアルゴリズムによると，e をアーク数，n をノード数，c を閉路数として，$O((n+e)(c+1))$ で実現され，これは高い計算コストであると言える．また，構造解析についても，3.1 より，TCC・SCC については計算コストが高いことを述べた．しかし，閉路探査と構造解析は，互いに独立しているため，非同期に実行することによる効率化を図ることができる．

パイプライン型並列処理の概念図として図 2 を示す．まず，サブクラス判定器は，閉路探査器を非同期に起動する．閉路探査器は，発見した閉路を順次 Queue に格納する．サブクラス判定器は，Queue 内を監視し，取得した閉路に対して構造解析を行う．閉路探査が終了した際は，サブクラス判定器に，Queue を経て完了通知を行う．サブクラス判定器は，Queue が空であり，かつ閉路探査器のの完了通知を受けた後に，サブクラス判定を完了とみなし，終了する．

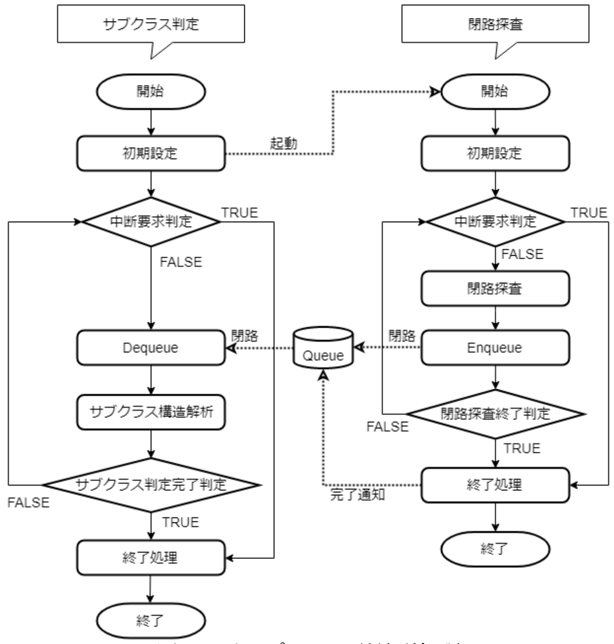

図 2 パイプライン型並列処理

4 判定結果保持クラス

判定結果と付随する構造情報（閉路やサイフォン・トラップ構造等）の保存を体系的に行うことで，有意な情報の破棄を防ぎ，情報の保存・読込を一貫した方法で行うことが可能となる．ネットに関連する構造情報とサブクラス判定情報をネット情報として保持する．サブクラス判定情報には，指定サブクラス包含の真偽と詳細情報を保持する．詳細情報には，MG・BCF・FCF であれば各プレース，閉路ネット群であれば各閉路のサブクラス判定問題の真偽を記録する．

5 まとめと今後の課題

本研究では，対象ネットが，可達条件が既知であるサブクラス群に包含されているか判定する機能をパイプライン型並列処理によって実装し，サブクラス判定によって得られる情報を体系的に保持するクラスを提案した．今後は，並列処理方法に改良を加え，さらなる効率化を目指す．また，計算コストが高いことで知られる閉路ネット判定の効率手法を模索する．

参考文献

[1] T. Murata : Petri Nets: Properties, Analysis and Applications, Proc. of the IEEE, 77(4), 1989.
[2] 平石, 市川 : 可達性の必要十分条件を求めることが可能なペトリネットのクラス, 計測自動制御学会論文集, 24(6), 1988.
[3] HiPS : Hierarchical Petri net Simulator, https://sourceforge.net/projects/hips-tools/
[4] 太田, 辻 : トラップ包含閉路ネットの検証, 電子情報通信学会技術研究報告, CAS2011-68, MSS2011-37, 2011
[5] Google OR-Tools, https://github.com/google/or-tools
[6] D. Johnson : Finding all the elementary circuits of a directed graph, SIAM J. Comput., 4(1), 1975