

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 23 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25289129

研究課題名(和文) 知的System of Systemsを指向する高度分散知能基盤の創生

研究課題名(英文) Creation of advanced distributed intelligent infrastructure for the intelligent system of systems

研究代表者

濱上 知樹 (Hamagami, Tomoki)

横浜国立大学・大学院工学研究院・教授

研究者番号：30334204

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,200,000円

研究成果の概要(和文)：高信頼・安全・堅牢・自律性の基盤となる新たな「総合性の工学」- System of Systems(SoS) を、知能技術を用いて高度化したintelligent SoS(iSoS)アプローチを明らかにした。iSoSを支える知的要素技術として、スキルベース学習とアンサンブル逆強化学習のアルゴリズムを開発し、救命救急トリアージシステム、システム品質評価、システム異常監視への応用をはかった。以上の結果から、近未来のCPSにつながる高度システム開発手法の提案に至った。

研究成果の概要(英文)：System of systems (SOS), a novel comprehensive engineering, which is the infrastructure of high-reliability, security, and autonomous system, makes grown more sophisticated by the proposed intelligent framework. This framework involves a skill-base learning (SBL) and an ensemble inverse reinforcement learning (EIRL) as an intelligent element of iSoS, and supports to develop an emergency call triage system, system evaluation method, and anomaly prediction method. These results show that iSoS leads to the next system engineering era with cyber-physical systems and IoT.

研究分野：知能システム, 機械学習, 人工知能

キーワード：システム情報処理 機械学習 最適化 System of Systems

1. 研究開始当初の背景

多くのヒト・モノ・コトが相互に関わり、様々なレベルで干渉しあう「超人工システム」は、今後さらに大規模化・複雑化・多様化が進むであろう。その結果、決して止めることのできない社会システムを安定運用しながら、新たに生じる様々な社会的要求や自然災害の影響に迅速に対応し、かつ将来の技術革新によって可能となる未知のシステムとの相互運用を実現する要求は、ますます重要かつ困難になってくる。すなわち、従来の設計・実装・運用維持という枠に留まらないシステムライフサイクルを含めた、新たな超人工システムの設計・最適化手法の課題解決が喫緊の課題である。この課題解決のためには、特定のシステムに閉じた設計技術ではなく、システムにかかわる全ての技術要素を包括する新たな「総合性の工学」の視点が必要である。

その嚆矢として、今世紀になり大きな発展を遂げた先進のアプローチが System of Systems (SoS) という学際的システム工学手法である。SoS 分野を牽引している Jamshidi らは、SoS を、"System of systems are large-scale integrated systems that are heterogeneous and independently operable on their own, but are networked together for a common goal." と定義し、多数の人工物で構成されるシステムを対象に、そのライフサイクルと個別要素の設計・製造・運用を高度のマネジメントするための包括的な方法論と位置付けている。SoS は今世紀に入り、米国において主に軍や宇宙システム等の大規模複雑システムの開発・運用技術として、様々な技術を取り込みながら発展してきた。その特徴は、動的・複雑な大規模システムを人間中心(Human centric)でとらえるとともに、ネットワーク資源を最大限に活用(Net Centric)した設計、実装、そして相互運用性を重視している点にある。これまで SoS は大規模な FCS(Future Combat System)や NASA のプロジェクトで実践され、大きな成果・実績を上げている。

近年、実システムにおける SoS の成功を受けて、SoS を社会システムに応用する試みが始まっている。IBM は、2010 年から計算機ネットワークと Big Data の分散処理技術をコアとした Smart Planet という SoS をかけ、交通、エネルギー、医療への実応用をはかるうとしている。また、学際分野では SoS を専門に扱うソサイエティや、国際会議(International Conference on System of Systems Engineering)も IEEE を中心に組織され年々活性化をしている。アジアにおいては中国がいち早く電力ネットワーク運用に SoS を利用する試みを始めている。

我が国においても、機械設計や経営工学の分野で SoS のコンセプトが紹介されるようになってきた。また、人工衛星の設計・運用分野では先んじて SoS の導入が進められている。その中で、震災以降の新たな社会システ

