

循環の解析による並行プログラムの検証手法

2R-4

辻 泰三 新井 浩志 深澤 良彰 門倉 敏夫
(早稲田大学 理工学部)

1 はじめに

近年、分散型計算機システムやマルチプロセッサ・システムなどの発達により、並行プログラムの重要性が増している。しかし、並行プログラムの論理的エラーは、複数のプロセスの相互作用によって発生するエラーであるという点で、逐次的処理に起因するエラーとは異なっている。よって、従来の逐次型プログラムと比較してその開発は格段に困難である。

並行プログラムに特有である、並行性や非決定性に起因する論理的エラーには、デッドロック、ライブロック、不完全な記述、実行不可能な遷移、バッファオーバーフローなどがある。

本研究では、ライブロックとルーピングの解析を行なう。ルーピングは、有限回数の繰り返しの後には他の状態に遷移する可能性を持っているという点で、ライブロックと異なる。

2 目的と特徴

並行プログラムや通信プロトコルの検証の研究では、到達可能性解析が多く行なわれている。この過程では、並行プログラムは、プロセスの状態遷移とメッセージ通信の関係を記述した通信状態遷移機械モデルを用いて表現される。そして、このモデル上で、全プロセスの初期状態からの、全ての可能な状態遷移を表わしたグローバル状態遷移図を生成する。従来の到達可能性解析では、これを用いて並行プログラム特有である並行性や非決定性に起因する論理的エラーの検証をしている。しかし、この手法では、同じ特性を持ったライブロックとルーピングがグローバル状態遷移図上の複数の箇所に点在して現われてしまうことがあるため、エラー解析が困難である。

これに対して本手法では、到達可能性解析を行なった後、ライブロックとルーピングを合せた循環のクラス分けを行なうことにより、並行プログラムのエラー解析を以下の様に容易にする。

- (1) 異なる状態であるが、同じ特性の循環を検出し、分類して出力する。
- (2) 循環状態に陥った時、循環を起こしている部分と、循環に無関係な部分と分けて明示的に出力する。

- (3) 循環状態を1つの状態として表わし、閉路のない状態遷移図を出力する。

3 基本概念

3.1 通信状態遷移機械モデル

並行プログラムを、5つ組で表わされた通信状態遷移機械でモデル化する^[1]。各プロセスは、有向グラフで表現され、ノードはプロセスの状態を、アークは状態の間の遷移を表わす。また、アークに付随した値は、プラスのときメッセージの出力を、マイナスのときメッセージの入力を表わす。これらのメッセージは、一時的にそれぞれのプロセスのメッセージバッファであるチャンネルに記憶される。

図1に、3つのプロセスで構成された並行プログラムの通信状態遷移機械モデルの例を示す。

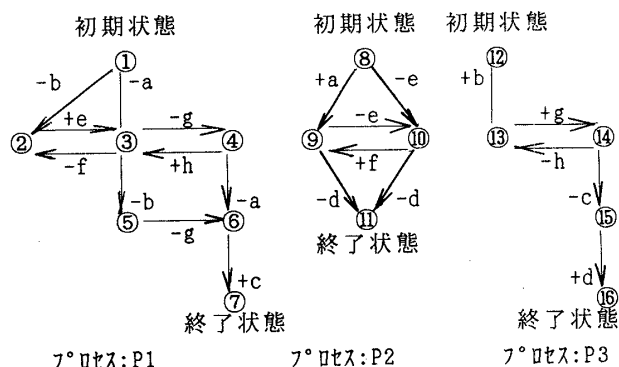


図1：通信状態遷移機械モデルの例

3.2 グローバル状態遷移図

グローバル状態は、全てのプロセスの状態と全てのチャンネルの状態によって表わされ、ある時点のプログラムの実行状態を表わす。

初期状態からの遷移が可能な全てのグローバル状態と、その遷移を表わした図を、グローバル状態遷移図と言う。

このグローバル状態遷移図上で、ライブロックとルーピングは、以下の様に定義される。

- (1) ライブロック：ある一連の状態遷移を繰り返し、かつ他のグローバル状態に遷移ができない状況
- (2) ルーピング：ある一連の状態遷移を繰り返し、かつ他のグローバル状態に遷移が可能な状況

