

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 14 日現在

機関番号：62615

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2017

課題番号：26280092

研究課題名(和文)レジリエントなシステムのモデル化と推論に関する研究

研究課題名(英文)Modeling and Inference of Resilient Systems

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) 10,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、外乱に対して耐性があり機能が持続的であるようなレジリエントなシステムを定式化し、そのうえでの推論問題を考えシステム設計に役立てることを目指した。この結果、(A)レジリエンスを議論するための制約モデルとして提案していたSRモデルを拡張・改良しレジリエンス性能の指標を与えた；(B)ダイナミックな制約系においてレジリエントな解を求める問題を多目的制約最適化として解き、パレート解の中から代表的解を求める近似解法を開発した；(C)応用として、ロバストなチーム編成とレスキュー問題への応用、生体系におけるレジリエンス性のモデル検査、エージェントネットワークにおける合意形成のロバスト性に適用した。

研究成果の概要(英文)：In this project, we formalize resilient systems that are tolerant to perturbations and are sustainable for maintaining their functionality, and consider several inference problems on this formalization, which can be used for designing resilient systems. Contributions are summarized as the three points: (A) The model for resilient systems, called SR model, has been extended and several parameterized properties have been improved to capture the resilience of systems. (B) By formalizing the resilience problem in dynamic systems as multi-objective constraint optimization problems, both exact algorithms to get the resilient solutions and approximate algorithms to compute only some representative Pareto solutions have been developed. (C) The notion of resilience has been applied to many applications, including team formation, robot rescue, biological oscillatory systems, belief revision of agents in social networks, then several computational properties have been analyzed for those systems.

研究分野：人工知能(推論, 制約プログラミング, マルチエージェントシステム)

キーワード：推論 レジリエンス 制約最適化 多目的最適化 ロバスト性 安定性 平等性

1. 研究開始当初の背景

(1) 東日本大震災以降の科学技術のあり方として、想定外事象が起こった際にいかに対処するかを現実的に考える必要性が議論されている。また我々の社会を取り巻く環境は、気象変動、自然災害、急激な技術発展、経済変動、その他の構造変化に直面してきている。これらの現象に対処すべく、**レジリエント**なシステムの重要性が情報学を含む多くの分野で認識され始めている。システムがレジリエント

(resilient)であるとは、外的な擾乱に対して**耐性**があり(resistant)、なおかつ実際に擾乱が起きて機能が低下しても**回復性**がある(recoverable)ことをいう[1]。元来レジリエンスとは、生態学・環境科学・社会学など多様な研究分野において知られていたシステムレベルの性質に関する概念である。自然界・人工物・社会システムを問わず、レジリエントなシステムの例は多数存在するが、レジリエンスに関する統一的な基礎原理の研究はほとんど存在しない。

(2) 本研究は、レジリエンスに関する統一的な原理の確立を最終目標とする、レジリエンスの計算理論に関する先駆的研究である。前述した最前線の問題はどれも変化を伴うものであり、関係する情報も常に変化している。こうした**情報のダイナミクス**を扱う問題においては、時間変化を適切にモデル化する必要がある。またシステムのモデリングに加えて、外部から強制される**外的事象**(exogenous event)や**擾乱**(perturbation)を考え、それらがダイナミクスに与える影響を考慮しなければならない。ダイナミクスに関する計算では、多くの場合計算量がNP困難であることが知られており、擾乱が起きた時のシステム修正・更新に関わる計算においては克服すべき課題となる。また更新の際には、新たなシステムが満たすべき制約を定め、情報の変化分や更新のコストが少なくなるように遷移させることが望ましい。

(3) 以上のように、システムのレジリエンスに関わる問題は人工知能における**ダイナミクスを伴う推論**が関係しており、本質的な研究の必要性が生じてきている。本研究グループではレジリエンス研究の重

要性を説いた新規の枠組み「**SR モデル**」を提案し、エージェント分野におけるトップ国際会議 AAMAS 2013 で新規挑戦的研究として受賞認定された[2]。

2. 研究の目的

本研究ではレジリエンス研究に対して、動的環境下や不完全環境下における推論技術、および新しい推論方式の適用を考えることによりアプローチする。このために、次の3項目をサブテーマとして掲げる。

(A) レジリエントなシステムのモデル化:

