

活性安全自由選択ネットの 被覆マークグラフへの分割アルゴリズムと実装

Splitting Algorithm and its Realization from Live-Safe Free-Choice Nets to the Covering Marked Graphs on a Petri Net Tool

井出 和人† 和崎 克己††
Kazuto Ide Katsumi Wasaki

1 まえがき

離散事象システムにおけるモデル化手法の一つにペトリネット [1] がある。ペトリネットは視覚的で、かつ数学的なモデル化ツールである。筆者らの研究グループでは、ペトリネットの設計解析援用ツール HiPS [2] を開発している。活性で安全な自由選択ネットは、強連結なマークグラフ (MG-) 成分で覆われており、さらに、すべての成分が活性で安全なマークグラフとなるような初期マーキングから可達なマーキングが存在する。ペトリネットをマークグラフへと分割することは並行システムの動作や構造を解析するうえで有用である。本研究では、活性で安全な自由選択ネットをマークグラフへと分割するアルゴリズムの提案および HiPS への実装を行った。

2 ペトリネット援用ツール HiPS

HiPS は、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援用ツールである [2]。図 1 に、HiPS の編集画面を示す。直感的で一般的な操作方法の GUI と、ペトリネットの階層化および時間ペトリネットに対応し、作成したペトリネットモデルをシミュレートし、挙動を観察することが可能である。また、T-インバリアント解析や状態空間生成などの解析機能が実装されており、現在も解析機能の追加が行われている。本ツールは著者らの研究グループによって、主に非同期回路設計・検証などに応用されている [3][4][5]。

3 ペトリネットの被覆マークグラフへの分割可能性と活性化マーキング

定義 1 (強連結) 強連結とは、ペトリネット上のすべてのプレースおよびトランジションが入力および出力の両方を持つことである。

定義 2 (活性) 活性とは、初期マーキング M_0 から達することができる全てのマーキング状態 $R(M_0)$ から、ネット内の任意のトランジションを何らかの経路で一回以上発火可能であるような性質である。ペトリネットが活性であるとき、モデル化されたシステムではデッドロックを生じない。

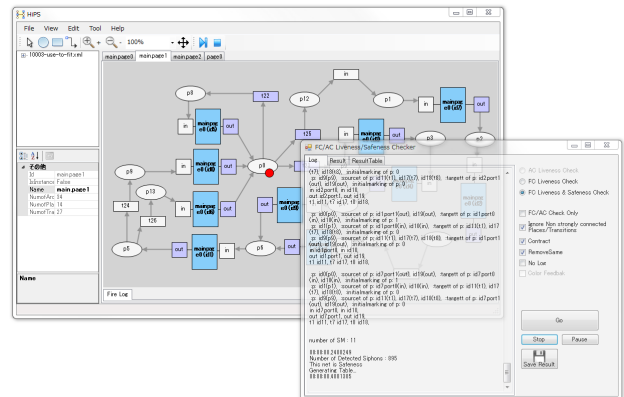


図 1 ペトリネット設計解析援用ツール HiPS の編集画面

定義 3 (安全性) 安全性とは、初期マーキング M_0 から達することができる全てのマーキング状態 $R(M_0)$ において、いずれのプレースにも 1 つを超えるトークンが入ることはないという性質である。ペトリネットが安全であるとき、モデル化されたシステムにおいてはリソースの有限性が保証される。

定義 4 (自由選択ネット) 自由選択ネットとは、すべてのプレースからトランジションへのアークが、そのプレースからの唯一の出力アークであるか、トランジションへの唯一の入力アークであるようなペトリネットのことである。

定理 1 (ペトリネットの被覆マークグラフへの分割可能性とその活性化マーキングの存在性)

(N, M_0) が活性で安全な自由選択ネットであれば、 N は、強連結な MG-成分 (MG-component) で覆われている。さらに、すべての成分 (N_1, M_1) が活性で安全なマークグラフとなるようなマーキング $M \in R(M_0)$ が存在する、ここで、 M_1 は、マーキング M の N_1 に対する部分列ベクトルである (文献 1: 定理 14)。

既存研究 [6] において、自由選択ネットの活性・安全性を判定するためのアルゴリズム改善及び援用ツール上の機能としての実装が行われている。この機能を利用することで、被覆マークグラフへの分割可能性及び活性化マーキングの存在性を確かめることができる。本研究で扱うペトリネットはこの機能を用いて活性及び安全性を有することが判明しているものである。

† 信州大学大学院理工学系研究科,
Graduate School of Science and Technology, Shinshu University.
†† 信州大学工学部情報工学科,
Department of Computer Science and Engineering,
Faculty of Engineering, Shinshu University.

