

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 28 年 6 月 17 日現在

機関番号：62615

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2015

課題番号：26540122

研究課題名(和文) 論理プログラム表現に基づくセルオートマトン遷移規則学習

研究課題名(英文) Learning Cellular Automata Represented as Logic Programs

研究代表者

井上 克巳 (INOUE, KATSUMI)

国立情報学研究所・情報学プリンシプル研究系・教授

研究者番号：10252321

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,700,000円

研究成果の概要(和文)：時間的に変化する離散系を標準論理プログラムで記述し、その上での帰納推論方式を新たに考案し、状態遷移規則を学習するための方法論を提案する。基本方式として状態間の変位からブーリアンネットワークの状態遷移規則を自動的に学習するLFITを提案し、これをベースに様々な効率化や拡張方式を開発した。効率化にはBDDによる簡約化やトップダウン・アルゴリズムが、拡張には遅延効果・多値ドメイン・確率遷移を有するネットワークと非同期式更新が含まれる。LFITの応用では、遺伝子制御ネットワークやセルオートマトン学習、ロボットの行動規則学習、論理を自動的に学習する論理発見に適用した。

研究成果の概要(英文)：Learning from Interpretation Transition (LFIT) is a method of unsupervised learning, which learns the dynamics of a system from observed time-series data. LFIT has been developed in three ways: (1) Learning memory-less systems from 1-step state transitions, which contains three different implementations to learn the state transition rules, that is, (a) generalization based on the resolution principle, (b) extension of the binary decision diagram (BDD), and (c) least specialization that guarantees the minimality of learned rules; (2) Learning systems with memory (or delay), which can learn Markov(k) systems that depend on k previous states; and (3) Learning nondeterministic and probabilistic systems, which can work for noisy data. These three learning algorithms have been implemented and evaluated with bioinformatics data to construct gene regulatory networks. LFIT has also been applied to identification of cellular automata, learning robot planning rules, and learning logics.

研究分野：知能情報学

キーワード：機械学習 セルオートマトン ブーリアンネットワーク 状態遷移 行動規則学習 論理発見 遺伝子制御ネットワーク学習

## 1. 研究開始当初の背景

生命現象の変化や遺伝子制御、気象・経済・交通における予測、集団における情報伝達やその他の社会現象に関する解析、など近年の重要な問題では、系の複雑なダイナミクスを扱う必要がある。物理学やシステム科学では、このようなダイナミクスを扱うのはモデリングであり、方程式系を立て時間的変化をシミュレートしつつ、パラメータ値やモデルの修正を繰り返す。しかしながら、システム全体の複雑な現象を完全に捉えることは一般に不可能である。さらに、方程式系が与えられたとしても、パラメータの微小な変化が後に多大な影響を与え、効果が予測できなくなるカオス現象も起こる。

一方、各構成要素の値が近傍の値のみに依存して決定される系は、セルオートマトン(cellular automata)として知られている。セルオートマトンは最近重要性が高まっており、近年、自然科学・社会科学・人文科学において注目を集めている。極めて単純な規則・構造でも潜在的な複雑性を有していることが、複雑系・生物学・物理学・ネットワーク科学・人工知能などの本質的な難しさに関係している。セルオートマトンのモデリングは系が示す遷移系列を実現するような状態遷移規則の構築に相当しており、本研究ではこれをセルオートマトンの帰納推論と呼ぶ。前述のモデリングの問題点に対処するためには、現象の時系列的観測や系が満たすべき性質から、状態遷移規則やネットワーク構造を求める帰納推論が重要になると考えられるが、過去にはあまり研究されていない。

## 2. 研究の目的

ブリアンネットワークやセルオートマトンなど、時間的に変化する離散系を標準論理プログラムで記述し、その上での帰納推論方式を新たに考案し、状態遷移規則を学習するための画期的な補法論を提案する。学習アルゴリズムでは、状態変化列の時系列的入力から生成される膨大な数の遷移規則を効率よく簡約化するためにBDDを用いる。さらに入力として与える情報を拡張し、系にとって望ましい性質や最終目標状態等を与え、これらを実現するようなダイナミクスを有する遷移規則を学習可能とする。また開発したアルゴリズムを、遺伝子発現データの遷移からの遺伝子制御ネットワーク学習や、セルオートマトンの密度分類問題などに適用し、これらの問題に対する現実的解法を提供する。

