

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：13904

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2014

課題番号：23300057

研究課題名(和文) 免疫型複雑系とセンサエージェントの基礎的研究

研究課題名(英文) Immunity-Based Complex Systems and Sensor Agents

研究代表者

石田 好輝 (Ishida, Yoshiteru)

豊橋技術科学大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80159748

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,700,000円

研究成果の概要(和文)：情報通信技術(ICT)は、ユビキタスネットワークから、さらにモノのインターネット(IoT)に時代に入った。そのようななか、成果は「免疫型複雑系」と「センサエージェント」に大別できる。「免疫型複雑系」は認識に焦点を当てた自己認識モデルと、修復に焦点をあてた自己修復ネットワークがある。またこれらはマクロモデルであるが、ミクロモデルであるマッチングオートマトンも提案した。「センサエージェント」は免疫型複雑系を頑健でレジリエントなシステムとして実現するための設計の基盤である。さらに、修復・再構成に焦点をあてたアクチュエータエージェントへの応用も視野にいたした。

研究成果の概要(英文)：We have engaged in the era of the “Internet of Things” (IoT) from the era of the ubiquitous network where everyone can access to computations. With this background, our results can be divided into two: theory of immunity-based complex systems and their applications to the IoT with sensor agents.

In the theory of immunity-based complex systems, we have developed two macro models: self-recognition models where “the self” as in the immune system is focused; and self-repair networks where cleaning of abnormal nodes by mutual copying is addressed. Further, as a micro model, incorporating an aspect of the “key and keyhole” matching, matching automaton is studied. To design degenerated systems with resilience similar to biological systems, a matching automaton is considered based on the matching problems. Not only sensor agents but also actuator agents are deployed in applications for both of the self-repair networks and the matching automata.

研究分野：人工知能

キーワード：知能情報処理 複雑系科学 免疫科学 エージェント センサ アクチュエータ IoT resilience

1. 研究開始当初の背景

(1) 国内・国外の研究動向及び位置づけ
コンピュータや携帯だけがネットワークのノードであった社会から、様々なセンサやアクチュエータさらにはロボットがノードとしてはいつてくるユビキタス社会が始まりつつある(下図)。多様なノードを含むユビキタスネットワークでは、それが暴走または不正使用、悪用されたときの被害は計り知れない。そこで安全、安心なシステムの構築のためには従来の情報セキュリティ技術・理論のみならず、ノードにおける自律的フェイルセーフ機能、様々な環境で異質なノードが使われるため環境適応機能、ネットワーク全体への影響を最小限に止めるためのシステムワイドな管理・修復機能が必要となる。これら3つの機能をより一般的に「適応的」自律分散機能と呼ぶことにする。これらは我々が取り組んできた免疫的情報システムの中核となるものである。さらに自律・能動的なエージェント技術により多様なノードで統一的に「適応的」自律分散機能実現を目指す。

(2) 着想に至った経緯

研究代表者は、免疫系の「自己・非自己」の導入、その結果としての「両刃の剣」としての特性(非自己に対応する有害要素を除去する際、同時に自己に対応する有益要素にも影響を与えてしまう)と、その情報システムへの応用に焦点を当てて研究してきた[2]。現在インターネットなどの情報ネットワークは拡大をつづけており、その統制には適応的自律分散機能が不可欠になる。その場合、ネットワークへの様々な操作は同様に「両刃の剣」となりうる。本研究では、様々なノードが入ってくるユビキタスネットワークに対して、センサおよびアクチュエータをもったエージェントにより自己修復やより一般的な自己適応を行う問題を取り上げ、いかなる場合に情報システムを自己修復、自己適応をなしうるかを以下のテーマごとに明らかにする。

2. 研究の目的

免疫系の多様化戦略や適応能力に学び、それを自律分散ネットワークとして実現することを目指す。より具体的には、ユビキタスネットワーク内では、ウイルスなどの伝染性の(悪意による)ネットワーク異常や、故障や誤操作によるネットワーク異常が頻繁に起きる。この異常の検出と自己修復機能をネットワーク内に自律分散的に実現するための理論と技術を研究し開発することが目的である。