4 分割アルゴリズム

本研究で提案するアルゴリズムでは、1. パーツへの分割、2. 探索とマークグラフの導出 という手順によってペトリネットをマークグラフへ分割する。

4.1 パーツへの分割

始めに分岐、合流プレースで囲まれる部分ネットとして分割する。マークグラフの各プレースは入力トランジションと出力トランジションをそれぞれ一つずつしか持たないため、複数の入力や出力を持つプレースはそのうち一つを選択しマークグラフ構造にする必要がある。この手順では、選択操作に関係ないネットの部分パーツとして部品化することによって、マークグラフの導出をより単純に行えるようにする。

分割手順を以下に示す。この操作の実行例を図 2 に示す。

1. 分岐合流プレースを抽出する
 - 1-1. 分岐合流プレースが存在しない場合はネット全体が一つのマークグラフ構造であるため終了する
2. 分岐合流プレースの出力トランジションから探索を開始する
 - 2-1. 多数の入力・出力アークを持つプレースに到達するまで探索を継続する
3. 何れのパーツにも含まれていない分岐合流プレースの出力トランジションが存在する場合 3 に戻る

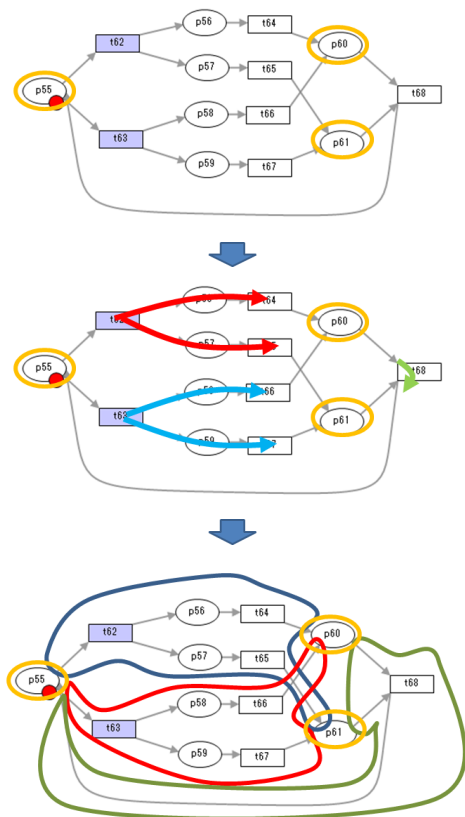


図 2 ペトリネットのパーツへの分割手順

4.2 探索とマークグラフ導出

本研究で提案するアルゴリズムでは、マークグラフの導出に縦型探索を用いる。4.1 で分割したパーツに属さないプレースから開始し、縦型探索を繰り返しパーツを選択することによって、マークグラフを導出していく。Algorithm1 に提案アルゴリズムの疑似コードを示す。図 3 にパーツ探索と MG-成分への分割例を示す。以下にこのアルゴリズムの概要を示す。

すべてのプレース、パーツが使用されるまで以下を繰り返す

1. 少なくとも 1 つの未使用パーツを出力に持つ、パーツに含まれないプレースをひとつ選択する
2. 新しい生成中 MG を作成する
3. 選択されたプレースを生成中 MG のホームプレースとして設定する
4. 生成中 MG リストに新しい生成中マークグラフを追加する
5. 生成中 MG リストが空になるまで以下を繰り返す
 - 5-1. リストの先頭にある生成中 MG について以下の操作を行う
 - (a) その出力パーツが一つも生成中 MG に含まれていないプレースのうちもっとも新しく追加されたプレースについて、パーツをひとつ選択しそのパーツとその入出力プレースを生成中 MG に追加する
 - (b) 生成中 MG に含まれるすべてのプレースについて入出力をチェックする
 - (c) すべてのプレースが 1 つの入力パーツと 1 つの出力パーツを持つ場合、この生成中 MG は被覆マークグラフの 1 つとして完成しているため、被覆マークグラフのリストにこの生成中 MG を追加し生成中 MG リストからこの生成中 MG を削除
 - (d) 少なくとも一つのプレースの入力パーツが複数である場合、入力のうち一方はホームプレースから続くものであり他方はこのプレースを含むループになっているので、ループを抽出し新しい MG であるかチェックするし、完成していれば被覆マークグラフのリストに、完成していなければ生成中 MG としてリストに追加する
 - (e) ループになっている方を別のパーツを選択できる段階まで戻す
 - 5-2. 少なくとも一つのプレースの出力パーツが MG に含まれていない場合操作を継続する