## 3. 研究の方法

セルオートマトンの帰納推論方式の確立を目指して、(1) 系のダイナミックな振る舞いの観測列から背後に成立している状態遷移規則を求める LFIT アルゴリズムの整備、(2) 論理式のコンパクトな圧縮構造である BDD を用いた帰納推論の効率化、(3) 系が満たすべき目標が与えられた時にセルオートマトンを適切に設計する手法の開発、(4) 遺伝子制御を表すブリアンネットワーク構築問題他への応用、の4つの研究課題に取り組む。LFIT はセルオートマトンを標準論理プログラム (NLP) の形で学習するが、その理論的裏付けとなる両者の関係については研究代表者による先駆的研究に基づく。これらの課題を解決するためのアルゴリズムおよびデータ構造を設計し、プログラム開発を行い、得られた結果をまとめて論文等で公表する。

## 4. 研究成果

本研究では、ブリアンネットワークやセルオートマトンなど、時間的に変化する離散系を標準論理プログラムで記述し、その上での帰納推論方式を新たに考案し、状態遷移規則を学習するための画期的な方法論を提案する。これまでに (Inoue et al., 2014) において、状態間の変位から状態遷移規則を自動的に学習する LFIT (Learning from Interpretation Transition) を提案していたが、本研究ではこれをベースに様々な拡張方式を開発する。

平成26年度は、状態変化列の時系列的入力から生成される膨大な数の遷移規則を効率よく簡約化するために BDD を用いて効率化した LFIT アルゴリズムを開発した。また、遅延効果をもつ状態遷移規則の学習方式を設計し、遅延効果をもつブリアンネットワーク学習に応用した。従来の LFIT では、各コンポーネントの制御(活性化または抑制)が直ちに次の時刻で効果を表すこと(マルコフ性)を仮定していたが、拡張版では各制御はある時間経過後に効果が表れるという現実的な状況に対応し、記憶、すなわち直前だけでなく過去の状態遷移列、が遷移に影響するような  $k$ -次マルコフ性をもつ状態遷移を表現するように拡張した。さらに、非同期更新による状態遷移規則の学習に関する考察も行った。

また発展研究に向けて、LFIT による論理発見について検討した。近年の機械学習では、深層ニューラルネットワークを用いた大量データの解析からの概念形成や、センサーなどを通じて得た外界の情報からボトムアップ

に概念獲得を行う研究が行われている。一方、これらの学習で獲得された概念を使って問題解決を行う場合、概念間の関係や一般規則、及び規則を使って推論を行うための論理が必要になる。そこで、コンピュータが論理を自動的に学習する「論理発見(logic discovery)」に注目した。まず論理発見への足掛かりとして、命題集合  $S$  とその論理的帰結の集合  $T$  を入力として与えた場合に、 $S$  から  $T$  を演繹的に導く推論規則を機械的に構成する。この学習過程では、命題と帰結がメタ述語を使って表現され、学習結果である演繹推論規則は論理プログラミングのメタルールとして記述され、学習においてはLFITを用いることができる。

具体的目標として挙げていた4つの研究課題のうち、(1)系の状態の時系列変化を観測として状態遷移規則を標準論理プログラムの形式で学習する LFIT アルゴリズムに対する同期的・非同期更新の下での学習方式についての考察、および(2)論理関数のコンパクトな圧縮表現形式である二分決定グラフ(BDD)を用いた帰納推論の効率性追求に関しては研究が予定通りに進んだ。さらに、当初予定していなかった遅延付きの状態遷移規則の学習方式の実現とその遺伝子制御ネットワーク構築への応用や、論理発見への新たな発展など計画以上の進展もある。その反面、当初課題に挙げていたセルオートマトンの密度分類問題への適用については、予想以上に計算量が大きく計算が困難であることが判明している。

平成27年度は、マルコフ性を仮定しないような遅延効果をもつ状態遷移規則の学習方式を実装し、遅延効果をもつブーリアンネットワーク学習に応用した。また各状態に変数がとり得る値を2値(ブーリアン)から多値にした多値ネットワークや、非決定性や確率遷移をもつ状態遷移規則の学習についても考えた。さらに従来のLFITでは、各コンポーネントの制御が一斉に行われることを仮定していた(同期式更新)、非同期更新による状態遷移規則の学習に関する考察も行った。