ムの在り方の模索や、頑健なネットワークの維持運用をめざす上で SoS の技術が重要な役割を担うことが期待されている。しかし、SoS 構築のための具体的手段や要素技術研究の遅れから、SoS を手掛ける研究者はまだ少なく、その研究範囲は限定的である。その結果、SoS の真価である本来の学際的・分野横断的な拡がりには至っていない。

2. 研究の目的

本研究では、今後ますます大規模化・複雑化・多様化する超人工システムの設計・構築・運用の困難さに挑戦し、持続的な発展サイクルを維持し続けるために、以下の目標を設定した。

- (1) iSoS 基盤技術の確立 大規模分散データの知的構造を司る、コンカレント機械学習、確率最適化、分散システム、複雑ネットワークの数理研究を総合・発展させ iSoS の要素技術を確立する。
- (2) iSoS 設計理論の構築 iSoS を形作る様々なレイヤにまたがる相互依存性を抽出し、相互運用の際に生じる干渉をモデル化するとともに、制御可能にするために、そのコンテキストを分析・評価する知的機構(フレームワーク)を構築する。
- (3) iSoS の創生 医療・福祉・エネルギー・ネットワーク等、社会を支える知能インフラシステムプロトタイプを iSoS として構築・評価をし、iSoS 創生の嚆矢とする。

3. 研究の方法

本研究は4年の間に、高信頼・安全・堅牢・自律性の基盤となる新たな「総合性の工学」- System of Systems(SoS) の基盤技術である知的コンポーネント・ネットワーク技術を確立し、新たな学際分野 intelligent SoS の創生に貢献する。具体的には以下の項目についてそれぞれの年度の取り組みを計画する。

- (1) iSoS 基盤技術の確立(iSoS fundamentals) : iSoS 構築に必要な、大規模分散データの知的構造を発見するコンカレント機械学習、確率最適化、分散システム、複雑ネットワーク各研究を総合・発展させることで、大規模システムの効率的運用と、硬直性打開、相互運用性、レジリエンス確保に貢献する。そして、知能システム技術に基づく「超人工システム」の基盤技術を体系化する。
- (2) iSoS 設計理論の構築(iSoS integration) : システムの進化的相互作用を扱うために、新たな相互作用モデルと表現を与える。様々なレイヤにまたがる相互依存性を抽出し、相互運用の際に生じる干渉をモデル化するとともに、そのコンテキストを分析・評価する機構を「超人工システム」の最適化問題としてとらえ、これを自律的に維持しつづけるしくみを構築する。

- (3) intelligent SoS (知的 SoS) の創生(iSoS creation):以上の要素技術の提案 設計, プロトタイプの完成によって, 新たな知的構造の創生すなわち, intelligent System of Systems(iSoS)技術の体系化をはかる。そして, 具体的応用システムを構築し, その有効性を評価する。

4. 研究成果

前述の目的のために, SoS の基盤技術の確立と, その設計理論の構築, および知能システムと融合した知的 SoS(iSoS)の創生のために, 前半2年(H25, 26 フェーズ1)と後半2年(H27, 28 フェーズ2)にわけて実施した。フェーズ1では, SoS の要素技術と設計方法に関する体系化を行い, 研究期間全体を通して, iSoS の基盤技術, iSoS の設計理論, iSoS の社会実装を達成してきた。以下, それぞれの年度における取り組みと結果を述べる。

H25 年度では, これまで検討を進めてきた分散知能要素技術を深化させ, SoS の要素技術として高度化するための基盤技術の理論展開をはかった。具体的には, 機械学習および最適化技術等の知的要素技術について, SoS にむけた新たな進展をみた。具体的な研究成果を以下に列挙する