まずエージェントの集合に対し、各エージェントが**制約充足問題**(constraint satisfaction problem; CSP)や**制約最適化問題**(constraint optimization problem; COP)により組み合わせさせたマルチエージェントシステムとして一つのシステムを定義することを考える。このような**制約ネットワーク**(constraint network)がダイナミックに更新される場合に、時間列に沿った制約列を**動的制約**(dynamic constraint)とみなした一般的な動的システムを考える。

この枠組みの上で、システムのレジリエンス性を満たすべき性質として定義する。このために、**耐性**(resistance)、**回復可能性**(recoverability)、**機能性**(functionality)、**可安定化性**(stabilizability)、等の異なる指標を[3]で抽象的に提案したが、具体的な性質はシステムの実体に応じて詳細化する必要がある。また擾乱は環境から強制される外的要因として定義できるが、状態遷移には擾乱以外にも、エージェントが主体となって行ったアクションや時間経過にともなう自然遷移なども存在しており、システムに与える影響は異なってくる。

(B) システムのレジリエンス性に関する推論:

(A)の定式化の下で、推論問題を定式化し、計算アルゴリズムの開発と計算量の解析を行う。推論問題としては、まず擾乱が起こった場合に実際にシステムの変化分を計算する**システム更新**が考えられる。システムに制御可能なアクションがある場合はどのアクションを行うと最もレジリエントであるかを推論し、最適な状態に遷移する。このために必要となる

制約最適化技術を開発する。次に、変化が起きた後、ある目標や機能を一定時間内で満たすようにシステムが回復可能かどうかを推論する**モデル検査**も重要であり、取り得る行動に関してそのレジリエンス性の検査を行い戦略決定に用いる。

(C) レジリエントなシステムの設計と応用:

レジリエンス性を高めるためのシステム作りをどのようにすればよいかを考える。生態学やその他の関連する文献からの知見では、分散性、冗長性、多様性、適応性、等の要素が複雑に絡んでくると考えられる。これらの性質が(A)の指標にどう影響するか、また(B)の計算量やロバスト性にどう関わるかについて解析し、システムの最適化設計の方針として整理する。さらに、生物ネットワークやサイバーセキュリティ、災害救助、ナースケジューリング等の問題に適用し、研究成果として得られるモデリング手法と設計方針を検証する。

3. 研究の方法

(1) 本研究では、外乱に対して耐性があり、機能が持続的であるような、レジリエントなシステムを定式化し、その上での推論問題を考え、システム設計に役立てることを目指す。このため、研究の目的で述べた(A), (B), (C)の具体的な3つのサブテーマの各々について考察を行いつつ、これらサブテーマ間での関連も探りながら研究開発を進める。全体としては、動的な制約ネットワークにおける推論を具現化し、様々な応用を軸にして研究成果を統合し、レジリエンスの計算原理として確立する。

(2) マルチエージェントシステムにおける制約ネットワークがダイナミックに更新される場合を考え、時間遷移に沿った制約列を**動的制約**とし、動的システムを表現する。このようなシステムの時間による系列を**動的制約ネットワーク**(dynamic constraint network; DCN)と呼ぶ。DCNの枠組みの上で、任意のDCNがレジリエントであるための性質をいくつかの指標として表現する。従来、防災科学分野では、[3]

で失われたシステム機能を時間軸上で積分することでレジリエンスを定量化する方法が示されている。

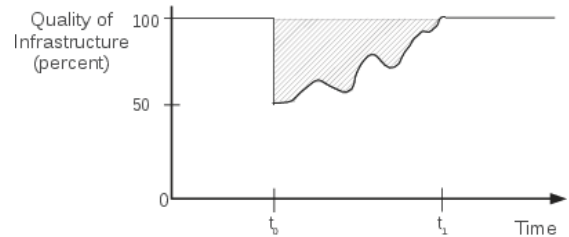


図1: 時間の流れとサービスの損失率(網掛け部分)

例えば図1では、時刻 t_0 に損失が起き時刻 t_1 で機能が回復する様子を示しており、この間に生じる三角形の面積が損害の大きさであり、この面積が小さい方がよりレジリエントであるとされる。この研究を一般化する形で、我々は2013年に論文[2]にて、耐性、回復可能性、機能性、可安定化性、の4指標を概念的に提案した。これらの4指標のパラメーターの組み合わせでレジリエンス性能が決定されるが、これは典型的な**多目的最適化**(multi-objective optimization)の問題となる。この問題を本格的に議論するには、**パレート最適性**(Pareto-optimality)で表現されるトレードオフについて調べる必要があり、本研究では多目的最適化の方法論として追求する。