LFITの応用としては、これまでの遺伝子制御ネットワークやセルオートマトン学習に加え、ロボットの行動規則学習にも適用した。また、コンピュータが論理を自動的に学習する「論理発見」として、命題集合  $S$  とその論理的帰結の集合  $T$  を入力として与えた場合に、 $S$  から  $T$  を演繹的に導く推論規則を機械的に構成する方式を実装した。さらにアブダクションや会話における含意のような非論理的な推論の規則を LFIT を使って学

習する方法を提案した。これらの推論規則の学習は、従来の機械学習や帰納推論の研究であまり着手されていなかった問題であり、今後の発展が期待される。

## 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 16 件)

(1) タイトル: Learning Relational Dynamics of Stochastic Domains for Planning.

著者名: David Martínez, Tony Ribeiro, Katsumi Inoue, Guillem Alenya, Carme Torras

会議録名: The 26th International Conference on Automated Planning and Scheduling, (ICAPS 2016; London, UK, June 12-17, 2016), to appear, AAAI, 2016.

査読の有無: 有

巻・号: pp.235-243 発行年: 2016

<http://www.aaai.org/ocs/index.php/ICAPS/ICAPS16/paper/view/13079>

(2) タイトル: Meta-Level Abduction.

著者名: Katsumi Inoue

雑誌名: IfCoLog Journal of Logic and its Applications

査読の有無: 有

巻・号: Vol.3, No.3 最初と最後の頁: 7-36

発行年: 2016

<http://www.collegepublications.co.uk/journals/ifcolog/?00005>

(3) タイトル: Abduction, Conversational Implicature and Misleading in Human Dialogues.

著者名: Chiaki Sakama, Katsumi Inoue

雑誌名: Logic Journal of the IGPL

査読の有無: 有

巻・号: 未定 最初と最後の頁: 印刷中

発行年: 2016

DOI: 10.1093/jigpal/jzu027

(4) タイトル: Inductive Logic Programming: Challenges.

著者名: Katsumi Inoue, Hayato Ohwada, Akihiro Yamamoto

会議録名: The 30th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-16; Phoenix, Arizona, USA, February 14, 2016),

査読の有無: 有

巻・号: pp.4330-4332, 発行年: 2016

<http://www.aaai.org/ocs/index.php/AAAI/AAAI16/paper/view/12339>

(5) タイトル : Learning Multi-Valued Biological Models with Delayed Influence from Time-Series Observations.

著者名 : Tony Ribeiro, Morgan Magnin, Katsumi Inoue, Chiaki Sakama

会議録名 : The 14th International Conference on Machine Learning and Applications (IEEE ICMLA 2015; Miami, Florida, USA, December 9-11, 2015)

査読の有無 : 有

巻・号 : pp.25-31, 発行年 : 2015

DOI : 10.1109/ICMLA.2015.19

(6) タイトル : Learning Probabilistic Action Models from Interpretation Transitions.

著者名 : David Martínez, Tony Ribeiro, Katsumi Inoue, Guillem Alenyà, Carme Torras

会議録名 In: Marina De Vos, Thomas Eiter, Yuliya Lierler, and Francesca Toni (eds.), Proceedings of the Technical Communications of the 31st International Conference on Logic Programming (ICLP 2015; Cork, Ireland, September 2, 2015), CEUR Workshop Proceedings, CEUR-WS.org, 2015.

査読の有無 : 有

巻・号 : Vol.1433, 発行年 : 2015

URL : [http://ceur-ws.org/Vol-1433/tc\\_30.pdf](http://ceur-ws.org/Vol-1433/tc_30.pdf)

(7) タイトル : Logic Programming for Cellular Automata.

著者名 : Marcus Völker, Katsumi Inoue

会議録名 : In: Marina De Vos, Thomas Eiter, Yuliya Lierler, and Francesca Toni (eds.), Proceedings of the Technical Communications of the 31st International Conference on Logic Programming (ICLP 2015; Cork, Ireland, September 2, 2015), CEUR Workshop Proceedings, CEUR-WS.org, 2015.

査読の有無 : 有

巻・号 : Vol.1433, 発行年 : 2015

URL : [http://ceur-ws.org/Vol-1433/tc\\_33.pdf](http://ceur-ws.org/Vol-1433/tc_33.pdf)

(8) タイトル : Learning Deduction Rules by Induction.

