

令和元年6月10日現在

機関番号：32643

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26330263

研究課題名(和文) 知識推論システムの論理的基礎付け

研究課題名(英文) Logical foundations of knowledge representation and reasoning systems

研究代表者

上出 哲広 (KAMIDE, Norihiro)

帝京大学・理工学部・准教授

研究者番号：60332053

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,500,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、知識表現と推論を融合した効率の良いシステムを実現するための理論基盤を論理学の知見を用いて構築した。知識表現と推論は、人工知能分野の技術であり、インターネットの基礎技術として重要な技術である。インターネット上の多くのシステムは知識表現と推論によってその理論的正当性が保障されている。そのようなインターネット上の効率の良いシステムを実現するための理論基盤として、時間論理、矛盾許容論理、記述論理などと呼ばれる論理体系が用いられている。本研究では、これら複数の論理体系を融合する方法などを提案した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた結果は、インターネット上のシステムを記述したり検証したりするのに役に立つ論理体系に関する基本的な結果である。例えば、本研究で提案した拡張時間論理やそれに対する基本定理は、従来の時間論理に基づいたソフトウェア検証技術を、これらを用いて拡張することができることを理論的に保証する。また、本研究で提案した拡張論理を使用することによって、web上の複雑な階層構造を検証したり、効率の良いプログラムを書いたりするための厳密な理論基盤を提供することができる。

研究成果の概要(英文)：In this study, we develop methods for combining some non-classical logics such as temporal logics and paraconsistent logics. These proposed logical methods are intended to be useful for realizing efficient and expressive knowledge representation and reasoning systems. To develop such methods, we introduce some new combined non-classical logics and prove some fundamental theorems including cut-elimination, completeness, and embedding theorems for these logics. Furthermore, we propose some new applications of these proposed logics and methods to computing technologies such as model checking and logic programming.

研究分野：数理論理学 情報論理学

キーワード：非古典論理 矛盾許容論理 時間論理 モデル検査

## 様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

本研究は応用サイドからの動機付けに基づいた理論研究である。本研究は、純粋理論(論理学)研究と応用人工知能研究とのギャップを埋めることを動機としている。理論サイドでの研究では極端に抽象化した定式化で厳密性のみを要求しがちであり、「理論のための理論研究」になってしまっている感が否めない。一方、応用サイドでの研究は特殊な狭い分野に限定したものが多く、理論的正当化が行われていないものも多く見受けられる。これら理論と応用のギャップを埋めることを意図して本研究の構想に至った。

### 2. 研究の目的

本研究では、知識表現と推論を融合した知識推論システムの理論基盤を論理学の知見を用いて構築することを目的とする。その際、汎用性(高い表現力, 高い仕様記述力)と効率性(低い計算量, 高速検証能力)の両方を同時に満たすものを設計する。従来の知識推論システムは特殊目的のものが多く汎用性が乏しい。また、計算量爆発問題が発生し、効率性を追求することが困難である。本研究では、これら従来の問題点を同時に解決可能な理論基盤の構築を目標とする。

### 3. 研究の方法

本研究では、当該研究期間内に、モジュラ性を持つ知識推論システムの基礎となる論理体系を構築し、それをベースにした汎用的かつ効率的な知識推論アルゴリズムを開発する。具体的な研究項目は以下の通りである。(1) 論理の組み合わせメカニズムの開発。(2) 拡張組み合わせ論理体系の構築。(3) 構築する論理をベースにした知識推論アルゴリズム(モデル検査アルゴリズムおよび論理プログラミング基盤など)の開発。

### 4. 研究成果

本研究の当初想定していた具体的な研究項目は以下の通りであった。(1) 論理の組み合わせメカニズムの開発。(2) 拡張組み合わせ論理体系の構築。(3) 構築する論理をベースにした知識推論アルゴリズムの開発。これらに対して、本研究では以下の結果を得た。

(1)と(2)に関しては、埋め込み定理を用いた論理の組み合わせメカニズムおよびそれに基づいた複数の拡張論理を提案した。埋め込み定理の考え方に基づいて、矛盾許容論理、時間論理などのいくつかを組み合わせた拡張論理を複数提案した。そして、それらに対してクリプケスタイルの意味論およびシーケント・自然演繹スタイルの証明体系を与えた。さらに、それら意味論や証明体系に対して、完全性定理、カット除去定理などの定理を証明した。これら定理を証明するにあたって埋め込み定理を用いた新たな証明手法を開発した。提案したこのような証明手法を用いることによって、今まで証明することができなかった多くの拡張論理に対する上記基本定理を証明できるようになった。