3. 研究の方法

ノード間の相互修復により全ノードを適応させ得るかという問題では、修復元ノード自体が感染している場合は、逆に汚染を広げてしまう可能性をもつ「両刃の剣」となる。こ

の問題の臨界点(汚染を除去するのに必要なパラメータの臨界値)を考察する。また修復を自律的に統御し、ネットワーク環境に適応する修復戦略が創発する枠組みを提案する。本研究では、「適応的」自律分散ネットワーク実現問題を、下記3テーマに分けて研究を進める。

【テーマ1】相互修復によるネットワークモデル(臨界点の解明)

エージェントによる修復を制御パラメータで、汚染が広がってしまうか除去できるかを切り分ける臨界点を、パーコレーション理論で求まっている様々な臨界点との関連に注意しながら求めていく。

【テーマ2】適応的相互修復戦略の枠組み戦略的に修復する方式について、ゲーム論的アプローチや空間的囚人のジレンマによる先行研究に注意しながら考察する。

【テーマ3】ネットワーク拡張の影響

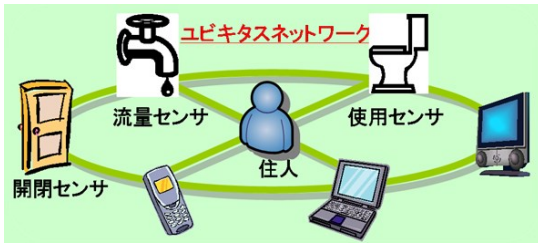
スケールフリーネットやスモールワールドネットなどの複雑系ネットワークで議論されている情報の伝播についての結果に注意しながら、ネットワークトポロジーが臨界点や修復戦略に与える影響を考察する。

特に【テーマ3】ではシステムを、モジュール化された多くの要素のマッチングにより作動させていくアーキテクチャをとることにより、回復能力をもったシステムが構築できることが判明し、自己修復と自律回復能力に重点をおいたリジリエントサーバを構築するに至った。これは災害時に、物理的破壊や浸水などで異常となった部分を切り離し最小限の通信機能などを自己回復できるシステムや、人の手で回復する事が困難な人工衛星群の基盤情報システムに使えるものと考えられる。

4. 研究成果

「免疫型複雑系」は認識に焦点を当てた自己認識モデル[2]と、異常の除去修復に焦点をあてた自己修復ネットワーク[1]がある。またこれらはマクロな定常状態を問題としたマクロモデルであるが、自己・非自己の相補的マッチングに焦点をおいたマイクロモデルであるマッチングオートマトンも提案した。前回の「免疫型複雑系とそのセンサエージェントによる診断・修復への応用平成16年～平成18年、基盤B)」では主にマクロモデルのみを研究したが、当研究課題ではこれに加えてマイクロモデルであるマッチングオートマトンも扱った。エージェントも認識・修復に焦点をあてたセンサエージェントにだけでなく、修復・再構成に焦点をあてたアクチュエータエージェントへの応用も視野にいた。

情報通信技術(ICT)は、どこでも計算にアクセスできるユビキタスネットワークから、さらにあらゆるものがインターネットにつながるモノのインターネット(IoT)に時代に入った(次図)。



そのような背景のなかで、本課題の研究成
果は大きく、「免疫型複雑系の基礎理論」と
「センサエージェントの応用」に大別できる
(詳細は[3])。

(1) 免疫型複雑系の基礎理論

免疫型複雑系を生命的閉包性から考察した
より基礎的なモデル論である生命的閉包性
の理論と当研究が生命・生物系を考察する際
とってきた基本的アプローチとし一貫して
とってきた生命現象への非対称アプローチ
にわけられる。本研究課題に免疫型複雑系と
基礎的研究の2つのキーワードがはいって
いる所以である。

