

Timed Pushdown Automata: Expressiveness and Reachability

著者	Uezato Yuya
発行年	2018
その他のタイトル	時間プッシュダウンオートマトンの表現力と到達可能性問題
学位授与大学	筑波大学 (University of Tsukuba)
学位授与年度	2017
報告番号	12102甲第8516号
URL	http://hdl.handle.net/2241/00152771

氏名	上里 友弥				
学位の種類	博士(工学)				
学位記番号	博甲第8516号				
学位授与年月日	平成30年3月23日				
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当				
審査研究科	システム情報工学研究科				
学位論文題目	Timed Pushdown Automata: Expressiveness and Reachability (時間プッシュダウンオートマトンの表現力と到達可能性問題)				
主査	筑波大学 教授	博士(工学)	亀山 幸義		
副査	筑波大学 教授	博士(理学)	加藤 和彦		
副査	筑波大学 教授	博士(工学)	三末 和男		
副査	筑波大学 准教授	博士(情報理工学)	海野 広志		
副査	東京工業大学 教授	博士(理学)	南出 靖彦		
副査	千葉大学 教授	博士(理学)	山本 光晴		

論文の要旨

オートマトン理論は、ソフトウェアやシステムのモデル化・抽象化の手段として、今日のシステム検証を支える基礎理論となっている。オートマトンに、抽象化した「時間」の概念を追加した時間オートマトンは1990年頃に導入され、さらにスタックを追加した Pushdown Timed Automata (PTA) や Dense-timed Pushdown Automata (DTPDA) などの拡張の提案がなされた。

本論文は、DTPDA を拡張する2つの計算モデルを提案し、これらの計算モデルと既存の体系の表現力の比較と、オートマトン理論で基本的な判定問題である到達可能性問題の決定可能性について探求したものである。

第一の計算モデルである Timed Pushdown Automata with Multiple Local Clocks (MTPDA) は、DTPDA に対して各スタックフレームが複数の局所クロックを持ち、局所クロックの値をいつでも検査することができるなどの拡張をしたモデルである。これらの大幅な拡張にもかかわらず、任意の MTPDA と言語等価な PTA を構成できるということを証明し、また、到達可能性問題の決定可能性も証明している。

第二の計算モデルである Synchronized Recursive Timed Automata (SRTA) は、MTPDA に小数部検査制約と呼ばれる検査式を追加した計算モデルである。この拡張により、SRTA では受理できるが、MTPDA では受理できない言語の存在を示し、SRTA が MTPDA より真に表現力が高い計算モデルであることを証明している。さらに Abdulla らの DTPDA に対する到達可能性問題の決定可能性証明を詳細に分析することにより、SRTA に対する同問題の決定可能性を直接証明している。この分析の副産物として、決定可能性の証明構造に対する新しい知見を得ることに成功している。

審査の要旨

【批評】

計算のモデル化における主要な目標の1つは、言語の表現力の同定と種々の判定問題の決定可能性の解明である。スタックとクロックを持つ「時間プッシュダウンオートマトン(DTPDA)」における到達可能性問題が決定可能であることは、2012年にAbdullaらによって初めて示された。しかし、その証明は非常に複雑であり、表現力も弱い体系となっており、基礎理論としても応用上も改善が待たれている状態であった。本論文はこの既存研究の問題点を克服するため、DTPDAの拡張を行い、その表現力と到達可能性問題の決定可能性について掘り下げて研究を行ったものである。

この論文が提案した2つの計算モデルのうち、MTPDAについては、一見、大幅に見える拡張が実は表現力の向上を生じないという事実を証明したものであり興味深い結果である。MTPDAの拡張は、複数の局所クロックの導入と局所クロックのリセット操作の追加という非常に自然なものであるが、このような計算モデルにおいても局所クロックの除去が可能であることは意外な結果であり、高く評価できる。

第二のモデルであるSRTAは、Abdullaらによる複雑な証明を精密に分析し再構成することで得られた知見に基づいて提案した計算モデルであり、以下の点で大きな貢献が認められる。

(1) スタックによる時間オートマトンの拡張において、小数部検査制約の導入が表現力の向上に寄与することを明らかにした。論文では、小数部検査制約がない計算モデルでは、時間オートマトンのスタック拡張として自然な言語を受理できないことを示しており、先行研究がこれまでに提案してきた体系が十分な表現力を持っていなかったことを明らかにした。

(2) SRTAの到達可能性問題が決定可能であることの証明をBackward-forward simulationの分解という考え方をを用いて整理し、証明の本質的な構造を明らかにした。また、証明で用いられているリージョン構成を精密に分析し、構成要素が証明のどの部分で必要になるかも分析している。このように証明の構造が詳細に明らかになったことにより、今後、時間プッシュダウンオートマトンのさらなる拡張と、それに対する到達可能性問題の決定可能性証明に応用できる可能性が広がり、基礎理論研究としての価値が高い成果であると大いに評価する。

【最終試験の結果】

平成30年1月31日、システム情報工学研究科において、学位論文審査委員の全員出席のもと、著者に論文について説明を求め、関連事項につき質疑応答を行った。その結果、学位論文審査委員全員によって、合格と判定された。

【結論】

上記の学位論文審査ならびに最終試験の結果に基づき、著者は博士(工学)の学位を受けるに十分な資格を有するものと認める。