- (1) iSoS 基盤技術として, SoS を構成するシステム同士の依存関係を自律的に学習し運用をしながら, システム全体としての「スキル」を向上させる, アンサンブル逆強化学習のアルゴリズムと, これを動作させるための進化的アプローチ, および, 類似の経験からスキルを転移させる位相転移学習の方法を明らかにした。
- (2) iSoS 設計理論の構築として, 認知バイアスを含む複雑な系の最適化手法を考案し, その基本的効果を明らかにした。
- (3) iSoS の社会実装にむけて, 救命救急システムにコンカレント機械学習のしくみをとりにれたアルゴリズムを試行し, 従来精度(35%)を大きく超える判定精度(80%)を達成し, 新たな SoS の事例としての基礎を確立した。

H26 年度では, iSoS の実装事例となる救命救急支援システムの高度化をさらに進め, iSoS の核となる相互運用性維持のための技術的要件と性能について明らかにした。具体的に研究成果を以下に列挙する

- (1) 機械学習を用いたコールトリアージの高精度化と動的ディスパッチ運用評価用シミュレーションシステムについて大きな進歩が得られた。トリアージの高精度化のために, ランダムフォレストを基礎とする新たなアルゴリズムを提案し, 運用条件を満たした状態で従来の 2.5 倍(80%)を超える精度が達成された。

- (2) この精度のもとで, 動的ディスパッチ運用を評価するために, 高精度なシミュレーションシステムを開発した。
- (3) さらに, 家庭での簡易トリアージを行うことを想定して, 救命救急データの中から優先項目を抽出する学習を行い, 少ない判定項目で高い精度が得られることを明らかにした。

このように H26 年度では, SoS の特徴である複合システムを知能システムで連携させるための具体的方法論を明らかにすることができた。

当初予定に入れていなかった新たな試みとしてパワートリアージの研究に着手した。これは, エネルギーの優先的選択を最適化する手段である。この目的のために, 新たに研究着手をした逆強化学習アルゴリズムによって, 人の振る舞いから適切な行動を獲得するための学習方法を明らかにした。

また前年度に提案した, スキルベース学習と呼ぶ新たな学習パラダイムを深化させ, 学習が未完成の状態からでも実環境に導入させながら学習を進行する手段を明らかにした。

これらの具体的研究事例の積み上げにより, H27 年度からのフェーズ2につながる主な要素技術が明らかとなった。

H27 年では, フェーズ2の1年目として, ここまでに検討をしてきた iSoS 基礎技術と設計論の社会実装にむけた取り組みを開始し, 以下の成果が得られた。

- (1) iSoS の主要アプリケーションとして位置づけている知的救命救急システムの実現に大きな進展があった。トリアージシステムの精度を85%にまで向上させることに成功するとともに, 救急車ルーティングの詳細なシミュレーションシステムの実現に至った。この成果は, 新聞, マスコミ等でも取り上げられ大きな波及効果が得られた。さらに, iSoS の要素技術の1つに位置づけているシステム間相互運用性実現のために, 知的機構の転移を容易にするアンサンブル逆強化学習の萌芽的検討を開始し, シミュレーションレベルで効果が確認できた。
- (2) iSoS がめざす持続可能社会に向けた取り組みとして, 複数のインフラシステムへの技術転用を開始した。1つは機器故障診断・予知であり, 機械学習による保守運用の最適化をめざした取り組みである。one-class SVM とマルチスケールの異常判定機構により, 高い診断精度が得られることが確認でき, 特許を取得している。さらにこの技術を転用した, 水道インフラ制御に着手を開始した。
- (3) iSoS 開発上不可欠なソフトウェアの品質評価について, ライフサイクルの長い通信インフラシステムを事例にした新たなメトリクスを開発した。