著者名 : Chiaki Sakama, Tony Ribeiro, Katsumi Inoue.

In: Katsumi Inoue, Hayato Ohwada, and Akihiro Yamamoto (eds.)

会議録名 : Inductive Logic Programming: Revised and

Selected Papers from the 25th International Conference (ILP 2015; Kyoto, Japan, August 20-22, 2015), Lecture Notes in Artificial Intelligence, to appear, Springer, 2016.

査読の有無 : 有

巻・号 : Vol.9575 発行年 : 2016

DOI : 付与予定

(9) タイトル : Can Machine Learn Logics?

著者名 : Chiaki Sakama, Katsumi Inoue

会議録名 : In: Jordi Bieger, Ben Goertzel, and Alexey Potapov (eds.), Artificial General Intelligence: Proceedings of the 8th International Conference (AGI 2015; Berlin, Germany, July 24, 2015), Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer.

査読の有無 : 有

巻・号 : Vol.9205, pp.341-351

発行年 : 2015

DOI : 10.1007/978-3-319-21365-1\_35

(10) タイトル : Abduction and Conversational Implicature (Extended Abstract).

著者名 : Chiaki Sakama, Katsumi Inoue

会議録名 : The 12th International Symposium on Logical Formalizations of Commonsense Reasoning (COMMONSENSE 2015; Stanford University, Stanford, CA, USA, March 23-25, 2015)

査読の有無 : 有

最初と最後の頁 : 130-133

発行年 : 2015

DOI : 10.1007/978-3-662-44923-3\_4

(11) タイトル : Identification of Biological Regulatory Networks from Process Hitting Models.

著者名 : Maxime Folschette, Loïc Paulevé, Katsumi Inoue, Morgan Magnin, Olivier Roux

雑誌名 : Theoretical Computer Science

査読の有無 : 有

巻・号 : Vol.568 最初と最後の頁 : 49-71

発行年 : 2015

DOI : 10.1016/j.tcs.2014.12.002

(12) タイトル : Learning Delayed Influences of Biological Systems.

著者名 : Tony Ribeiro, Morgan Magnin, Katsumi Inoue, Chiaki Sakama

雑誌名:Frontiers in Bioengineering and Biotechnology

査読の有無:有

巻・号:Vol.2 最初と最後の頁:-

発行年:2015

DOI:10.3389/fbioe.2014.00081

(13) タイトル:人工知能による科学的発見

著者名:井上 克巳

雑誌名:電子情報通信学会誌

査読の有無:無(依頼解説論文)

巻・号:Vol.98 No.1 最初と最後の頁:35-39

発行年:2015

DOI:http://ci.nii.ac.jp/naid/110009900418/

(14) タイトル:Learning Prime Implicant Conditions from Interpretation Transition.

著者名:Tony Ribeiro, Katsumi Inoue

会議録名:In: Jesse Davis and Jan Ramon (eds.), Inductive Logic Programming: Revised Selected Papers from the 24th International Conference (ILP 2014; Nancy, France, September 14, 2014), Lecture Notes in Artificial Intelligence, Springer, 2015.

査読の有無:有

巻・号:Vol.9046, pp.108-125,

発行年:2015

DOI:10.1109/ICMLA.2015.19

(15) タイトル:Learning from Interpretation Transition.

著者名:Katsumi Inoue, Tony Ribeiro, Chiaki Sakama

雑誌名:Machine Learning

査読の有無:有

巻・号:Vol.94 No.1 最初と最後の頁:51-79

発行年:2014

DOI:10.1007/s10994-013-5353-8

(16) タイトル:A BDD-Based Algorithm for Learning from Interpretation Transition.

著者名:Tony Ribeiro, Katsumi Inoue, Chiaki Sakama

会議録名:In: Gerson Zaverucha and Vítor Santos Costa (eds.), Inductive Logic Programming: Revised Selected Papers from the 23rd International Conference (ILP 2013:Rio de Janeiro, Brazil), Lecture Notes in Artificial Intelligence

査読の有無:有

巻・号:8812 最初と最後の頁:47-63

発行年:2014

[学会発表](計 8件)

(1) タイトル:LFIT: 解釈遷移からの学習

発表者:井上 克巳

学会名等:人工知能学会 第100回人工知能基本問題研究会 (SIG-FPAI)

査読の有無:有

発表年月日:2016年3月27日

講演概要:人工知能学会研究会資料 SIG-FPAI-B503, pp.17-18, 2015. [招待講演]

発表場所:熊本市市民会館,熊本市

(2) タイトル:Panel: ILP 25 Years

発表者:Stephen Muggleton, Fabrizio Riguzzi, Filip Zelezny, Gerson Zaverucha, Jesse Davis, Katsumi Inoue, and Taisuke Sato

学会名等:The 25<sup>th</sup> International Conference on Inductive Logic Programming

発表年月日:August 22, 2015.

