

## 矛盾許容階層確率 CTL モデル検査に対する論理と具体例

山本ノリコ<sup>†</sup> Khoo Nee Kwan<sup>††</sup> 楊奕偉<sup>††</sup> 石野寛人<sup>††</sup> 神戸勢大<sup>††</sup> 上出哲広<sup>††</sup><sup>†</sup> 帝京大学大学院理工学研究科情報科学専攻 <sup>††</sup> 帝京大学理工学部情報電子工学科

## 概要

矛盾許容階層確率 CTL モデル検査は、矛盾許容性、階層性および確率性を持つモデルを検証可能な、CTL モデル検査の拡張である。本研究では、矛盾許容階層確率 CTL モデル検査を実現するための論理を提案し、それをを用いた矛盾許容階層確率 CTL モデル検査の具体例を提示した。矛盾許容階層確率 CTL モデル検査を実現するための論理として、従来の確率計算木論理 pCTL を拡張した新たな論理 IHpCTL を導入した。そして、IHpCTL をを用いた矛盾許容階層確率 CTL モデル検査の具体例として臨床推論モデルの検証例を示した。本稿の内容は、著者らによる論文 [11, 13, 10] の内容を発展させたものである。また、論文 [13, 10] の内容を一部含んでいる。

## 1 論理

本研究では、矛盾許容階層確率 CTL モデル検査 (inconsistency-tolerant hierarchical probabilistic CTL model checking) に対する新しい時間論理 IHpCTL を導入し、それをを用いた具体例を提示した。矛盾許容階層確率 CTL モデル検査は、矛盾許容性、階層性および確率性を持つシステムを適切に検証するためのモデル検査パラダイムであり、確率 CTL モデル検査 (probabilistic CTL model checking) [1, 3, 2], 階層 CTL モデル検査 (hierarchical CTL model checking) [9] および矛盾許容 CTL モデル検査 (inconsistency-tolerant CTL model checking) [7, 4, 8, 12] の拡張である。モデル検査 (model checking) は、システムの数理的なモデルが期待する性質を持っている否かを判定する技術であり、主に並行システムを検証するために広く使用されている [6]。

矛盾許容階層確率 CTL モデル検査では、従来の確率 CTL モデル検査で使用されている論理である pCTL (probabilistic computation tree logic) [1, 3], 階層 CTL モデル検査で使用されている論理である sCTL (sequential computation tree logic) [9] およ

び矛盾許容 CTL モデル検査で使用されている論理である PCTL (paraconsistent computation tree logic) [8, 12] の拡張論理体系を使用する。pCTL, sCTL および PCTL はモデル検査で使用されている標準的な時間論理である CTL (computation tree logic) [5] の拡張である。本研究では、そのような拡張論理として、IHpCTL (inconsistency-tolerant hierarchical probabilistic computation tree logic) を導入した。IHpCTL では、pCTL で使用されている確率演算子に加えて階層構造を表現するための階層演算子 [b] と矛盾許容性を表現するための矛盾許容否定結合子  $\sim$  が加えられている。IHpCTL は、 $(\alpha \wedge \sim \alpha) \rightarrow \beta$  の形の公理を排除した論理である。これは IHpCTL が矛盾許容論理の一種であることを意味する。

本研究では、IHpCTL の論理式を pCTL の論理式に翻訳する関数を導入した。そして、この翻訳関数を用いることにより、IHpCTL に対する埋め込み定理を証明した。この埋め込み定理の帰結として、IHpCTL のモデル検査問題に対する相対決定可能性定理が導かれた。これらの定理は、IHpCTL によって記述された矛盾許容性、階層性および確率性を持つシステムを、pCTL に対する標準的なモデル検査アルゴリズムを用いて検証できるということを保障している。なお、IHpCTL、翻訳関数、埋め込み定理および相対決定可能性定理の詳細については論文 [13] を参照されたい。また、本稿に示されている矛盾許容 CTL モデル検査、階層 CTL モデル検査、確率 CTL モデル検査およびこれらの基盤となる論理に対する引用および参考文献は網羅的なものではない。そのため、これらの情報に関するサーベイとして [11, 13] などを参照されたい。

## 2 具体例

本研究では、IHpCTL と翻訳関数に基づいた、矛盾許容階層確率 CTL モデル検査の簡単な応用例として図 1 のような具体例を提示した。提示した具体例は、糖尿病に苦しむ患者が死に至るまでの過程を表現している。糖尿病は、境界型糖尿病、1 型糖尿病および 2 型糖尿病のように分類される。境界型糖尿病は 2 型糖尿病の前段階と考えられている。糖尿病の有病率は病気全体の約 8 パーセントであり、2 型糖尿病の有病率は糖尿病全体の約 90 パーセントであるとされている。糖尿病では高グルコース、頻尿および強い渇きといった

Logic and Example for Inconsistency-tolerant Hierarchical Probabilistic CTL Model Checking

<sup>†</sup> Noriko Yamamoto (noriko@while.jp)<sup>††</sup> Khoo Nee Kwan (nkkhoo555@gmail.com)<sup>††</sup> Yiwei Yang (183146u5@stu.teikyo-u.ac.jp)<sup>††</sup> Hiroto Ishino (183204vm@stu.teikyo-u.ac.jp)<sup>††</sup> Seidai Kanbe (1832143r@stu.teikyo-u.ac.jp)<sup>††</sup> Norihiro Kamide (drnkamide08@kpd.biglobe.ne.jp)

