

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：12701

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2010～2012

課題番号：22500125

研究課題名（和文） 知的社会構造を実現する高度分散知能システム基盤の開発

研究課題名（英文） Creation for Core of Advanced Distributed Intelligent Systems for Achieving Intelligent Social-system

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

研究成果の概要（和文）：高信頼で持続的発展が可能な知的社会構造を実現する高度分散知能システムの基盤技術を構築し、分散協調業務を支援する環境知能化の技術を発展させた。当初想定をしていた高度スマートグリッド、分散エネルギー協調制御の高度化に加え、高度救急医療、ネットワーク制御および高信頼ソフトウェア開発技術への応用にも取り組み、分散知能技術の新たな学際分野への展開がはかれた。

研究成果の概要（英文）：

To achieve high-dependable and sustainable societies, methodologies and techniques of intelligent environments for distributed cooperative behavior have been developed by creation for the core of an advanced distributed intelligent system. Along with intelligent applications aimed to develop smart grid, we focused on advanced socio-technical systems which decentralize cooperative control, smart emergency room, smart network control, and dependable software development technique. With several results, we confirm that these achievements are contributing to the development intelligent sociotechnical environment.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

研究分野：総合領域

科研費の分科・細目：情報学，知能情報学

キーワード：知能情報処理

## 1. 研究開始当初の背景

超高齢化・少子化社会に突入した我が国の社会を持続的に発展させていく上で、安心・安全・安価な高度社会サービスを実現し普及させることは喫緊の課題である。その中でも、環境中に配置された種々の知的要素が協調し合い、創発的なサービスを実現する分散知能を用いた環境知能化の研究は、ポストユビキタスの社会インフラとして世界的に注目されている。

その中でも、環境中に配置された多数のセンサ群とネットワークロボットにより、新たな知的サービスを実現する試みが世界的に進められている。また、分散された計算資源とネットワークが創る環境知能化の考え方は、ヒトの生活だけではなく、社会システム全般にも広まっている。例えば、高度な情報通信網や、トレーサビリティ、エネルギーネットワークの効率的な運用に関し、自律的・適応的・協調的—すなわち「スマート」な分

散システムの世界観が様々なシステムで提案されているところである。

このように、人類が直面している医療・福祉・環境問題等の諸課題を解決する手段として、省コストで安全性・経済性の高い分散知能を用いた環境知能化技術は、大きく期待をされている。

しかしこれらの従来研究は、特定のサービスドメインに基づいて設計配置されることが前提である。そのため、設計・調整・設定に多大なコストがかかる。また、個々のユビキタス要素もサービスドメインに特化した仕様を前提とし、ユーザや環境の変化に応じて動的なサービスを展開できる構造を有していない。さらに、将来的には、屋外とのシームレスなサービスインフラへの発展性や、既存システムとの融合・調和による経済性が求められるが、そのための相互運用性への配慮は行われていない。

このように、現在の環境知能化技術を将来の社会インフラとして広く利活用していくためには、可用性とフォールトトレランスの客観的裏づけなど、解決すべき多くの課題が残されている。

一方、研究代表者は、近年、分散知能技術に基づく1.自律移動ロボットとしての知的車椅子、2.認知障害者支援システム、3.分散電源を含む配電システムの自律的自己復旧システム等、高度社会システムで応用可能な分散知能アーキテクチャの確立とアプリケーションへの転用を試みてきた。その結果、これまでの研究で発展を遂げた技術を発展利用することで、様々な用途に転用可能な知的構造の基盤として展開できる可能性を見いだしてきた。

これらの経緯から、本提案として、環境中に分散配置された知的存在の連携・協調から、高度な自律的ネットワークがその使われ方に応じて自在に構築・再構成される知的社会構造の基盤研究の提案に至った。

## 2. 研究の目的

分散知能化環境構築技術を発展させ、高信頼で持続的発展が可能な知的構造を実現する分散知能システムの基盤要素技術を確立する。また、これらを用いた未来社会基盤の事例を試み、応用にむけての評価を試みる。具体的には以下の2つの目的を設定した。

- (1) 本研究では、分散知能システムのモデルとして、「stigmergy」と呼ばれる環境を介したインタラクション操作を用いて全体の制御を実現する機構を用いる。特に、研究代表者らが提案をしている「環境埋め込み型学習」によってこれを実現する。そのためのフレームワークの実現