(3) 一般的なレジリエンスの指標を具体的なシステムの定義に沿って詳細化する。応用としては、チーム編成や各種スケジューリングがある。また時間経緯による自然遷移との融合を図りより複雑なダイナミクスを考慮した拡張モデルの応用として、遺伝子ネットワークの制御、特に**概日時計**(circadian clock)システムのレジリエンス性等を調べる。

4. 研究成果

(1) サブテーマ(A)「レジリエントなシステムのモデル化」について、レジリエンスを議論するための制約モデルとして提案していたSRモデル[2]では、系が満たすべき様々な評価尺度を定義していた。このSRモデルを拡張・改良する形で、動的システム・擾乱を抽象的にモデル化し、レジリエンス性に関係する重要な指標を与えた。またダイナミック制約モデル

に外的事象も取り入れた現実的なレジリエンス・シナリオにおける適用可能性についても議論した。

(2) サブテーマ(B)「システムのレジリエンス性に関する推論」について、レジリエントなシステムを動的な多目的制約最適化問題のフレームワークを用いて定式化し、「耐性」があり「機能性」もあるような、すべてのパレート最適解を求めるアルゴリズムを開発した。本アルゴリズムは制約最適化アルゴリズムで広く用いられている擬似木に基づくリアクティブなアルゴリズムであり、実験では異なるタイプの動的な変化を用いてその性能を評価した。

(3) サブテーマ(B)の推論問題に関連して、多目的制約最適化問題が与えられたとき、すべてのパレート最適解を列挙するのではなく、パレート解の中からいくつかの選ばれた解の集合のみを求める手法や近似解法のためのアルゴリズムを開発した。パレート最適解の個数は指数オーダーで増えるため、本近似解法を使えば現実的な時間で代表解を計算することができる。選択的な解として、各最適関数の**平等性**(egalitarianism)を考慮したもの、選好に基づく重み和を最大化する**実用性**(utilitarianism)を重視するもの、さらに代表解間の距離をバランス良く取ることで与えられた個数の**代表解**により最適クラスタリングされたものなどを考慮した。

(4) 以下の成果はいずれもサブテーマ(C)「レジリエントなシステムの設計と応用」に関係している。

まずレジリエントなマルチエージェントシステムの例として、**チーム編成問題**におけるロバスト性に着目した研究を行った。耐性をもつチーム編成問題のフレームワークを定義し、チーム編成問題における決定問題及び最適化問題を与え、これらの計算量について議論しアルゴリズムを提案・評価した。

また、**ロボットレスキュー問題**におけるロバストなチーム編成について、2重目的関数をもつ最適化問題として定式化し効率化手法を提案した。さらに、**災害派遣医療チーム**(Disaster Medical Assistance Team, DMAT)編成問題に応用し、南海トラフ地震を想定したシミュレーション実験で、640のDMAT(東

日本大震災時の2倍)を1秒以内に編成した。

(5) レジリエントなシステムの生命システムへの応用として、**概日リズム**におけるレジリエンスについて研究を行った。生体の周期性をもつメカニズムの解明は、生体システムの解析における基本問題の一つであり、遅延時間効果は持続可能性や振動現象の制御にとって最も重要である。概日リズムは擾乱に対して修復可能な適応性があり、生体の中ではレジリエントな性質が現れている典型的な現象である。例えば、長距離のフライトにより時差ボケや夜勤などの時間シフトが与える影響からの回復力がそれに相当する。本研究では、時間様相論理 TCTL を用いてレジリエンス性能を定式化し、パラメータ化されたモデル検査法を用いて、図2で示されるような概日時計の単純なブーリアンモデルにおいて日照パターンの変化による概日リズムの周期性を解析した。

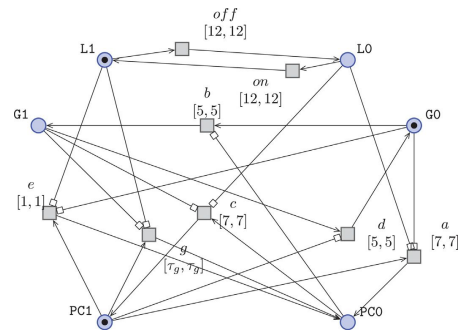


図2: 概日時計の時間ペトリネットモデル (Andreychenko, et al., *BioSystems* 149, 2016)

