

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 3月31日現在

機関番号：17701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010 ～ 2012

課題番号：22500016

研究課題名（和文） 緩クリーニ代数を用いたシステムの遷移系モデル簡略化

研究課題名（英文） Simplification of transition systems with the use of lazy Kleene algebras

研究代表者

古澤 仁（FURUSAWA HITOSHI）

鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号：00357930

研究成果の概要（和文）： 緩クリーニ代数の部分クラスの間関係および遷移系モデルの関係による記述に関して、以下の成果を得た。

- (1) ある種のイデアル完備化によって*連続なべき等左半環とD連続なべき等左半環の間の随伴関係を与えるための十分条件および一般に与えられないことを示す具体例
- (2) 完備べき等左半環が二項関係および二項多重関係によって表現可能であること
- (3) クォンテールをある集合上の二項関係全体のなすクォンテールへ理想的に埋め込むための必要十分条件

研究成果の概要（英文）： The following results on relationship between subclasses of lazy Kleene algebras and relational description of transition models are obtained.

- (1) a sufficient condition to give an adjunction between the category of *-continuous idempotent left semirings and the category of D-continuous idempotent left semirings by a kind of ideal completion
- (2) relational and multirelational representation theorems for complete idempotent left semirings
- (3) a necessary and sufficient condition for a quantale to have quantale-homomorphic embedding into a quantale consisting of the set of all binary relations on some set

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：プログラム理論

1. 研究開始当初の背景

モデル検査を用いたシステム検証においては、モデルの簡約化が不可欠であり、様々な簡約化法が提案されている。しかし、特にモデル検査法が導入過程にあるソフトウェア検証においては、簡約化は手作業で行われることが多く、簡約化されたモデルが検証対象の性質を保存しているか否かを判定するのは非常に難しい。双模倣関係は、二つの遷移系の間で、安全性や活性と呼ばれる性質を保存する関係である。

クリーニ代数は Kozen によって提案され、自由代数の具体的な構造および等価性判定の決定手続きが解明された。クリーニ代数は、プログラムの部分正当性検証やコンパイラの正当性検証、遷移系のトレース等価性判定などに有用であることがすでに示されており、これらを自動的に処理するための研究が進められている。

Kozen のクリーニ代数では捉えられない現象をクリーニ代数と同様のスタイルで取り扱うための体系が Möller, Cohen, McIver らによって近年相次いで提案された。本研究の研究代表者も論文 Takai, Toshinori and Furusawa, Hitoshi: Monodic Tree Kleene Algebra, LNCS 4136, pp.402-416, Springer (2006) において高井利憲氏（産業技術総合研究所（当時）奈良先端大学院大学（現在））と共同で正規木言語を取り扱うための体系を提案した。

これら近年提案された体系は、互いに良く似た体系であるが、これらの関係については殆ど考察されていなかった。研究代表者は論文 Nishizawa, K., Tsumagari, N. and Furusawa, H.: The Cube of Kleene Algebras and the Triangular Prism of Multirelations, LNCS 5827, pp.276-290, Springer (2009) において、西澤弘毅氏（鳥取環境大学（当時）神奈川大学（現在））、津曲紀宏氏（鹿児島大学（当時）京都大学（現在））と共同で二項多重関係の立場からこれらを考察し、それぞれに対応する二項多重関係のクラスを明らかにした。

2. 研究の目的

本研究は、システムの自動的モデル簡約化の

実現を目的としたものである。モデル検査法は、システム検証の形式的手法の一つである。モデル検査法において、システムはある種の遷移系として捉えられ、状態空間を全探索することにより、検査を行う。よって、モデルの状態数を抑えることが、モデル検査を実施する上で最も重要な問題である。緩クリーニ代数を用いると、「遷移系＝項、双模倣関係＝等式」として扱うことが可能である。本研究では、

- (1) 自由緩クリーニ代数の具体的な構成を明らかにし、この構成法に基づき、
 - (2) 等価性決定手続きおよび、
 - (3) 簡約化手続き
- を与えることにより、自動的モデル簡約化の実現を目指す。

3. 研究の方法

次のような方法で研究を遂行した。

- (1) 関係代数やクリーニ代数、プロセス代数など、本研究の対象に特に関連の深い代数構造を主題とする研究会で、新しい知見や新現象の発見など最新の研究情報を得て、本研究の観点から検討を加えた。（International Conference on Relational and Algebraic Methods in Computer Science (RAMiCS), Workshop on Lattices, Relations and Kleene Algebras, など）

- (2) 本研究の研究手法を見直すために、計算機科学における論理学や幾何学、代数学での研究手法の最新動向の情報を得た。（代数、論理、幾何と情報科学研究集会 (ALGI), 記号論理と情報科学研究集会 (SLACS), など）