さらに免疫型複雑系は単なる階層システム
としては見なせず、まさに「複雑」系であり、
その本質を直感的に理解するにも、また解析
するにも適切なダイアグラムが必要となり、
様々なダイアグラムの開発も本研究課題の
大きな課題となったことから、免疫型複雑系
モデルへの構造的アプローチと視覚化を重
要な成果として追加した。

(2) センサエージェントの応用：レジリエン トなシステム

上記(1)とは対照的にセンサエージェントへ
の応用に関する成果をまとめた。まず免疫型
複雑系を頑健でレジリエントなシステム構
築のためのシステム科学の観点から考究し
た成果はレジリエントシステムのアーキテ
クチャの基盤となっている。次にレジリエ
ントなシステムの基礎技術となるセンサ技
術を日本の“State-of-the-Art”からレビュー
した成果は、レジリエントシステムの展開の
動機となっている。

<引用文献>

- [1] Y. Ishida, Self-Repair Networks, Springer, to appear.
- [2] Y. Ishida, Immunity-Based Systems, Springer, Berlin & Heidelberg (2004)
- [3] 研究成果報告書：「免疫型複雑系とセンサエージェントの基礎的研究」, 2015.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文 (国際ジャーナル)] (計 42 件)

1. N. Mulyono, Y. Ishida (2015) Spatial strategy of disaster relief inventory, International journal of innovative computing, information & control: IJICIC 04/2015; 11(2) Volume 11, Number 2, 391-406 April 2015
2. Y. Hata, Y. Ishida (2014) Stable Marriage Problem Mapped to Lotka-Volterra Model: Stable Equilibria Mapped from Stable Matchings *Procedia Computer Science*, Volume 35, 2014, Pages 1398-1406, DOI: 10.1016/j.procs.2014.08.189
3. N. Mulyono, Y. Ishida (2014) Clustering inventory locations to improve the performance of disaster relief operations *Procedia Computer Science*, Volume 35, 2014, Pages 1388-1397, DOI: 10.1016/j.procs.2014.08.183
4. Y. Ishida, T. Sato (2014) Asymmetry in diagrams of stable marriage problems: Stable manifolds mapped from stable matchings, *Procedia Computer Science*, Volume 35, 2014, Pages 1379-1387 DOI: 10.1016/j.procs.2014.08.182
5. Y. Ishida, Y. Yamanaka (2014) A note on mapping a matching problem to a majority network as a Lyapunov function: Problem solving by synchronization, *Procedia Computer Science*, Volume 35, 2014, p. 1370-1378, DOI: 10.1016/j.procs.2014.08.181
6. K. Harada, Y. Ishida (2014) Introduction to the Special Issue on “State-of-the-Art Sensor Technology in Japan 2012” *Sensors* 14: 6. 11045-11048.
7. Y. Ishida (2014) Special Issue on Immunity-Based Systems: Systems Sciences for Robust and Resilient Engineering, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control* 10: 1. 315-316.
8. M. Tokumitsu, Y. Ishida (2014) A Space Weather Forecasting System with Multiple Satellites Based on a Self-Recognizing Network *Sensors* 14: 5. 7974-7991 May.
9. N. Mulyono, Y. Ishida (2014) Humanitarian Logistics and Inventory Model Based on Probabilistic Cellular Automata *International Journal of Innovative Computing, Information and Control* 10: 1. 357-372.
10. Y. Ishida and Kei-Ichi Tanabe (2014) Dynamics of Self-Repairing Networks: Transient State Analysis on Several Repair Types, *International Journal of Innovative Computing, Information and Control*, Vol. 10 No. 1, 389-403.
11. M. Tokumitsu and Y. Ishida (2014) Adaptive Strategies: A Novel Game-Theoretic Analysis for Autonomous Distributed Systems in