(6) 動的ネットワークとして人間・社会のネットワークも考え、その中での**情報伝播モデル**に適用する研究を行った。本研究では、情報伝播の科学的解明に向けて、人の信念が他者からの影響を受けて変化するダイナミクスを明らかにすることを目的としている。レジリエンス研究にとっては、ネットワーク上のどの人物が他に影響を与えることができるか、対立する意見や悪い噂に対してネットワークの総意を維持することができる「耐性」はどのように特徴づけられるか、ネットワークのセキュリティを向上させるにはどのように制御ノードを配置するべきか、等の観点において基礎技術を提供することができる。

まず、ソーシャルネットワーク内のエージェントが信念を徐々に変化させるシステムを表現するための一般的な枠組みを **Belief Revision Games (BRG)** として提案した。BRG では人工知能・知識表現分野で研究されてきた信念変更の理論に基づき、基本的性質や期待される論理的性質に関する振る舞いについて解析することができる。図3はBRGシミュレーターにおける信念状態のスナップショットであり、各エージェントの信念が色づけされて表されている。青、赤、グレーはそれぞれ、ある話題（例えばあるブランドに関する評価）に関する肯定的、否定的、中立的（意見無し）な意見を表現しており、BRG 実行により信念変化の時間遷移を見ることができる。

またBRGにおいて、エージェント全体の合意を得るためには、どのような信念を彼らに与えておくべきかという問題について基礎的に解析した。

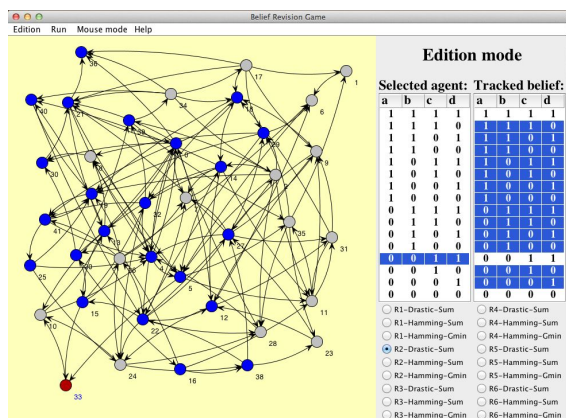


図3: 信念翻意ゲーム(BRG)のシミュレーター

(7) 本研究は平成26年度～28年度の3年間の研究で順調に遂行し、サブテーマ (A) において、システムをダイナミック環境における制約系として定義し、レジリエンス性能に関係するいくつかの指標を含むモデル化の部分は完成した。また、サブテーマ (B) においてそれら指標を決定する計算問題の定義とアルゴリズム開発も進んだ。それ以上に進展したのが、チーム編成問題や信念翻意ゲームなど、応用して進めていたサブテーマ (C) の研究である。レジリエントな系としてこれらを見るならば、擾乱に強く回復力があるような制約系や情報伝達系をどのように設

計するかという点が重要になってくる。レジリエントな系の設計問題とは、ダイナミック遷移列を入力としそれらの遷移を実現する系の帰納問題に帰着することができる。そこで本レジリエンス研究を機械学習研究と融合させることにより、ダイナミック制約系やエージェント系における学習研究へと飛躍的に発展させることができると考えられる。このために、平成29年度より4年計画で基盤研究(A)「状態遷移列からの関係ダイナミクス学習」を開始しており、本レジリエンス研究は当初立てていた4年間の研究計画を1年前倒してして終了させた。レジリエントな系のモデル化と推論研究については、これまで追及してきた3つのサブテーマの有機的な結合について今後も考察を続け、レジリエントなシステム設計の方法論の一部として整備を続けて行く予定である。

<引用文献>

- [1] Patricia H. Longstaff, *et al.*: Building resilient communities, *Homeland Security Affairs*, 6(3) (2010).
- [2] Nicolas Schwind, Tenda Okimoto, Katsumi Inoue, Hei Chan, Tony Ribeiro, Kazuhiro Minami, Hiroshi Maruyama: “Systems resilience: a challenge problem for dynamic constraint-based agent systems.” *Proc. AAMAS 2013*, pp.785-788.
- [3] Michel Bruneau, *et al.*: A framework to quantitatively assess and enhance the seismic resilience of communities, *Earthquake Spectra*, 19(4):733--752 (2003).