- (3) 国内外の専門家との議論や自動定理証明システム、モデル探索システムを用いることにより、考察を強化しながら新しい知見を得た。（ドイツ・アウグスブルグ大学訪問 (Bernhard Möller 氏, Roland Glück 氏, Han Hing Dang 氏との議論), イギリス・シェフィールド大学訪問 (Georg Struth 氏との議論), 定理・モデル探索システム prover9/mace4 <http://www.cs.unm.edu/~mccune/mace4/> の利用, など）

- (4) 研究の進展状況に応じて、学会発表や専門家のレビューを通じて、随時、本研究の

見直しを行った。

(International Conference on Relational and Algebraic Methods in Computer Science (RAMiCS) での発表, Workshop on Lattices, Relations and Kleene Algebras での発表, 河原康雄氏 (九州大学名誉教授) の招聘, など)

4. 研究成果

次のような成果が得られた。

(1) 緩クリーニ代数の部分クラスである * \mathcal{D} -連続なべき等左半環と \mathcal{D} -連続なべき等左半環の間にある種のイデアル完備化によって随伴関係が得られるための十分条件を与え, 同様の構成方法でこれらの間に随伴関係を構築することが一般には不可能であることを, 本言語を用いた具体例を与えることにより示した. また, イデアル完備化に更なる考察を加え, イデアル完備化が完備上半束の圏から上半束の圏への忘却関手の左随伴を与えることを示す方法に対して, 上半束を T 代数上の上半束へ一般化すると, 例として, 完備べき等半環の圏からべき等半環の圏への忘却関手の左随伴を扱えるようになることを示した.

(2) 緩クリーニ代数の部分クラスである完備べき等左半環が二項関係および二項多重関係によって表現可能であることを示した. 加えて, ここで与えた完備べき等左半環の二項関係や二項多重関係による表現を実現するために与えた埋め込み写像は, 完備べき等左半環の単位元を二項関係全体や二項多重関係全体のなす完備べき等左半環の単位元にうつすとは限らないなど, 多少奇妙な振る舞いを示すことも明らかになった. この奇妙な振る舞いは, 完備べき等左半環の部分クラスであるクォンテールを二項関係によって表現した場合にも起こる.

(3) クォンテールをある集合上の二項関係全体のなすクォンテールへ理想的に (全ての演算を保ちつつ) 埋め込むための必要十分条件を与えた. この結果は, 完備べき等左半環の二項多重関係による表現に一般化可能であると予想される.

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 7 件)

(1) Nishizawa, Koki and Furusawa, Hitoshi: Relational Representation Theorem for Powerset Quantales, In Wolfram Kahl and Timothy G. Griffin eds., Relational and Algebraic Methods in Computer Science, 13th International Conference on Relational and Algebraic Methods in Computer Science, RAMiCS 2012, Cambridge, UK, September 2012, Proceedings [査読有], LNCS 7560, pp. 207-218, Springer (2012). DOI: 10.1007/978-3-642-33314-9_14

(2) Nishizawa, Koki. and Furusawa, Hitoshi: Ideal Completion of Join Semilattice over T-algebra, Bulletin of Tottori University of Environmental Studies [査読有], Vol. 9 and 10, pp. 91-103, March 2012.
<http://www.kankyo-u.ac.jp/f/845/bulletin/009-010/091-103.pdf>

(3) Furusawa, Hitoshi, Sanda, Fumiya. and Tsumagari, Norihiro: Remarks on Ideal Completion of * \mathcal{D} -Continuous Idempotent Left Semirings, Bulletin of Informatics and Cybernetics [査読有] Vol. 43 pp. 1-21 (2011).

(4) Furusawa, Hitoshi and Nishizawa, Koki: Relational and Multirelational Representation Theorems for Complete Idempotent Left Semirings, In Harrie de Swart ed., Relational and Algebraic Methods in Computer Science, 12th International Conference on Relational and Algebraic Methods in Computer Science, RAMiCS 2011, Rotterdam, The Netherlands, May/June 2011, Proceedings, [査読有] LNCS 6663, pp. 148-163, Springer (2011). DOI: 10.1007/978-3-642-21070-9_13

[学会発表] (計 8 件)

(1) Hitoshi Furusawa, Relational and Multirelational Representation Theorems for Complete Idempotent Left Semirings, 12th International Conference on

Relational and Algebraic Methods in
Computer Science (RAMiCS 2011), June 1st.
2011, Rotterdam, The Netherlands

(2) Hitoshi Furusawa, Representation
theorems for complete idempotent left
semirings, Workshop on Lattices,
Relations and Kleene Algebras, September
21st. 2010, London, UK

[その他]

ホームページ等

<http://www.sci.kagoshima-u.ac.jp/~furusawa/person/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

古澤 仁 (FURUSAWA HITOSHI)

鹿児島大学・大学院理工学研究科・准教授

研究者番号 : 00357930