5 議論・考察

5.1 分割後のマークグラフと元の自由選択ネットとの関係

今回は図 4 のような非決定待ちプロセスをモデル化した例を用いて分割後のマークグラフと元の自由選択ネットとの関係を調べた。この例は参考文献 [1] の Fig.10 を自由選択ネットの構造となるようにしたものである。このネットに対して今回提案したアルゴリズムを適用すると、図 5 のように分割される。この分割後のマークグラフは、元のペトリネットの各サイクル (応答 1, 応答 2,

Algorithm 1 被覆マークグラフ分割アルゴリズム**Require:** パーツに分割した活性安全自由選択ネット**Ensure:** ネットの MG-成分への分割

```

while Unused Parts exist do
  List  $\leftarrow$  GeneratingMG  $\leftarrow$  Place contains Unused Part
  in Targets
  while List isnot Empty do
    GeneratingMG = List[0]
    if GeneratingMG contains Place which has no Out-
    put Source in GeneratingMG then
      Place = latest added Place to GeneratingMG
      (which has no Output Source in GeneratingMG)
      GeneratingMG  $\leftarrow$  Part in Target Parts of Place
    end if
    if GeneratingMG contains no Place which has no
    Output Source in GeneratingMG then
      ListOfMGs  $\leftarrow$  GeneratingMG
      Remove List[0]
    end if
    if GeneratingMG contains Muluti input Place
    then
      for each Source Part of Multi input Place do
        Clone = Clone of GeneratingMG
        Remove Source Part of Multi input Place of
        Clone
        Remove Non Strongly Connected Compo-
        nents
        if Clone has No Place/Part then
          Clone = New Clone of GeneratingMG
          Remove Source Part and Connected while
          other Selectable Part not exist
        end if
        List  $\leftarrow$  Clone
      end for
    end if
  end while
end while

```

("←" means "Add")

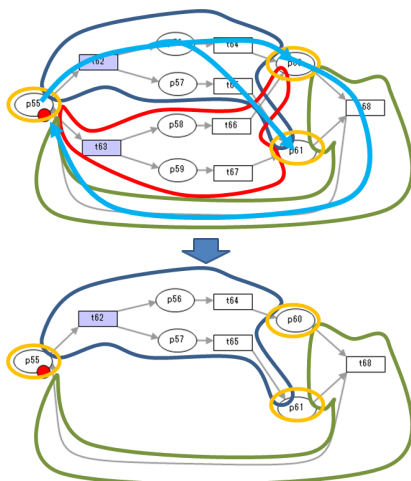


図3 パーツ探索による MG-成分への分割手順

タイムアウト) ごとに対応するサブネットに分割したものとになっている。

自由選択ネットの被覆マークグラフは、ネットの構造や意味的な部分を理解する際に有用であることがわかる。

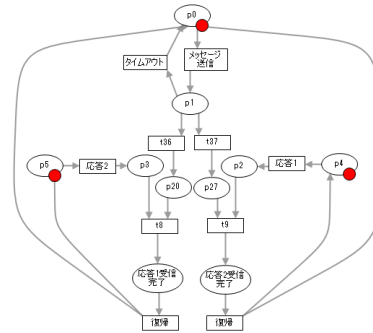


図4 分割前のペトリネット

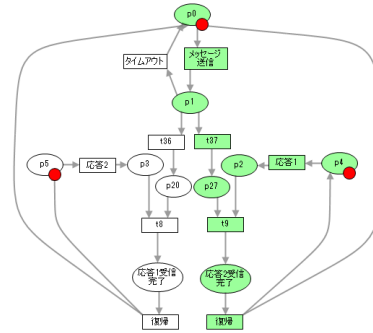
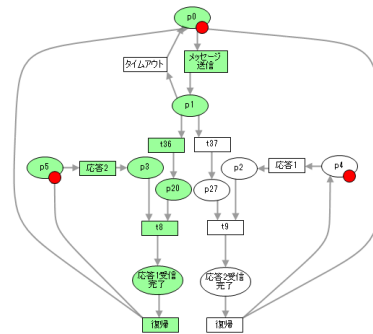
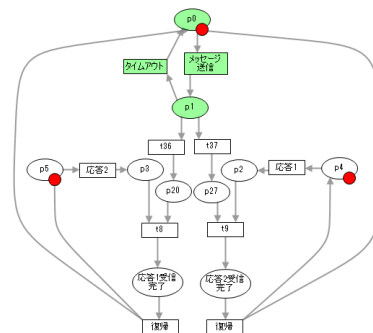
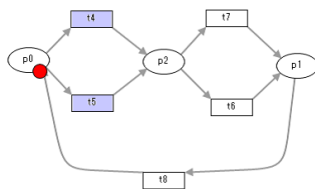