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 30 件)

Alexander Andreychenko, Morgan Magnin, Katsumi Inoue: Analyzing resilience properties in oscillatory biological systems using parametric model checking, *BioSystems*, 査読有, Vol.149, 2016, pp.50-58, DOI: [10.1016/j.biosystems.2016.09.002](https://doi.org/10.1016/j.biosystems.2016.09.002)

Nicolas Schwind, Morgan Magnin, Katsumi Inoue, Tenda Okimoto, Taisuke Sato, Kazuhiro Minami, Hiroshi Maruyama: Formalization of Resilience for Constraint-Based Dynamic Systems, *Journal of Reliable Intelligent Environments*, 査読有, Vol.2, No.1, 2016, pp.17-35, DOI: [10.1007/s40860-015-0016-0](https://doi.org/10.1007/s40860-015-0016-0)

Tenda Okimoto, Tony Ribeiro, Damien Bouchabou, Katsumi Inoue : Mission Oriented Robust Multi-Team Formation and its Application to Robot Rescue Simulation, *Proc. 25th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-16)*, 査読有, 2016, pp.454-460.

Nicolas Schwind, Katsumi Inoue, Gauvain Bourgne, Sébastien Konieczny, Pierre Marquis: Is Promoting Beliefs Useful to Make Them Accepted in Networks of Agents? *Proc. 25th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI-16)*, 査読有, 2016, pp.1237-1243.

Nicolas Schwind, Tenda Okimoto, Maxime Clement, Katsumi Inoue: Representative Solutions for Multi-Objective Constraint Optimization Problems, *Proc. 15th International Conference on Principles of Knowledge Representation and Reasoning (KR 2016)*, 査読有, 2016, pp.601-604.

沖本 天太, クレモン マキシム, シュウインド ニコラ, 井上 克巳: 動的な多目的制約最適化問題におけるレジリエントな解, 電子情報通信学会論文誌, 査読有, Vol.J98-D, No.6, 2015, pp.884-893, DOI: [10.14923/transinfj.2014SWP0001](https://doi.org/10.14923/transinfj.2014SWP0001)

Tenda Okimoto, Nicolas Schwind, Maxime Clement, Tony Ribeiro, Katsumi Inoue, Pierre Marquis: How to Form a Task-Oriented Robust Team, *Proc. 14th International Conference on Autonomous Agents and Multiagent Systems (AAMAS 2015)*, 査読有, 2015, pp.395-403,

Nicolas Schwind, Katsumi Inoue, Gauvain Bourgne, Sébastien Konieczny, Pierre Marquis : Belief Revision Games, *Proc. 29th AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-15)*, 査読有, 2015, pp.1590-1596,

Maxime Wack, Tenda Okimoto, Maxime Clement, Katsumi Inoue: Local Search Based Approximate Algorithm for Multi-Objective DCOP, *Proc. 17th International Conference on Principles and Practice of*

Multi-Agent Systems (PRIMA 2014), *LNAI*, 査読有, Vol.8861, 2014, pp.390-406,

Nicolas Schwind, Tenda Okimoto, Sébastien Konieczny, Maxime Wack, Katsumi Inoue: Utilitarian and Egalitarian Solutions for Multi-Objective Constraint Optimization, *Proc. 26th IEEE International Conference on Tools with Artificial Intelligence (ICTAI 2014)*, 査読有, 2014, pp.170-177,

【学会発表】(計 17 件)

Maxime Clement , Limiting Perturbations in Dynamic DCOP , 第30回人工知能学会全国大会 , 2016

沖本 天太 , 災害派遣医療チームのためのダイナミック・スケジューリング , 合同エージェンetwork ショップ&シンポジウム2015 , 2015 .

【図書】(計 4 件)

Nicolas Schwind, Kazuhiro Minami, Hiroshi Maruyama, Leena Ilmola, Katsumi Inoue , Springer , Computational Framework of Resilience, in: *Urban Resilience: A Transformative Approach* , 2016 , pp.239-257

情報・システム研究機構 新領域融合センター , 近代科学社 , システムのレジリエンス—さまざまな擾乱からの回復力— , 2016 , 138p

6 . 研究組織

(1) 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

(2) 研究分担者

沖本 天太 (OKIMOTO, Tenda)

神戸大学・海事科学研究科・准教授
研究者番号 : 10632432

Nicolas Schwind (SCHWIND, Nicolas)

国立研究開発法人 産業技術総合研究所・その他部局等・研究員
研究者番号 : 60646397

(3) 研究協力者

RIBEIRO, Tony (フランス・エコールサントラルドゥナント・博士研究員)

MAGNIN, Morgan (フランス・エコールサントラルドゥナント・准教授)