発表場所:Kyoto university, Kyoto

(3) タイトル:Learning Multi-Valued Biological Models with Delayed Influence from Time-Series Observations.

発表者:Tony Ribeiro, Morgan Magnin, Katsumi Inoue, Chiaki Sakama

学会名等:The 25th International Conference on Inductive Logic Programming (ILP 2015)

査読の有無:有

発表年月日:August 20, 2015

発表場所:Kyoto university, Kyoto

(4) タイトル:Completing Signaling Networks by Abductive Reasoning with Perturbation Experiments.

発表者:Adrien Rougny, Yoshitaka Yamamoto, Hidetomo Nabeshima, Gauvain Bourgne, Anne Poupon, Katsumi Inoue, Christine Froidevaux

学会名等:The 25th International Conference on Inductive Logic Programming (ILP 2015)

査読の有無:有

発表年月日:August 20, 2015

発表場所:Kyoto university, Kyoto

(5) タイトル:Can Machine Learn Logics?

発表者:Chiaki Sakama, Katsumi Inoue

学会名等:The UNILOG 2015 Workshop on Emergent Computational Logics

査読の有無：有

発表年月日：June 28, 2015

発表場所：Istanbul, Turkey

(6) タイトル：Abduction, Conversational Implicature, and Misleading.

発表者：Chiaki Sakama, Katsumi Inoue

学会名等：The International Conference on Model-Based Reasoning in Science and Technology (MBR '15)

査読の有無：有

発表年月日：June 25, 2015

発表場所：Sestri Levante, Italy

(7) タイトル：Learning Prime Implicant Conditions from Interpretation Transition

発表者：Tony Ribeiro, Katsumi Inoue

学会等名：The 24th International Conference on Inductive Logic Programming (ILP 2014)

査読の有無：有

発表年月日：2014年9月14日

発表場所：Nancy, France

(8) タイトル：Learning Delayed Influence of Dynamical Systems from Interpretation Transition.

発表者：Tony Ribeiro, Morgan Magnin, Katsumi Inoue

学会等名：The 24th International Conference on Inductive Logic Programming (ILP 2014)

査読の有無：有

発表年月日：2014年9月14日

発表場所：Nancy, France

〔図書〕(計 4件)

(1) 書名：Inductive Logic Programming: Revised and Selected Papers from the 25th International Conference (ILP 2015; Kyoto, Japan, August 20-22, 2015), Lecture Notes in Artificial Intelligence  
著者：Katsumi Inoue, Hayato Ohwada, Akihiro Yamamoto (eds.) 出版社：Springer 発行年：2016年

(2) 書名：Logical Modeling of Biological Systems  
著者：Luis Fariñas del Cerro, Katsumi Inoue (editors) 出版社：Wiley 発行年：2014年 総頁数：422 pages

(3) 書名：ASP for Construction and Validation of Regulatory Biological Networks, in: Luis Fariñas

del Cerro, Katsumi Inoue (editors), Logical Modeling of Biological Systems, Chapter 5

著者：Alexandre Rocca, Nicolas Mobilia, Éric Fanchon, Tony Ribeiro, Laurent Trilling, Katsumi Inoue 出版社：Wiley 発行年：2014 総頁数：167-206

(4) 書名：Simulation Based Reasoning about Biological Pathways Using Petri Nets and ASP, in: Luis Fariñas del Cerro, Katsumi Inoue (editors), Logical Modeling of Biological Systems, Chapter 6  
著者：Saadat Anwar, Chitta Baral, Katsumi Inoue 出版社：Wiley 発行年：2014 総頁数：207-243

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

国立情報学研究所 情報学プリンシプル研究系・教授

井上 克巳 (INOUE KATSUMI)

研究者番号：10252321

### (2) 研究分担者

和歌山大学 システム工学部・教授

坂間 千秋 (SAKAMA CHIAKI)

研究者番号：20273873