

Title	項書換えのための合成可能な合流性基準
Author(s)	新谷, 喜楽
Citation	
Issue Date	2023-09
Type	Thesis or Dissertation
Text version	ETD
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10119/18782">http://hdl.handle.net/10119/18782</a>
Rights	
Description	Supervisor:廣川 直, 先端科学技術研究科, 博士

氏 名	新谷 喜楽		
学位の種類	博士 (情報科学)		
学位記番号	博情第 517 号		
学位授与年月日	令和 5 年 9 月 22 日		
論文題目	Compositional Confluence Criteria for Term Rewriting		
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	同	教授
	小川 瑞史	同	教授
	青戸 等人	新潟大学	教授
	MIDDELDORP, Aart	University of Innsbruck	教授

### 論文の内容の要旨

Term rewriting is a computation model for equational reasoning. This model underlies various fields in computer science, including functional programming, automated theorem proving, and software verification based on equational specifications. In rewriting there are two fundamental properties. One is termination, which ensures finiteness of computation steps. The other is confluence. It guarantees uniqueness of computation results without relying on any specific computational strategy. For a computational system with non-determinism, confluence corresponds to consistency of the system. It plays a key role as well-definedness of function definitions and correctness of specifications.

In this thesis we present a new approach for analyzing confluence of left-linear term rewrite systems based on compositional confluence criteria. A compositional confluence criterion means a sufficient condition that, given a rewrite system and its subsystem, confluence of the subsystem implies confluence of the original system. Since such a subsystem can be analyzed by any other (compositional) confluence criterion, compositional confluence criteria can be applied to subsystems successively. This method enables us to decompose a rewrite system into its subsystem for showing confluence of the original one.

In order to obtain compositional confluence criteria, we develop a variant of decreasing diagrams method. It is known that most of confluence criteria for left-linear rewrite systems can be shown by the method. Exploiting this fact, we demonstrate how those confluence criteria can be recast into compositional criteria by adopting a compositional version of the decreasing diagram method in their proofs. Furthermore we show how existing confluence criteria based on decreasing diagrams are generalized to ones composable with other criteria. We also show how such a criterion can be used as a reduction method to remove rewrite rules unnecessary for confluence analysis. Effectiveness of these approaches is assessed by experimental data based on our confluence tool Hakusan. In addition to these contributions, we prove that Toyama's parallel closedness result based on parallel critical pairs subsumes his almost parallel closedness theorem.

**keywords:** *term rewriting, confluence, decreasing diagrams, parallel closedness, automation.*

## 論文審査の結果の要旨

本論文は理論計算機科学における項書換えの合流性について論じたものである。項書換えは等式に基づく主要な計算モデルの一つであり、プログラミング言語、定理自動証明、仕様記述に基づくソフトウェア検証の理論基盤になっている。「合流性」は計算過程によらず計算結果の一意性を保証する性質であり、項書換えの応用において必須となる性質である。それゆえ合流性をいかに証明するかが項書換え研究の中心課題となっている。本論文は合流性の証明について4つの成果を報告している。

第一に、合流性の十分条件として有名な **Almost Parallel Closedness** の定理 (外山 1988) が、並列危険対を用いた定理 (外山 1981) に包含されることを本論文は示した。第二に、合流性証明において、合流性基準 (合流性の十分条件) を互いに組み合わせて合流性の十分条件を構成することができる「合成可能合流性基準」の概念を導入した。既知の合流性定理の多くは減少ダイアグラムの技法によって証明できることが知られている。その事実を利用し、既存の合流性基準から合成可能な定理を導出する系統的な技法を考案した。第三に、項書換えシステムの合流性問題をその部分システムの合流性問題に帰着させる還元手法を、先の合成可能な合流性基準から導出する技法を考案した。これは合流性がシングネチャ拡張に閉じる性質に立脚した技法であり、冗長性やモジュラリティに基づく競合手法の一般化になっている。第四に、合流性自動証明ツール **Hakusan** を開発し、これらの理論的成果が合流性証明に有効であることを示した。

合成可能合流性基準の概念および還元手法を構成する技法は、変換手法・分解手法に続く、方法論として新しい証明技法である。それらの概念自体は初等的なものであるが、モジュラリティ・可換性・並列危険対・相対書き換えに関する深い知識と、既存の合流性定理の証明技法に関する深い洞察無くしては得られない理論体系である。半世紀以上に渡り合流性の研究がなされてきたが、証明の方法論として本成果が貢献を成したことは特筆に値する。

以上、本論文は理論計算機科学における項書換えにおいて、合成可能な合流性基準と合流性問題の還元を基にした新たな証明技法を構築、その有効性を理論および実験によって示したものであり、学術的に貢献するところが極めて大きい。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。