- Dynamic Environments, International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 10 No. 1, 373-387.
12. K. Harada and Y. Ishida (2014) Complex Spatial-Temporal Patterns Developed from Interaction of Function and Data,' ' International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 10 No. 1, 405-416 February.
 13. N. and Y. Ishida (2014) Humanitarian Logistics and Inventory Model Based on Probabilistic Cellular Automata,' ' International Journal of Innovative Computing, Information and Control, Vol. 10 No. 1, 357-372 February.
 14. N. Mulyono, Y. Ishida (2013) Development of Manufacturing Support System for SME under Disruption Risk, *Procedia Computer Science* 22: 753-761, doi:10.1016/j.procs.2013.09.157
 15. Y. Ishida a, Takumi Sato (2013) Characterization of Dynamics of Stable Matchings: Attractors Mapped from Stable Matchings, *Procedia Computer Science* 22: 672-679, doi:10.1016/j.procs.2013.09.148
 16. M. Tokumitsu, Y. Ishida (2011) An Adaptive Control Technique for a Connection Weight of Agents in a Self-Repairing Network, , Lecture Notes in Computer Science, LNCS6557, 44-55
 17. M. Tokumitsu, Y. Ishida (2011) Spatial Distribution of Connection Weight in Self-Repairing Network, *Lecture Notes in Computer Science, LNCS 6884*, 322-331
 18. Y. Ishida (2011) A Note on the Collective Identity of Indistinguishable Entities: A View from the Stable Marriage Problem, *Lecture Notes in Computer Science, LNCS 6884*, 352-361
 19. Y. Ishida and K. Sasaki (2011) Asymmetric Structure between Two Sets of Adaptive Agents: An Approach Using a Matching Automaton, *Lecture Notes in Computer Science, LNCS 6884*, 362-371, 2011
 20. K. Harada, Y. Ishida (2011) A Note on Dynamical Behaviors of a Spatial Game Operated on Intercrossed Rule, *Lecture Notes in Computer Science, LNCS6884*, 345-354, 2011
 21. T. Ueda and Y. Ishida (2011) Identifying Generative Mechanisms from Spatiotemporal Patterns in Diffusion Phenomena, *Lecture Notes in Computer Science, LNCS 6884*, 342-351, 2011
 22. Y. Katsumata, Y. Ishida a (2011) Robustness of Membrane Formation in a Spatial Prisoner's Dilemma with a Spatial Generosity, *Lecture Notes in Computer Science, LNCS 6884*, 332-341, 2011
 23. K. Harada, Y. Ishida (2011) Toward Elucidation of Longevity of Immunological Memory, *Lecture Notes in Computer Science, LNCS 6884*, 321-330, 2011
 24. Y. Tsuzuki, Y. Ishida (2011) A dynamic Houjin (square) and a symmetric Houjin *Artificial Life and Robotics* 16: 4. 571-574
 25. K. Hrada, Y. Ishida (2011) Emergence of observable rules in a spatial game system, *Artificial Life and Robotics* 16: 4. 559-562
 26. H. Shida, Takeshi Okamoto, Y. Ishida (2011) Immunity-Based Diagnosis for a Motherboard, *Sensors* 11: 4. 4462-4473
 27. T. Hayashi, Y. Hata, Y. Ishida (2011) A diagrammatic classification in a combinatorial problem: the case of a Stable Marriage Problem, *Artificial Life and Robotics* 16: 4. 575-579
 28. M. Tokumitsu, Y. Ishida (2011) A systemic payoff in a self-repairing network , *Artificial Life and Robotics* 16: 4. 563-566
 29. Y. Katsumata, Y. Ishida (2011) Effects of a membrane formation in the spatial prisoner's dilemma, *Artificial Life and Robotics* 16: 4. 567-570
 30. Y. Morizumi, T. Hayashi, Y. Ishida (2011) A network visualization of stable matching in the stable marriage problem, *Artificial Life and Robotics* 16: 1. 40-43
 31. M. Tokumitsu, M. Murakami, Y. Ishida (2011) An adaptive sensor network for home intrusion detection by human activity profiling, *Artificial Life and Robotics* 16: 1. 36-39
 32. K. Kitamura, Y. Nakamura, M. Tokumitsu, Y. Ishida, S. Watari (2011) Prediction of electron flux environment at geosynchronous orbit using neural network technique, *J. of Artificial Life and Robotics*, Vol. 16, 3, p. 389-392
 33. M. Tokumitsu, Y. Ishida, S. Watari, K. Kitamura (2011) Prediction of space weather by adaptive information processing, *J. of Artificial Life and*