(3)に関しては、上記の提案した意味論を用いたモデル検査への応用を提案した。具体的には、本研究で提案した矛盾許容時間論理、矛盾許容確率時間論理および階層演算子を持つ時間論理のモデル検査への応用を提案した。まず、これら拡張論理を用いたモデル検査アルゴリズムを提案した。これらアルゴリズムは埋め込み定理に基づいたトランスレーション関数を使用することにより得られた。そして、これらを使用することにより、矛盾状態を許容する臨床推論および階層性を持つ推論を検証する方法を提案した。以上の結果により、今まで、論理を用いて適切に扱うことができなかったような応用分野に対して、提案した拡張論理およびそれらの意味論・証明体系を使用することの有用性を明らかにすることができた。

### 5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 36 件)

① [Norihiro Kamide](#), Proof theory of paraconsistent quantum logic, 査読有, Journal of Philosophical Logic 47(2), Springer, pp. 301-324, 2018. DOI: 10.1007/s10992-017-9428-z

② [Norihiro Kamide](#), Decidable temporal and sequential relevant logics, 査読有, Journal of Logic and Computation 28 (2), pp. 403-432, Oxford University Press, 2018. DOI: 10.1093/logcom/exx04

③ [Norihiro Kamide](#), Kazuki Endo, Logics and translations for inconsistency-tolerant model checking, 査読有, Proceedings of the 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2018), Volume 2, pp. 191-200, Science and Technology Publications, 2018. DOI: 10.5220/0006640601910200

④ [Norihiro Kamide](#), Phase semantics for multilattice formalism, 査読有, Proceedings of the 47th IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL 2017), pp. 31-36, IEEE Press, 2017. DOI: 10.1109/ISMVL.2017.13

⑤ [Norihiro Kamide](#), Extending ideal paraconsistent four-valued logic, 査読有, Proceedings of the 47th IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL 2017), pp. 49-54, IEEE Press, 2017. DOI: 10.1109/ISMVL.2017.14

⑥ [Norihiro Kamide](#), Natural deduction for connexive paraconsistent quantum logic, 査読有, Proceedings of the 47th IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL 2017), pp. 207-212, IEEE Press, 2017. DOI: 10.1109/ISMVL.2017.12