以上のように，ここまでに研究を進めてきた知的 System of Systems 技術は当初目標を超えた様々なアプリケーションへの応用が達成できている。

最終年度である H28 では，ここまでに検討をしてきた iSoS 基礎技術と設計論の社会実装にむけた取り組みを複数着手し，以下のような成果に至った。

- (1) iSoS の主要アプリケーションとして位置づけている知的救命救急システムの成功を受けて，さらにこれを病院初診診療科判定への展開を図った。アンサンブル学習によるトリアージアルゴリズムをカルテデータと医療データベースに対して転用し，実証実験に至っている。
- (2) 病院と地域を連携させることを目的に，企業・病院と共同プロジェクトを開始をし，iSoS のプラクティスに至ろうとしている。
- (3) iSoS 間相互運用性実現のために，知的機構の転移を容易にするアンサンブル逆強化学習の応用では，別途進めている基礎検討とは別に，機器故障予測と水道自動制御への転用をはかりつつある。
- (4) 水道事業においては，下水処理場の自動化をめざした知的画面監視技術を開発し，実データを用いた評価で人による制御と遜色ない精度が達成された。
- (5) 機器故障診断では，実環境における one-class SVM とマルチスケールの異常判定機構を開発し，特許化，実証実験に至っている。
- (6) 機械学習による保守運用の最適化をめざした取り組みでは，深層学習を用いた画面画像からの学習により，高い精度での設備制御が可能であることを示した。

以上のように，ここまでに研究を進めてきた知的 System of Systems 技術は当初目標を超えた様々なアプリケーションへの応用が達成され，当初の目的であった iSoS 基盤の創生が達成された。さらにこれらの知見を活かした高度な CPS の相互運用性向上，IoT システムの設計論へと波及するに至った。

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 8 件)

1. Hayato Sasaki, Fumiya Hamatsu, Tomoki Hamagami, “Construction of visual codebook for speeding up visual-based simultaneous Localization and Mapping,” Journal of International Council on Electrical Engineering Vol.7 issue7, 2017 (査読有) (in printing)
2. 富田真司, 濱津文哉, 濱上知樹, “準エキスパート集団からのアンサンブル逆強

化学習”, 電気学会電子情報システム部門論文誌 C, Vol.137 No.4, pp.667-673, 2017(査読有) DOI: 10.1541/ieejeiss.137.667

3. 中村光宏, 濱上知樹, “複雑ネットワークの指標値に基づくソフトウェア品質分析”, 電気学会電子情報システム部門論文誌 C, Vol.135 No.5, pp. 553-558, 2015(査読有) DOI: 10.1541/ieejeiss.135.553
DOI: 10.1541/ieejeiss.135.553
4. Kento Yokose, Tomoki Hamagami, “Intelligent call triage system with algorithm combining decision-tree and SVM,” Soft Computing in Machine Learning (Advances in Intelligent Systems and Computing) Vol.273, Springer pp.21-31, 2015 (査読有) DOI: 10.1007/978-3-319-05533-6_3
5. Shota Yunoki, Tomoki Hamagami, Kenji Oshige, Chihiro Kawakami, Noriyuki Suzuki, “High Accuracy of Call Triage Decision by Bayesian Network,” Electronics and Communications in Japan, Volume 97, Issue 1, pp.62-69, 2014(査読有) DOI: 10.1002/ecj.11439
6. Naoki Someya, Tomoki Hamagami, “A new robust technique for constructing intelligent environment using video image,” The Journal of International Council on Electrical Engineering Vol.3 No.2, pp. 187-191, 2013(査読有)DOI: 10.5370/JICEE.2013.3.2.187
(他 査読有論文 2 件)

[学会発表](25 件)

1. M. Nakata, W. Browne, T. Hamagami and Keiki Takadama, “Theoretical XCS Parameter Setting of Learning Accurate Classifiers,” Genetic and Evolutionary Computation Conference 2017, 2017/7/19, (Berlin, Germany)
2. Y.Yamada, F.Hamatsu, T. Hamagami, “Construction of the severity decision system combining Balanced Random Forest and Decision Tree,” Proc. of The International Conference on Electrical Engineering, 2016/7 (Okinawa)
3. H.Sasaki, F.Hamatsu, T.Hamagami, “Construction of visual codebook for speeding up visual-based Simultaneous Localization and Mapping,” Proc. of The International Conference on Electrical Engineering, 2016/7 (Okinawa)
4. H.Tsunekawa, T.Suzuki, T.Hamagami, “Examination of skill-based learning by inverse reinforcement learning using evolutionary process,”