と理論的性能限界を明らかにする。この検討により、分散知能の空間的拡がりを利用する方法を明らかにする。

- (2) 次に、知的振る舞いをする集団の「群文脈」に着目し、集団の時間方向の変化をシステム制御に取り込む。ここでは研究代表者らが提案をしている「複素強化学習アルゴリズム」を発展させ、学習対象のサンプリング理論として定式化する。この検討により、分散知能の時間的拡がりを利用する方法を明らかにする。
- (3) さらに、分散知能を創発する集団同士の依存関係がある場合の複雑な振る舞いをモデル化し、人工システムに利用する。そのために、相互依存関係のあるイベントを構造化する「進化的ペトリネット」を発展させ、分散知能の相互依存性を活用する手段を明らかにする。

さらに以上の検討を経て、以下の2つの重要なアプリケーションのプロトタイプ開発を試み、この技術の有用性を明らかにする

- (1) 分散エネルギーネットワーク制御技術（日本版スマートグリッド）
- (2) 医療・福祉支援における分散協調業務支援（次世代スマートケアシステム）

## 3. 研究の方法

- (1) 分散知能の時間的拡がりに関する検討  
分散知能の時間方向の拡がり解釈し利用する理論・方法を明らかにする。エージェント同士の相互作用によって生じる不完全知覚問題を解決するために、研究代表者らが発案した「複素強化学習」のアルゴリズムを用いることを検討する。複素強化学習とは、強化学習における価値関数・評価値を複素数に拡張した学習方法である。従来の実数による価値空間と比べ、コンテキストを表す位相を含めた学習が可能である。具体的には強化学習の価値伝搬式において、位相回転を伴う価値伝搬を行い、学習対象である状態空間中の不完全知覚を避けるよう適応的にサンプリング（探索）を行う。その結果、一定の規模の不完全知覚問題を解決することができる。さらに、複数の価値関数を組み合わせることで、大規模な不完全知覚問題に対しても、適応的に状態空間を構成できることを示した。このアルゴリズムによって獲得されるエージェントの振る舞いは、不完全な情報を補うような冗長性のある行動系列となることが示されている。既に「複素Q-learning(dot Q-learning)」と、Profit Sharing(PS)の強化関数を複素関数に拡張した「複素Profit Sharing」、さらに、複素RBFネットワークによる連続状態空間における強化学習のアルゴリズムを実現し、

不完全知覚を含むタスクを効率的に解くことに成功している。本研究においては、従来の単一のエージェントにおける不完全知覚問題への対応を拡張し、マルチエージェントによって生じる不完全知覚状態への適用から検討をはじめ。そして、大規模な群知能における不完全知覚問題に対し複素強化学習を適用するための方法論と、理論的解釈を与え、人間中心の集合知学習手法として確立させる。

- (2) 分散知能の空間的拡がりに関する検討  
分散知能の空間的拡がりを解釈し利用するための理論と方法を明らかにする。この研究により、知的単位・モノ・コトの協調動作を計算可能にする準備が整う。さらに、これを具体的サービスに結びつけるために、環境中に遍在する計算資源をエージェント間の知能創発の場として利用する新しい環境知能化手段について検討を進める。RFIDを始めとする情報書き込み可能な媒体や、環境中に配置されたカメラによる動画像を用い、学習結果を環境中に埋め込み、環境を媒介とした分散学習と情報共有のしくみを実現する。この方法は、従来エージェントの制御機構としてエージェントに内包されていた価値空間を環境の一部に担わせることに相当する。本研究では、このアイデアを「情報轍」として提案し、すでに福祉ロボットの自律行動獲得に応用してきた。本研究では、この手法をさらに推し進め、ロボット自身の学習、環境の学習、ヒトによる振る舞い等が同時進行していく中で、どのような知的構造が創発され、どのようなアプリケーションがこれを有効に活用できるのかを明らかにしていく。環境中に環境依存の知能を電子的に埋め込むことで、エージェントの仕様に依存しない相互運用性を踏まえた高度な分散知能化空間が実現される。
- (3) 分散知能の相互依存性に関する検討  
分散知能の相互依存性を活用するアルゴリズムを明らかにする。知的単位のチーム業務・集合知を抽出、学習、分析、合成するモデルを検討する。複数エージェントの相互作用を表現するための手段として、現在研究代表者が提案している進化型ペトリネットを用いる。本手法は、自律的なチームコンテキスト抽出方法として既にチーム医療業務支援の一部として用いられている。この手法をさらに大規模・汎用的なモデルに拡張することで、高度分散知能の基盤技術と理論を確立することをめざす。具体的なアプリケーションの開発にとりくむ。