- ⑦ Norihiro Kamide, Hitoshi Omori, An extended first-order Belnap-Dunn logic with classical negation, 査読有, Proceedings of the 6th International Workshop on Logic, Rationality, and Interaction (LORI 2017), Lecture Notes in Computer Science 10455, pp. 79-93, Springer, 2017. DOI: 10.1007/978-3-662-55665-8\_6
- ⑧ Norihiro Kamide, Ryu Yano, Logics and translations for hierarchical model checking, 査読有, Proceedings of the 21st International Conference on Knowledge-Based and Intelligent Information & Engineering Systems, Procedia Computer Science 112, pp. 31-40, Elsevier, 2017. DOI: 10.1016/j.procs.2017.08.014
- ⑨ Norihiro Kamide, Yaroslav Shramko, Embedding from multilattice logic into classical logic and vice versa, 査読有, Journal of Logic and Computation 27 (5), pp. 1549-1575, Oxford University Press, 2017. DOI: 10.1093/logcom/exw015
- ⑩ Norihiro Kamide, Logics with definitional reflection rules, 査読有, Journal of Logic and Computation 27 (5), pp. 1523-1548, Oxford University Press, 2017. DOI: 10.1093/logcom/exw013
- ⑪ Norihiro Kamide, Yaroslav Shramko, Modal multilattice logic, 査読有, Logica Universalis 11(3), pp. 317-343, Springer, 2017. DOI: 10.1007/s11787-017-0172-5
- ⑫ Norihiro Kamide, Relating first-order monadic omega-logic, propositional linear-time temporal logic, propositional generalized definitional reflection logic and propositional infinitary logic, 査読有, Journal of Logic and Computation 27 (7), pp. 2271-2301, Oxford University Press, 2017. DOI: 10.1093/logcom/exx006
- ⑬ Norihiro Kamide, Paraconsistent sequential linear-time temporal logic: Combining paraconsistency and sequentiality in temporal reasoning, 査読有, Reports on Mathematical Logic 52, pp. 3-44, Jagiellonian University Press, 2017. DOI: 10.4467/20842589RM.17.001.7139
- ⑭ Norihiro Kamide, Paraconsistent double negations as classical and intuitionistic negations, 査読有, Studia Logica 105 (6), pp. 1167-1191, Springer, 2017. DOI: 10.1007/s11225-017-9731-2
- ⑮ Norihiro Kamide, Yaroslav Shramko, Heinrich Wansing, Kripke Completeness of bi-intuitionistic multilattice logic and its connexive variant, 査読有, Studia Logica 105 (6), pp. 1193-1219, Springer, 2017. DOI: 10.1007/s11225-017-9752-x
- ⑯ Norihiro Kamide, Yosuke Matsuo, Mitsuhiro Ogawa, Paraconsistent sequential linear-time temporal logic and its application to clinical reasoning verification: A brief survey and future work, 査読無, International Journal of Applied & Experimental Mathematics 2 (2), 2017. 121, Graphy Publications, 2017. DOI: 10.15344/2456-8155/2017/121
- ⑰ Norihiro Kamide, Bunched sequential information, 査読有, Journal of Applied Logic 15, pp. 150-170, 2016, Elsevier. DOI: 10.1016/j.jal.2016.02.003
- ⑱ Norihiro Kamide, A decidable paraconsistent relevant logic: Gentzen system and Routley-Meyer semantics, 査読有, Mathematical Logic Quarterly 62 (3), pp. 1-13, 2016, Wiley-vch Verlag. DOI: 10.1002/malq.201400086
- ⑲ Norihiro Kamide, Daiki Koizumi, Method for combining paraconsistency and sequentiality in temporal reasoning, 査読有, Journal of Advanced Computational Intelligence and Intelligent Informatics 20 (5), pp. 813-827, 2016, Fuji Technology Press. DOI: 10.20965/jaciii.2016.p0813
- ⑳ Norihiro Kamide, Heinrich Wansing, Completeness of connexive Heyting-Brouwer logic, 査読有, IFCoLog Journal of Logics and their Applications 3 (3), pp. 441-466, 2016, College Publications. <http://www.collegepublications.co.uk/downloads/ifcolog00007.pdf>
- ㉑ Norihiro Kamide, Paraconsistent double negation as a modal operator, 査読有, Mathematical Logic Quarterly 62 (6), pp. 552-562, 2016, Wiley-vch Verlag. DOI: 10.1002/malq.201500042
- ㉒ Norihiro Kamide, Cut-free systems for restricted bi-intuitionistic logic and its connexive extension, 査読有, Proceedings of the 46th IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL 2016), pp. 137-142, IEEE Press. DOI: 10.1109/ISMVL.2016.11
- ㉓ Norihiro Kamide, Paraconsistent double negation that can simulate classical negation, 査読有, Proceedings of the 46th IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL 2016), pp. 131-136, IEEE Press. DOI: 10.1109/ISMVL.2016.12
- ㉔ Norihiro Kamide, Intuitionistic De Morgan verification and falsification logics, 査読有, Proceedings of the 8th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2016), pp. 233-240, 2016, Science and Technology Publications. DOI: 10.5220/0005629902330240
- ㉕ Norihiro Kamide, Duality in some intuitionistic paraconsistent logics, 査読有, Proceedings of the 8th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2016), pp. 288-297, 2016, Science and Technology Publications. DOI: 10.5220/0005684202880297

- ②⑥ Norihiro Kamide, Trilattice logic: An embedding-based approach, 査読有, Journal of Logic and Computation 25 (3), pp. 581-611, 2015, Oxford University Press. DOI: 10.1093/logcom/exu019
- ②⑦ Norihiro Kamide, Inconsistency-tolerant temporal reasoning with hierarchical information, 査読有, Information Sciences 320, pp. 140-155, 2015, Elsevier. DOI: 10.1016/j.ins.2015.05.015
- ②⑧ Norihiro Kamide, Interpolation theorems for some variants of LTL, 査読有, Reports on Mathematical Logic 50, pp. 3-20, 2015, Jagiellonian University Press. DOI: 10.4467/20842589RM.15.001.3910
- ②⑨ Norihiro Kamide, Reasoning in medical and tutoring systems: A decidable first-order temporal paraconsistent non-commutative logic, 査読有, International Journal of Software and Informatics 9 (1), pp. 73-92, 2015, The Institute of Software, Chinese Academy of Sciences (ISCAS). [http://ijsi.alljournals.cn/ch/reader/view\\_abstract.aspx?file\\_no=i204](http://ijsi.alljournals.cn/ch/reader/view_abstract.aspx?file_no=i204)
- ③⑩ Norihiro Kamide, A decidable temporal relevant logic for time-dependent relevant human reasoning, 査読有, Proceedings of the 5th International Workshop on Logic, Rationality, and Interaction (LORI 2015), Lecture Notes in Computer Science 9394, pp. 182-194, 2015, Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-48561-3
- ③⑪ Norihiro Kamide, Single-succedent system approach to Boolean BI, 査読有, Proceedings of the 19th International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems (KES 2015), Procedia Computer Science 60, pp. 27-36, 2015, Elsevier. DOI: 10.1016/j.procs.2015.08.101
- ③⑫ Norihiro Kamide, Embedding theorems for LTL and its variants, 査読有, Mathematical Structures in Computer Science 25 (1), pp. 83-134, 2015, Cambridge University Press. DOI: 10.1017/S0960129514000048
- ③⑬ Norihiro Kamide, Inconsistency and sequentiality in LTL, 査読有, Proceedings of the 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Vol. 2., pp. 46-54, 2015, Science and Technology Publications. <https://dblp.org/rec/bib/conf/icaart/Kamide15>
- ③⑭ Norihiro Kamide, Daiki Koizumi, Combining paraconsistency and probability in CTL, 査読有, Proceedings of the 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Vol. 2., pp. 285-293, 2015, Science and Technology Publications. <https://dblp.org/rec/bib/conf/icaart/KamideK15>
- ③⑮ Norihiro Kamide, An eight-valued paraconsistent logic, 査読有, Reports on Mathematical Logic 49, pp. 3-21, 2014, Jagiellonian University Press. DOI: 10.4467/20842589RM.14.001.2271
- ③⑯ Norihiro Kamide, Inconsistency-tolerant multi-agent calculus, 査読有, International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-Based Systems 22 (6), pp. 815-830, 2014, World Scientific Publishing. DOI: 10.1142/S0218488514500433