- Robotics 16-1, 32-35, 2011
34. Y. Morizumi, T. Hayashi, Y. Ishida (2011) A network visualization of stable matching in the stable marriage problem, J. of Artificial Life and Robotics 16-1, 40-43 2011
 35. M. Tokumitsu, M. Murakami, Y. Ishida (2011) An adaptive sensor network for home intrusion detection by human activity profiling, J. of Artificial Life and Robotics 16-1, 36-39, 2011
 36. T. Okamoto and Y. Ishida (2010) Towards Immunity-Based Anomaly Detection System for Network Traffic, KES Journal, 15, 1-11, 2010
 37. H. Shida, T. Okamoto, Y. Ishida (2010) Evaluations of Immunity-Based Diagnosis for a Motherboard In: Lecture Notes in Computer Science 6278 628-636
 38. K. Harada, Y. Ishida (2010) A Note on Dynamical Behaviors of a Spatial Game Operated on Intercrossed Rules In: Lecture Notes in Computer Science 6278
 39. Y. Ishida a, Kei-Ichi Tanabe (2010) Asymmetry in Repairing and Infection: A Case of the Self-Repair Network In: Lecture Notes in Computer Science 6278 645-651
 40. Y. Ishida (2010) A Note on Symmetry in Logic of Self-Repair: A Case of a Self-Repair Network In: Lecture Notes in Computer Science 6278 652-659 Springer.
 41. Y. Ishida (2009) A Note on Biological Closure and Openness: A System Reliability View In: Lecture Notes in Computer Science 5712 805-812 Springer.
 42. Y. Ishida, T. Hayashi (2009) Asymmetric Phenomena of Segregation and Integration in Biological Systems: A Matching Automaton In: Lecture Notes in Computer Science 5712 789-796 Springer.

[学会発表 (国際会議)] (計 29 件)

1. Y. Hata, Y. Ishida, Rewiring system for resilient design in heterogeneous environment using stable matching, DATE workshop: Electronic System-Level Design towards Heterogeneous Computing, March 28, 2014.
2. Y. Hata, M. Tokumitsu, Y. Ishida, Resilient Networks with Autonomous Networked Tiny Satellites, Proc. of IGNITE 2013, Penang, Malaysia, Dec. 5, 2013
3. M. Tokumitsu, Y. Ishida, Diagram Visualization of Self-Recognizing Sensor Networks, SISA 2013.
4. Y. Fukumoto, Y. Ishida, Exploring SANGAKU of Spheres by Augmented Reality, SISA 2013
5. Y. Ishida, Self-Repairing Network as a Generalized Epidemic Model involving Vaccination, Joint Conference on Emerging and Re-emerging Epidemics Affecting Global Health 2012 in Orvieto, Italy. <http://globalhealth2012.weebly.com/index.html>
6. Y. Katsumata, Y. Ishida, An analysis of spatial patterns in a spatial prisoner's dilemma, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2012 in CD-ROM
7. T. Ueda, Y. Ishida, Identifying cellular automata rules using local rule network from spatiotemporal patterns, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2012 in CD-ROM
8. M. Tokumitsu, Y. Ishida, Performance evaluations of adaptive strategies in self-repairing network, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2012 in CD-ROM
9. K. Matsuka, Y. Ishida, Solar Insolation simulation by cellular automata and applications to smart home, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2012 in CD-ROM
10. K. Harada, Y. Ishida, Toward development of a strategy to drive HIV-1 into self-extinction through the error catastrophe, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2012 in CD-ROM
11. K. Harada, Y. Ishida, A pattern formation mechanism of a cellular automaton evolving on a mutual determination rule of variables and a dynamics, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2012 in CD-ROM
12. Y. Ishida, Kei-Ichi Tanabe, Network rewiring in self-repairing network: from node repair to link rewire, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2012 in CD-ROM
13. N. Mulyono, Y. Ishida, Continuous review model of mutual support supply system for disaster responses, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2012 in CD-ROM
14. Y. Ishida, Masahiro Tokumitsu,