以上の方法を用いて、以下の3つの視点から研究をまとめる。

- (1) 基盤技術の理論限界と性能評価および改良研究:実現可能な分散知能の規模・複雑さを明らかにする。2年目の研究では、どの程度の規模の分散知能システムの構築が可能か、また、どの程度の時間で知能化環境が構築できるかのトレードオフを見極める。そのために、シミュレーション実験を中心に性能評価と理論限界をさぐり、最終年度で開発するアプリケーション仕様策定を行う。
- (2) 相互運用性を踏まえたフレームワーク整備と要素技術との干涉調査  
本研究は、相互運用性のある環境知能化をめざしている。これを実現するために、要素技術の展開において適切なフレームワークの設計が不可欠である。下記の具体的なアプリケーションの設計に必要な基盤を整備し、同時に評価をする。
- (3) 高度分散知能アプリケーションの実現  
最終年度には、下記の高度分散知能に基づくアプリケーションの実装および実証実験、評価を行う。
  - (a) 日本版スマートグリッド・分散電源制御システム  
世界的な関心の高まりをみせてスマートグリッドの研究において、時に我が国において要求の高い分散電源の知的制御を実現する。
  - (b) 次世代スマートケアシステム・チーム医療支援システム  
少子高齢化を背景にした医療・福祉の業務効率化をめざし、協調業務を支援する知能化環境の基盤を分散知能技術で実現する。

#### 4. 研究成果

- (1) 階層型複素強化学習アルゴリズム  
多様な不完全知覚環境での学習を目的に、複数文脈を学習可能な複素強化学習手法を提案している。逐次的に分割された問題空間における複素強化学習及び、確率的に内部参照値を決定する複素強化学習について検討を行い、問題空間を小さなサブ問題空間に分割する方法、確率的に内部参照値を決定する複素強化学習法を考案した。不完全知覚を含む迷路タスクと、観測可能な状態が動的に変化する振子の振り上げタスクを用いたシミュレーション実験を行った結果、従来の複素強化学習手法が学習困難な環境に対し、提案手法では十分な学習が行えることが確認された。以上の結果から、提案手法が複素強化学習の適用範囲拡大に成功し、より多くの不完全知覚環境で有効であることを明らかにした。

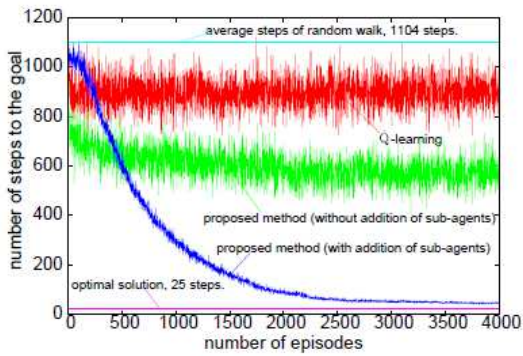


図1 階層型複素強化学習による学習曲線

(2) 分散知能によるスマートグリッド

2層型契約ネットプロトコル(以下 CNP)とエージェントの自己組織化を提案する。CNPとは自律分散制御におけるエージェント協調方法の一種である。提案手法はオペレーションエージェント(以下 OA)とフィールドエージェント(以下 FA)で構成され、OAは自身の担当するFAsのタスク告示の権利を管理する役割を持つ。さらにOAsとFAsの関係性を表す指数を、遺伝的アルゴリズムを用いて最適化することで、エージェント群を環境に合わせて自己組織化している。上記の仕組みにより、従来のCNPをタスク間の干渉が発生する問題に対して適用できるように拡張している。また、問題規模の拡大に対しても、OAを複数体起動することでCNPの実行範囲を分割し、スケーラビリティを向上させることができる。

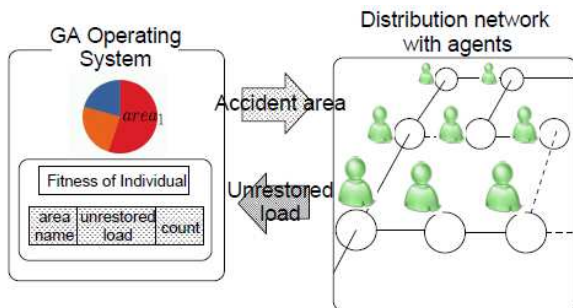


図2 協調ネット制御によるマルチエージェント配電系統事故復旧システム

(3) スマートケアシステム(SMART ER)

ベイジアンネットワークと重みづけを用いたコールトリアージ支援システムを提案する。近年、救急車の出勤回数が増加する傾向にある。しかし、救急要請のなかには、救急搬送の必要のない軽症の傷病者も多数含まれている。これらの不要な要請が、救急隊の現場到着時間を遅延させている。そのため、コールトリアージの導入が注目されている。しかし、コールトリアージは、電話を通じて得た情報をもとに識別するため、識別結果に差が生じることが起こりうる。したがって、コールトリアージ支援システムが求められ