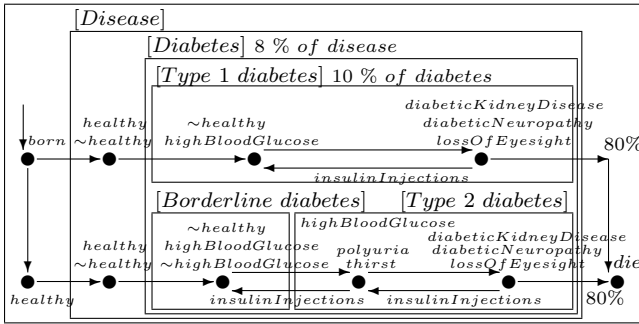


図 1: 糖尿病に対する臨床推論モデル

症状が現れる。また、病状が進行すると、糖尿病性腎症、糖尿病性神経障害および失明といった合併症を引き起こす。インスリン注射などにより血糖値をコントロールすることが糖尿病の基本的な治療となる。

以下のステートメントを矛盾許容階層確率 CTL モデル検査によって検証することができる。なお、このステートメントは当該モデルにおいて真である。

“If a person is in the second stage of type 2 diabetes and is not injected with insulin, then there is approximately 80 chance that this person will die in the near future.”

このステートメントは IHpCTL の論理式を用いて以下のように記述することができる。ここで、G と F は時間演算子、 $\sim$  は矛盾許容否定結合子、A と E はパス演算子、 $[Disease ; Diabetes ; Type 2 diabetes]$  は階層演算子、そして  $P_{\leq 0.85}$  と  $P_{\geq 0.75}$  は確率演算子である。

$$\begin{aligned}
 & [Disease ; Diabetes ; Type 2 diabetes] \\
 & (AG(\sim healthy \wedge highBloodGlucose \wedge polyuria \\
 & \wedge thirst \wedge diabeticKidneyDisease \\
 & \wedge diabeticNeuropathy \wedge lossOfEyesight \\
 & \rightarrow EF(P_{\leq 0.85} die \wedge P_{\geq 0.75} die)).
 \end{aligned}$$

この IHpCTL の論理式は、翻訳関数により、以下の pCTL の論理式に変換することができる。ここで  $q_i$  ( $i \in \{1, \dots, 8\}$ ) は各々異なる命題変数を表している。

$$\begin{aligned}
 & AG(q_1 \wedge q_2 \wedge q_3 \wedge q_4 \wedge q_5 \wedge q_6 \wedge q_7 \\
 & \rightarrow EF(P_{\leq 0.85} q_8 \wedge P_{\geq 0.75} q_8)).
 \end{aligned}$$

この論理式を用いることにより、上記の対応する IHpCTL の論理式を pCTL に対するモデル検査アルゴリズムを用いて間接的に検証することが可能になる。

謝辞 本研究は一般財団法人日本産業科学研究所研究助成金および JSPS 科研費 (JP18K11171, JP16KK0007) の援助を受けた。

参考文献

- [1] A. Aziz, V. Singhal, and F. Balarin, It usually works: The temporal logic of stochastic systems, Proceedings of the 7th International Conference on Computer Aided Verification, Lecture Notes in Computer Science 939, pp. 155-165, 1995.
- [2] C. Baier, L. de Alfaro, V. Forejt, M. Kwiatkowska, Model Checking Probabilistic Systems, In: Handbook of Model Checking, pp. 963-999, 2018.
- [3] A. Bianco and L. de Alfaro, Model checking of probabilistic and nondeterministic systems, Proceedings of the 15th Conference on Foundations of Software Technology and Theoretical Computer Science, Lecture Notes in Computer Science 1026, pp. 499-513, 1995.
- [4] D. Chen and J. Wu, Reasoning about inconsistent concurrent systems: A non-classical temporal logic, Proceedings of the 32nd Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science, Lecture Notes in Computer Science 3831, pp. 207-217, 2006.
- [5] E.M. Clarke and E.A. Emerson, Design and synthesis of synchronization skeletons using branching time temporal logic, Lecture Notes in Computer Science 131, pp. 52-71, 1981.
- [6] E.M. Clarke, T.A. Henzinger, H. Veith, and R. Bloem (editors), Handbook of Model Checking, Springer, 2018.
- [7] S. Easterbrook and M. Chechik, A framework for multi-valued reasoning over inconsistent viewpoints, Proceedings of the 23rd International Conference on Software Engineering, pp. 411-420, 2001.
- [8] N. Kamide, Inconsistency-tolerant temporal reasoning with hierarchical information, Information Sciences 320, pp. 140-155, 2015.
- [9] N. Kamide, Logical foundations of hierarchical model checking, Data Technologies and Applications 52 (4), pp. 539-563, 2018.
- [10] N. Kamide, Extended full computation tree logics: Combining inconsistency-tolerant, hierarchical, probabilistic, and temporal reasoning, Draft, 2020.
- [11] N. Kamide and J.P.A. Bernal, Towards locative inconsistency-tolerant hierarchical probabilistic CTL model checking: Survey and future work, Proceedings of the 11th International Conference on Agents and Artificial Intelligence, Vol. 2, pp. 869-878, 2019.
- [12] N. Kamide and K. Endo, Foundations of inconsistency-tolerant model checking: Logics, translations, and examples, Lecture Notes in Computer Science 11352, pp. 312-342, 2018.
- [13] N. Kamide and N. Yamamoto, Inconsistency-tolerant hierarchical probabilistic computation tree logic and its application to model checking, Proceedings of the 13rd International Conference on Agents and Artificial Intelligence, To appear, 2021.