- Network rewiring by matching automaton: from unit reliability to collective survivability, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2012 in CD-ROM
15. Y. Ishida, Takumi Satou (2011) Mapping problems to dynamical systems for robustness and adaptability: the case of matching problems In: MEDES '11 Proceedings of the International Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems 243-249 ACM
 16. Y. Ishida (2011) Immunity-based systems revisited: toward systems science for robust and adaptive engineering In: MEDES '11 Proceedings of the International Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems 264-271 ACM
 17. Yoshikazu Hata, Y. Ishida (2011) A dynamical model of stable marriage problem based on Lotka Volterra model. In: MEDES '11 Proceedings of the International Conference on Management of Emergent Digital EcoSystems 272-278 ACM
 18. Hatma Suryotrisongko, Y. Ishida (2011) Emergence of cooperation as the impact of evacuee's solidarity In: IEEE International Symposium on Safety, Security, and Rescue Robotics (SSRR) 2011 IEEE
 19. M. Tokumitsu, Y. Ishida, A systemic payoff in a self-repairing network, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2011 in CD-ROM
 20. Y. Katsumata, Y. Ishida, Effects of a membrane formation in Spatial Prisoner's Dilemma, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2011 in CD-ROM
 21. T. Ueda, Y. Ishida, Extracting probabilistic cellular automata rules from spatio-temporal patterns and analyzing features of these rules, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2011 in CD-ROM
 22. K. Harada, Y. Ishida, Emergence of observable rules in a spatial game system, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2011 in CD-ROM
 23. Y. Tsuzuki, Y. Ishida, A dynamic Houjin (square) and a symmetric Houjin, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2011 in CD-ROM
 24. H. Shida, T. Okamoto, and Y. Ishida, Improvement of immunity-based diagnosis for a motherboard, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2011 in CD-ROM
 25. T. Samura, K. Tani, Y. Ishida, Visualization of keystroke data and its interpretation, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2011 in CD-ROM
 26. S. Kamisato, Y. Mori, N. Yamashiro, K. Noguchi, Y. Ishida, Extraction of learning point by visualization of skill, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2011 in CD-ROM
 27. K. Kitamura, Y. Nakamura, M. Tokumitsu, Y. Ishida, S. Watari, Prediction of electron flux environment at geosynchronous orbit using neural network technique, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2011 in CD-ROM
 28. T. Hayashi, Y. Hata, and Y. Ishida, A diagrammatic classification in a combinatorial problem: The case of a Stable Marriage Problem, Proc. of Int. Conf. on Artificial Life and Robotics 2011 in CD-ROM
 29. T. Ueda and Y. Ishida, Rule Identification of Multiple Rule Cellular Automata, Proc. of the Fifth International Workshop on Self-Organizing Systems 2011 in CD-ROM
- [図書] (計 1 件 予定)
- [1] Y. Ishida, Self-Repair Networks, Springer, to appear.
6. 研究組織
- (1) 研究代表者
石田 好輝 (Ishida, Yoshiteru)
豊橋技術科学大学・工学研究科・教授
研究者番号：80159748
- (2) 研究分担者
なし
- (3) 連携研究者
原田 耕治 (Harada, Koji)
豊橋技術科学大学・工学研究科・助教
研究者番号：40390504
岡本 剛 (Okamoto, Takeshi)
神奈川工科大学・情報学部・准教授
研究者番号：90350678
渡邊 裕司 (Watanabe, Yuji)
名古屋市立大学・自然科学研究科・准教授
研究者番号：60314100