4 循環の解析

4.1 本手法の構成

本手法は、まず、通信状態遷移機械モデルを入力とし、初期状態から状態遷移の到達可能性解析を行なう。次に、この解析結果に基づいて、循環の解析を行なう。

本研究において循環とは、ライブロックとルーピングを合せたものである。

循環のグループとは、同一な状態遷移をする循環であるが、循環に無関係なプロセスの状態などが異なるために、グローバル状態遷移図上に別の循環として現われてしまう循環の集合である。

グループは、さらに独立した循環の基本単位に分割でき、この基本単位をクラスと呼ぶ。このクラスを用いて、グループは以下の様に分類される。

- (1) 単純な1つのクラスで構成されたグループ
- (2) 複数のクラスが、あるグローバル状態で重なり、並列的に合成された複数の閉路が存在するグループ

これを、次の様に記述する。

クラス1 + クラス2

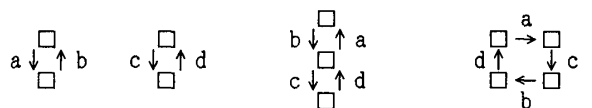
- (3) 複数のクラスが直列的に合成されたグループ

これを、次の様に記述する。

クラス1 * クラス2

ここで、閉路とは、元のグローバル状態に戻ってくる1つの道筋のことである。

例として、2つの循環のクラス1, 2が存在する時、並列的な合成と直列的な合成のグループは次のようになる。



クラス1 クラス2 クラス1+クラス2 クラス1*クラス2

図2：グループの例

グローバル状態遷移図上で複数の閉路が存在する循環には、次の2種類が考えられる。

- (1) 複数のクラスの並列的合成による循環
- (2) 複数の閉路が存在する1つのクラスで構成された循環

この2つを区別するために、それぞれの閉路に対し、閉路の発生条件の一般解を調べる必要がある。一般解は、閉路中のグローバル状態の集合において、変化のないプロセスの状態やチャンネルの状態を削除することによって得られる。発生条件の一般解がそれぞれの閉路において等しければそれらの閉路は依存しており、1つのクラスの循環として分類される。また、発生条件の一般解がそれぞれの閉路において異なっていればそれらの閉路は独立しており、複数のクラスの並列的合成による循環として分類される。

4.2 循環のクラス分け

循環のクラス分けでは、到達可能性解析で検出された循環を、単純なクラス、複数のクラスの並列的な合成、複数のクラスの直列的な合成に分類する。循環のクラス分けは次の様に処理を進める。

step 1: 各循環に対し、その循環を発生している状態遷移の集合を調べ、集合が等しい循環は同じグループとする。

step 2: 各グループに対し、ある閉路の状態遷移の集合が他の閉路の和になっている時は、その基本単位の直列的な合成とする。

step 3: 複数の閉路を持つ各グループに対し、それぞれの閉路の一般解を比べて、それらが異なる時は、並列的な合成とする。

4.3 例

図1の例では、4つの循環が存在する。循環のクラス分けにより、プロセスP1とプロセスP2の間の循環のクラスA、プロセスP1とプロセスP3の間の循環のクラスBの2つのクラスが検出される。グループは、クラスBだけによるグループと、クラスAとクラスBの合成によるグループの2つが検出される。

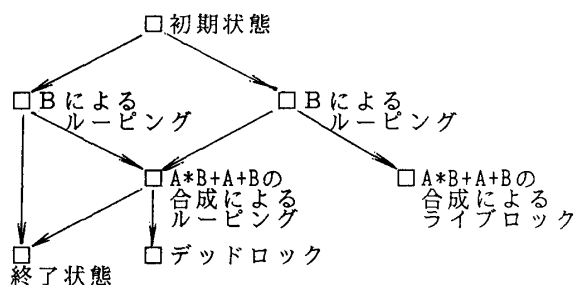


図3：グローバル状態遷移図の略図

5 まとめと今後の課題

本研究では、ライブロックとルーピングを合せた循環のクラス分けを行なうことにより、エラー箇所の分類、局所化を行ない、循環部を明示的に表示する手法を提案した。これにより、エラー解析を容易にする。

また、今後の課題として次の事を考えている。

- ・本手法の有効性の評価
- ・表現方法の考察

参考文献

[1] Y-X.Zhang, "An Interactive Protocol Synthesis Algorithm Using a Global State Transition Graph", IEEE Trans. Software Eng., VOL. 14, NO.3, March 1988