ている。本論文ではベイジアンネットワークを用いたコールトリアージ支援システムを提案する。ベイジアンネットワークを用いることで、判定過程をグラフィカルに表示することや、事前知識を反映させること、そして統計データを用いた統計的学習が可能である。提案システムでは、これまで横浜市において行われてきたコールトリアージの統計データから統計的学習を行った。さらに、重みづけを用いて判定値の修正を行った。ベイジアンネットワークと重みづけによって、従来システムと比較して、判定精度が大きく改善されることが明らかとなった。



図3 高度コールトリアージを中心とするスマート救急医療システム

(4) スマートネットワーク

BAN, 3G, WiFiといった多様な無線通信のそれぞれの長所を生かし、短所をなくすシームレスな通信手法として、3MC(Medical Multihoming MIPv6 Control)を提案した。本論文では、MIPv6にオーバーレイ構造の導入、そして、SCTPとのクロスレイヤー制御により、移動中でも複数の通信キャリアを同時使用することで、患者や傷病者の状態BANで収集し、3G, WiFiなどの無線通信キャリアを介して遠隔にいる医師に送ることができる。緊急医療においては、救急車で患者を搬送しながらでも、患者の病状が搬送先となる病院にいる医師に送り、リアルタイムで症状が観察、診断が搬送と並行に処理できる。また、遠隔にいる医師の判断で、患者の病状に適した救急病院の選択することができる。3MCでシームレスな無線通信ネットワークサービスの提供で、救急現場の医師、救急病院などの限られた医療リソース分配の最適化につなぐことが考えられる。

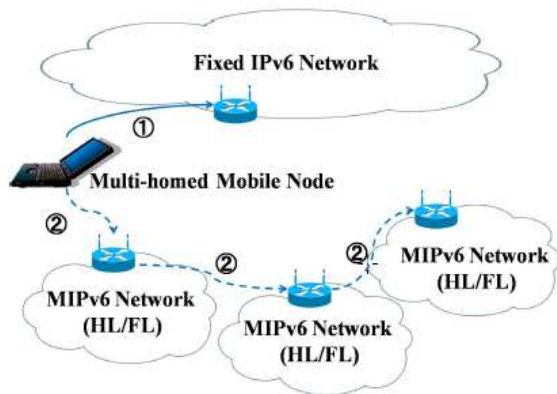


図4 救急医療のために3MCスマートネットワーク

#### (5) 自律分散ロボティクス

近年、動画像を用いて SLAM を行う appearance-based SLAM を用いた自律移動ロボットの手法が注目されている。動画像は含まれる情報が多次元にわたり、高度な状態識別が可能であるため、loop closure 検定の精度が距離センサに比べて高くなる。また、安価なカメラセンサの普及により、動画像リソースの確保が用意なため、移動ロボットを低コストで実現出来るという利点やロボットのオドメトリ情報無しに現在位置を推定出来るという利点もある。

一方、appearance-based SLAM には以下のような課題がある。

- (1) 不完全知覚問題
- (2) 環境変動問題
- (3) 状態を表現する画像特徴ベクトルの次元が高次元になる問題

以上の問題に対して、本論文ではトレードオフの関係となっている不完全知覚と環境変動のバランスをとることができ、特徴ベクトルの次元を抑えた appearance-based SLAM の実現を目的として、特徴点の代わりに画像小領域であるスーパーピクセル (Super Pixel:SP) を画像局所特徴として用いると共に、自然言語処理の手法である Tf-Idf (Term frequency-Inverse document frequency) 法を応用した特徴ベクトルの生成手法を提案した。そしてこの技術を自律移動車いすロボットに応用し、知能化空間における自律移動ロボットの行動獲得手段として明らかにした。



図5 自律移動車いすロボット

#### 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7件)

① Naoki Someya, Hongbo Shi and Tomoki Hamagami A new robust technique for constructing intelligent environment using video image, Journal of International Council on Electrical Engineering, 査読有, Vol.3, 2012, 187-191

② Hongbo SHI, Tomoki Hamagami, Haoyuan Xu, Machine Learning Based Autonomous Network Flow Identifying Method, Springer, Lecture Notes of the Institute for Computer Science, Social-Informatics and Telecommunications Engineering: Wireless Internet, 査読有, Vol.98, 2012, 447-457