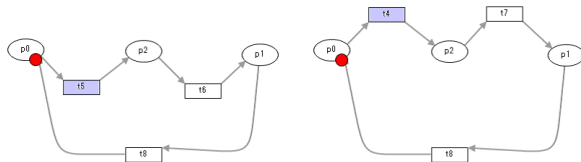
図5 分割後の被覆マークグラフ (グリーンに着色された部分)

5.2 複数の経路が存在する場合の最適な経路選択について

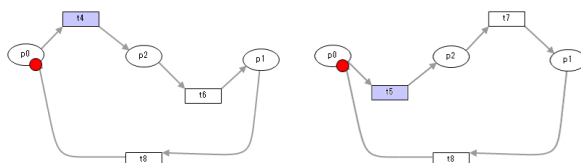
自由選択ネットをマークグラフに分割する際、分割の方法が複数存在する場合がある。たとえば図 6(a) のような場合、このネットは図 6(b) のように分割する場合と図 6(c) のように分割する場合がある。このような場合にどう分割するのが適しているかという議論がある。



(a) 元のペトリネット



(b) 分割方法 1



(c) 分割方法 2

図 6 複数の分割方法があるペトリネットの例

5.3 課題・活性化マーキングの導出

活性安全自由選択ネットのマーキング状態は次のようなものが考えられる。

- (1) 分岐・合流プレースにトークンがある場合
 - (2) 各パーツ内のプレースにトークンがある場合
- さらにパーツ内にトークンがある場合は次のようなマーキング状態が考えられる。

- (a) 共通部分
- (b) 分岐の一方
- (c) 合流の一方

図 7 にパーツの典型的なマーキング状態を示す。

各パーツはマークグラフ構造となっており、また、ネット全体は活性で安全である。このため、(a)、(b) の場合はパーツ内のいくつかのトランジションを発火させることで、そのパーツの各出力プレースがマーキングされた状態になることが容易にわかる。また、(c) の場合もネットが活性安全であることから他のプレース・パー

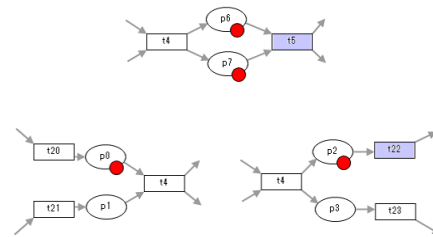


図 7 典型的なパーツのマーキング状態

ツのマーキングを入力プレースまで遷移させることによって、同様に各出力プレースをマーキングされた状態にすることができる。このことを手掛かりにし、各マークグラフを活性な状態にするようなマーキングの導出を行うことが今後の課題となっている。

6 まとめ

今回提案したアルゴリズムによって、強連結で活性安全な自由選択ネットをマークグラフへ分割することができた。今回追加した機能によって、援用ツール上でペトリネットをマークグラフへ分割することができるようになった。

今後は活性化マーキングの導出を行う手法の提案および機能の実装を行っていく。

謝辞 本研究の一部は科学研究費 (23500174) の助成を受けたものである

参考文献

- [1] Tadao Murata : Petri Net: Properties, Analysis and Applications, IEEE, Vol.77, No.4, pp. 541-580, 1989.
- [2] <https://sourceforge.net/projects/hips-tools/>
- [3] 松山千尋, 和崎克己 : Time-Petri Net を用いた非同期回路のモデル化と階層化設計 ; FIT2009 (第 8 回情報科学技術フォーラム) 講演論文集, pp. 523-526, 2009.
- [4] 關屋貴詞, 和崎克己 : 並列制御システム設計の UML アクティビティ図に対するペトリネットによる正当性検証 ; FIT2011 (第 10 回情報科学技術フォーラム) 講演論文集, pp. 253-256, 2011.
- [5] 堀内維作, 和崎克己 : 高水準ペトリネットを記述可能な援用ツール HiPS2 と非同期回路検証への適用 ; FIT2011 (第 10 回情報科学技術フォーラム) 講演論文集, pp. 393-396, 2011.
- [6] 井出和人, 和崎克己 : 自由選択ネットの活性・安全性判定解析アルゴリズム改善と援用ツールへの実装 ; FIT2012 (第 11 回情報科学技術フォーラム), (RA-003), pp17-21, 2012.