- Proceedings of 2015 IEEE 9th International Conference on Intelligent Systems and Control, 2015/1/9 (Coimbatore, India)
5. S.Satsuka, T.Hamagami, “Practical simulation of the dynamic ambulance dispatch for the call triage operation,” 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, 2015/8/26 (長崎)
 6. 濱上知樹, “不完全知覚状態をサブゴールとする階層型強化学習,” 電気学会電子・情報・システム部門大会講演論文集, 2015/8/26 (長崎)
 7. 山田雄基, 濱上知樹, “Balanced Random Forest を用いた特徴量抽出に基づく重症度判定システムの構築,” 情報科学技術フォーラム講演論文集, 2015/9/15 (愛媛)
 8. 佐々木勇人, 濱上知樹, “全方位動画像を用いた自己位置推定高速化のための特徴空間の構築,” 情報科学技術フォーラム講演論文集, 2015/9/15 日(愛媛)
 9. 武石真登, 恒川裕章, 鈴木拓央, 濱上知樹, “観測の共起関係を利用した転移学習による強化学習の高速化,” 計測自動制御学会第 42 回知能システムシンポジウム 2015/3/17(神戸)
 10. 武石真登, 恒川裕章, 鈴木拓央, 濱上知樹, “強化学習における word2vec を用いた転移学習,” 計測自動制御学会第 6 回コンピューショナルインテリジェンス研究会 2014/12/8(大阪)
 11. 富田真司, 恒川裕章, 鈴木拓央, 濱上知樹, “非エキスパートエージェント集団からのアンサンブル逆強化学習,” 計測自動制御学会第 6 回コンピューショナルインテリジェンス研究会 2014/12/8 年(大阪)
 12. T.Suzuki, T.Hamagami, “Context awareness by unit-type evolutionary Petri net for team medical care support,” IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics, SMC 2014 2014/10 (San Diego, USA)
 13. K.Yokose, T.Hamagami, “Intelligent call triage system with algorithm combining decision-tree and SVM,” The 14th International Symposium on Advanced Intelligent Systems, 2013/11/13 (Daejeon, Korea)
 14. Tsunekawa, T.Hamagami, “Fundamental study of inverse reinforcement learning from sub-experts in evolutionary process,” International Symposium on Artificial Life and Robotics 2014/1 (Beppu)
 15. M.Takeish, T.Hamagami, “Transfer Learning for Q-learning by Using

Similarity of Phase Structure in State Spaces,” International Symposium on Artificial Life and Robotics 2014/1 (Beppu)

16. 武石真登, 濱上知樹, “文脈に応じて行動価値を分割する Q-learning,” 情報科学技術フォーラム FIT2013 2013/9/4(鳥取)
17. 恒川裕章, 濱上知樹, “進化過程からの逆強化学習によるスキルベース学習” 情報科学技術フォーラム FIT2013 2013/9/4(鳥取)
18. K.Tada, T.Hamagami, “Multi-agent base Restoration Algorithm for Power Distribution Network in Multiple Failure Cases,” Proc. of The International Conference on Electrical Engineering , 2013/7/14 (Xiamen, China)

(他 学会発表 7 件)

〔産業財産権〕

出願状況 (計 2 件)

名称：異常予兆検出システムおよび以上予兆検出法

発明者：中尾浩二 濱上知樹
 権利者：明電舎、横浜国立大学
 種類：特許
 番号：2015-236278
 出願年月日：2015/12/03
 国内外の別：国内

名称：異常予兆検出システムおよび以上予兆検出法

発明者：中尾浩二 濱上知樹
 権利者：明電舎、横浜国立大学
 種類：特許
 番号：特願 2016-161161
 出願年月日：2016/8/19
 国内外の別：国内

6 . 研究組織

(1) 研究代表者
濱上 知樹 (Tomoki Hamagami)
 横浜国立大学・大学院工学研究院・教授
 研究者番号：30334204

(2) 研究分担者
 なし

(3) 連携研究者
 なし

(4) 研究協力者
 なし