[学会発表] (計 12 件)

- ① Norihiro Kamide, Kazuki Endo, Logics and translations for inconsistency-tolerant model checking, The 10th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2018), Funchal, Madeira - Portugal, 16-18 January, 2018.
- ② Norihiro Kamide, Bi-classical connexive logic and its modal extension: Cut-elimination, completeness and duality, The 3rd Workshop on Connexive Logics, Kyoto, Japan, 京都大学(京都府・京都市), 2017.
- ③ Norihiro Kamide, Hitoshi Omori, An extended first-order Belnap-Dunn logic with classical negation, The 6th International Workshop on Logic, Rationality, and Interaction (LORI 2017), Hokkaido, Japan, 北海道大学(北海道・札幌市), 2017.
- ④ Norihiro Kamide, Paraconsistent model checking: Logics, translations and examples, 2017 International Conference on Software and e-Business (ICSEB 2017), Hong Kong, 2017.
- ⑤ Norihiro Kamide, Cut-free systems for restricted bi-intuitionistic logic and its connexive extension, The 46th IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL 2016), Sapporo, Japan, 2016.
- ⑥ Norihiro Kamide, Paraconsistent double negation that can simulate classical negation, The 46th IEEE International Symposium on Multiple-Valued Logic (ISMVL 2016), Sapporo, Japan, 2016.
- ⑦ Norihiro Kamide, Intuitionistic De Morgan verification and falsification logics, The 8th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2016), pp. 233-240, Rome, Italy, 2016.
- ⑧ Norihiro Kamide, Duality in some intuitionistic paraconsistent logics, The 8th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2016), Rome, Italy, 2016.

- ⑨ Norihiro Kamide, A decidable temporal relevant logic for time-dependent relevant human reasoning, The 5th International Workshop on Logic, Rationality, and Interaction (LORI 2015), Taiwan, 2015.
- ⑩ Norihiro Kamide, Single-succedent system approach to Boolean BI, Proceedings of the 19th International Conference on Knowledge Based and Intelligent Information and Engineering Systems (KES 2015), Singapore, 2015.
- ⑪ Norihiro Kamide, Inconsistency and sequentiality in LTL, The 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2015), Lisbon, Portugal, 2015.
- ⑫ Norihiro Kamide, Daiki Koizumi, Combining paraconsistency and probability in CTL, The 7th International Conference on Agents and Artificial Intelligence (ICAART 2015), Lisbon, Portugal, 2015.

〔図書〕 (計 1 件)

Norihiro Kamide, Heinrich Wansing, Proof theory of N4-related paraconsistent logics, Studies in Logic, Volume 54, College Publications, pp. 1-414, 2015. <https://www.amazon.co.jp/Theory-N4-Paraconsistent-Logics-Norihiro-Kamide/dp/1848901674>

〔その他〕

① 帝京大学工学部ホームページ (上出哲広)

URL: <https://www.e-campus.gr.jp/staffinfo/public/staff/detail/2409/155>

② researchmap ホームページ (上出哲広)

URL: <https://researchmap.jp/read0195280/>

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。