③ Honbo Shi, Tomoki Hamagami, Haoyuan Xu, Pin Yu and Yonghe Wu A Method for Classifying Packets into Network Flows Based on GHSOM, ACM/Springer, Journal of Mobile Networks and Applications, 査読有, Vol.17, 2012, 730-739 DOI.10.1007/s11036-012-0383-1

④ 柚木翔太, 濱上知樹, 大重賢治, 川上ちひろ, 鈴木範行, ベイジアンネットワークによるコールドトリアージ判定の高精度化, 電気学会論文誌電子・情報・システム部門誌, 査読有, Vol.132, No.1, 2012, 61-67

⑤ 加藤能史, 濱上知樹, 配電系統事故復旧の困難さに応じて解空間を選択的にサンプリングする遺伝的アルゴリズム, 電気学会論文誌電子・情報・システム部門誌, 査読有, Vol.131-C, No.5, 2011, 1031-1037

⑥ 山崎惇広, 濱上知樹, 逐次的に分割された問題空間における複素強化学習, 電子情報通信学会 情報・システムソサイエティ論文誌, 査読有, Vol. J94-D, No. 5, 2011, 872-880

⑦ 史虹波, 濱上知樹, SCTP 及び MIPv6 を用いたマルチホームの分散経路制御, 電気学会論文誌電子・情報・システム部門誌, 査読有, Vol.131-C, No.4, 2011, 818-825

〔学会発表〕 (計 33 件)

① Mitsuhiro Nakamura, Tomoki Hamagami, A SOFTWARE QUALITY EVALUATION METHOD USING THE CHANGE OF SOURCE CODE METRICS, IEEE 23rd International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW), 2012 2012/11/28 Dallas, TX, USA

② Masao Murakami, Hongbo Shi and Tomoki Hamagami, Autonomous restoration method for electric power network, The International Conference on Electrical Engineering 2012 (ICEE2012) 2012/7/10 Kanazawa

③ Naoki Someya, Hongbo Shi and Tomoki Hamagami, A new robust technique for constructing intelligent environment using video image, The International Conference on Electrical Engineering 2012 (ICEE2012) 2012/7/9 Kanazawa

④ 川端啓嵩, 濱上知樹, 配送計画問題における車両組み合わせの逐次的探索法, 計測自動制御学会 知能システムシンポジウム 2013/03/14 京都

⑤ 恒川裕章, 濱上知樹, 進化プロセスからの逆強化学習, 計測自動制御学会 知能システムシンポジウム 2013/03/13 京都

⑥ 倉野博仁, 濱上知樹, 確率的な状態遷移を持つペトリネットを用いた行動コンテキストの学習, 電気学会システム研究会 2012/12/1 大阪

⑦ 史虹波, 濱上知樹, GHSOM を用いた時系列構造特徴の異常検知, 電気学会 システム研究会 2012/12/1 大阪

⑧ 横瀬賢人 濱上知樹, 決定木を用いた近傍空間内でのサポートベクタマシンによるコールトリアージ判定支援の検討, 計測自動制御学会 システム・情報部門 学術講演会 2012/11/22 名古屋

⑨ 染谷直希, 濱上知樹, 自律移動ロボットにおける動画像知能化環境の構築, 日本ロボット学会学術講演会 2012/9/17 札幌

⑩ 神由希子, 濱上知樹, 強化学習における不完全知覚検出を用いた問題空間分割, 電気学会 電子情報システム部門大会 2012/9/6 弘前

⑪ 斎藤竜矩, 濱上知樹, 動的環境におけるベ

イジアンネットワークを用いた最適解集団獲得のための遺伝的アルゴリズム, 電気学会 電子情報システム部門 2012/9/6 弘前

〔図書〕 (計 2 件)

① Takeshi Shibuya and Tomoki Hamagami, Complex-Valued Reinforcement Learning: a Context-Based Approach for POMDPs," Advances in Reinforcement Learning, Abdelhamid Mellouk (Ed.), pp. 255-274, InTech, 2011.

② Hongbo Shi, Tomoki Hamagami, Cross-Layer Routing Method for the SCTP with Multihoming MIPv6, Lecture Notes in the Institute for Computer Sciences, Social Informatics and Telecommunications Engineering, vol. 37, pp. 179-192, Springer, 2010

〔産業財産権〕

○取得状況 (計 1 件)

名称: Value function representation method of reinforcement learning and apparatus using this

発明者: Tomoki Hamagami, Takeshi Shibuya

権利者: National University Corporation Yokohama National University

種類: Patent

番号: US8175982 B2

取得年月日: 2012年5月8日

国内外の別: 外国

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 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