

Title	意味経路順序と重み付き経路順序の統合
Author(s)	齊藤, 哲平
Citation	
Issue Date	2026-03
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	https://hdl.handle.net/10119/20584
Rights	
Description	Supervisor: 廣川 直, 先端科学技術研究科, 博士

氏 名	齊藤 哲平		
学 位 の 種 類	博士 (情報科学)		
学 位 記 番 号	博情第 571 号		
学 位 授 与 年 月 日	令和 8 年 3 月 25 日		
論 文 題 目	Unifying Semantic Path Order and Weighted Path Order		
論 文 審 査 委 員	廣川 直	北陸先端科学技術大学院大学	准教授
	緒方 和博	北陸先端科学技術大学院大学	教授
	高木 翼	北陸先端科学技術大学院大学	准教授
	山田 晃久	産業技術総合研究所	主任研究員
	René Thiemann	インスブルック大学	准教授

論文の内容の要旨

Orders play important roles in analysis of term rewrite systems. Among others, semantic path orders by Kamin and Lévy and weighted path orders by Yamada, Kusakari and Sakabe are known to be quite powerful. The thesis presents a generalization of these two classes of orders, which is useful for not only termination analysis but also for reachability analysis.

keywords: term rewriting, termination, reachability, semantic path order, weighted path order

論文審査の結果の要旨

本学位論文は計算モデルの一つである項書換えの簡約順序について論じている。簡約順序は停止性を証明する際に用いられる基盤技法である。定理自動証明系においては証明効率を掌る重要な要素技術でもあり、強力な簡約順序の実現は両分野における主要課題となっている。1970 年の Knuth-Bendix 順序の登場以来、多項式順序、辞書式経路順序など、多種多様な簡約順序が考案されてきた。単調意味経路順序 (Borralleras et al. 2000) と重み付き経路順序 (Yamada et al. 2014) は既存の簡約順序の大部を包含する最も強力な簡約順序であり、現代の停止性解析技法の理論的枠組みと自動化体系を与えている。しかしながら両者の関係は 10 年以上未解明のままであった。本論文はこの問題に解決を与え、両者を統一する新たな順序理論の体系を構築する。具体的な貢献は以下の通り。

まず簡約順序として、重み付き経路順序が単調意味経路順序の特殊な場合であることを示し、本分野における十年来の未解決問題を解決した。この洞察をもとに前者を後者の枠組みで再定式化することで、一般重み付き経路順序という両者を統一する簡約順序を得た。この順序は重み付き経路順序が持つ単純性と呼ばれる制約を緩和するとともに、停止性証明のための変換手法として知られる依存対 (Arts and Giesl 2000) を模倣する能力を有し、実用的にも強力な簡約順序である。

現代の停止性証明技術は依存対に立脚し、この体系では簡約順序の役割を二つの順序に分割した簡約対が用いられる。重み付き経路順序にはその簡約対版が知られている一方、単調意味経路順序に対しては簡約対の構成方法が未解決問題として残っていた。本論文は一般重み付き経路順序の概念を用いることで、後者の問題に肯定的な解決を与えた。

これらに加え、一般重み付き経路順序が結合律・交換律を法とする簡約順序へ拡張可能であること、および到達可能性解析に使用される補簡約対へ拡張可能であることを示した。これらの拡張は仕様記述言語で必要とされる停止性および合流性証明自動化の技法として用いることができ、ソフトウェア検証の理論基盤に資する貢献である。

いずれの貢献も、非自明な洞察に基づく問題分析と、独創性の高い理論構想に基づく解決によるものである。本研究成果の総体は、項書換えにおける簡約順序の理論体系を統一し、自動演繹の新たな基礎を築くものであり、学術的に貢献するところが大きい。よって博士（情報科学）の学位論文として十分価値あるものと認めた。