

令和元年8月29日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16K06197

研究課題名（和文）NUC高密度Beowulfクラスタによる量子型粒子群最適化に基づく知的制御系設計

研究課題名（英文）Intelligent Control System Design based on Quantum Particle Swarm Optimization with NUC High-Density Beowulf Cluster

研究代表者

川西 通裕（Kawanishi, Michihiro）

豊田工業大学・工学（系）研究科（研究院）・准教授

研究者番号：00283870

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、大規模な行列の固有値を並列計算できる完全なコアが高密度に集積されるNUC高密度Beowulfクラスタ計算機を活用して、量子型粒子群最適化をはじめとする分散型最適化を効率的に解くアプローチにより、未知環境に対応できる適応機構を備えた知的制御系の設計手法を開発した。特に、未知の環境において適切に動作することが求められる実用的な「人間機械システム（半自動運転、歩行アシスト装置）」、「マルチエージェントシステム（電力ネットワーク）」、「脚式ロボット」などに対して知的制御系を設計するための手法を開発し、各応用領域における手法を統一的な枠組みへと統合するための基礎的な結果を得た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

未知の状況に対して適切に動作することが求められる知的制御システムの設計はデータの学習と推定を含む複雑なアルゴリズムが必要となるため、一般に非凸問題となる。本研究では、「人間機械システム」、「マルチエージェントシステム」、「脚式ロボット」の各応用分野の問題を具体的に扱い、計算機パワー（並列計算機）と分散最適化を適用して非凸問題の解を求めるアプローチの可能性を明らかにすることができた。

今後、制御理論研究のコミュニティの中で、並列計算機と分散最適化の手法により非凸問題が実用的な精度で「解ける」との認識が定着すれば、新たな理論の創生につながる可能性がある。

研究成果の概要（英文）：In this research, we use NUC high-density Beowulf cluster computer with fully integrated dense cores capable of calculating large-scale matrix eigenvalues in parallel, and developed intelligent control system design methods with adaptive mechanisms that can cope with unknown environments by using an efficient solution approach with the cluster computer for distributed optimization including quantum particle swarm optimization. In particular, for practical "human-machine systems (semi-automatic driving, walking assist devices)", "multi-agent systems (electric power networks)", "legged robots", etc. that are required to operate properly in unknown environments, we developed methods for designing intelligent control systems and obtained basic results for integrating the method in each application domain into a unified framework.

研究分野：制御工学

キーワード：知的制御系設計 非凸最適化

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

コンピュータ単体の性能向上だけではなく、パラレルコンピューティングやグローバルコンピューティング、クラウドコンピューティングをはじめ、GPU (Graphics Processing Unit) を一般の並列計算に応用する GPGPU (General Purpose Graphic Processing Unit) 技術など、新しい計算技術の発達が著しく、従来のスーパーコンピュータによる計算機システムに替わって複数の演算ユニットとネットワークを活用した並列計算技術を科学問題に適が各分野で活発に行われており、成果が報告されている。

一方、制御理論では、コンピュータパワーを援用した線形行列不等式による凸最適化のアプローチが成功しているが、線形行列不等式などの凸最適化問題で必要十分条件を表現できない問題 (非凸問題) が未解決のまま残されている。このような問題に対してこれまで、数学的な技巧を駆使して保守性の少ない十分条件を導出し線形行列不等式などの凸問題に緩和して補償器を設計する研究が数多く行われてきたが、近年のネットワーク型並列計算技術を援用した研究はまだほとんど行われていない。最新の計算機技術を活用して莫大な計算機パワーを用いる分散最適化手法によるアプローチは、従来の凸最適化による制御系設計の欠点を補い、高度な知的制御システムを実現できる可能性を有している。

2. 研究の目的

現有する計算機システムを拡張し、最新の NUC (Next Unit of Computing) 技術を用いた高密度 Beowulf クラスタ計算機システムを構築する。GPGPU (General Purpose Graphic Processing Unit) の簡素化されたコアとは異なり、複雑な計算を並列実行できる完全なコアが高密度に集積される NUC 高密度 Beowulf クラスタの特性を活用して量子型粒子による粒子群最適化をはじめとする分散型の群知能最適化アプローチと学習に基づく制御系設計手法についてアルゴリズムの検討を行い、未知環境に対応できる適応機構を備えた知的制御系の設計手法を開発する。また実用的な「人間機械システム」、「マルチエージェントシステム (電力ネットワーク)」、「4 脚ロボット」の制御システムを設計・実装するための定式化について、人間機械システムでは人間の操作量 (発揮トルクなど) と動作意図、マルチエージェントシステム (電力ネットワーク) ではエージェント間の接続状態と外部環境、4 脚ロボットでは接地面の形状や摩擦をそれぞれ未知と考えて定式化法を導出するとともに、環境を学習して適応する制御システムを設計・実装し、提案手法の可能性を明らかにする。

3. 研究の方法

本応募研究課題の予算で導入する NUC 演算ユニットを活用した超並列計算環境を構築し、高度な適応機能を有する知的制御のためには不可欠となる非凸条件の大域的最適化と制御系設計手法について研究を進める。次の三つの点を柱として研究を実施する。

- (1) NUC 技術を活用して 100 プロセス以上で行列固有値の計算を並列に実行できる高密度なクラスタ計算機を構築して、計算機上に制御系設計 CAD を実装
 - (2) 学習と量子型粒子群最適化をはじめとする並列プロセスを活用する分散型の群知能最適化のアプローチにより、未知の環境で動作する知的制御系の設計アルゴリズムを開発
 - (3) 未知の環境で動作する「人間機械システム」、「マルチエージェントシステム (電力ネットワーク)」、「4 脚ロボット」の知的制御システムを設計し、未知環境への適応力と制御性能を検証するとともに、群知能アプローチにより統一的な設計手法を導出する可能性を検討
- また、上記(2)の設計アルゴリズムとして
- (a) 不確かさを含む多項式を扱うパラメトリックアプローチ、
 - (b) 多項式の正定性に基づく SOS (Sum-of-Squares) アプローチ、
 - (c) 粒子群最適化に基づくアプローチ、
 - (d) ADMM (Alternating Direction Multiplier Method) について考え、これら(a)~(d)の各アプローチおよびアルゴリズムに基づき、並列計算の技術を活用できる新しい制御系の設計手法を開発する。

4. 研究成果

(1) 人間機械システム

(a) 半自動運転

粒子群最適化による制御系設計アルゴリズムを用いて、高齢者を対象とした操舵サポートシステムについて制御系設計手法を提案した。人が速度を制御し、自動運転システムがステアリングのみを操舵することで、的の軌道に追従する半自動運転は、人間と機械が協調する人間機械システムのひとつであり、システムの入力が一つしかないため、劣駆動システムとなり、非ホロノミック制約もあることから、困難な制御対象となる。この問題に対して、時間スケーリングとフラットネス (Flatness) を用いることで線形なシステムへと近似を用いることなく厳密に変換し、操舵角制限を満たすゲインを粒子群最適化によって求める知的制御系の設計手法を提案し、実機実験によって有効性を示した。

(b) 歩行アシスト装置

歩行アシスト装置を使用するリハビリテーションの効率を上げるために、人の発揮力と動作意図を推定して、必要最小限の力をアシストする AAN (Assist as Needed) 制御の手法を提案した。シャローなニューラルネットワークを繰り返しアルゴリズム

ムにより学習することで未知パラメータを動的に推定し、また射影関数を用いて構成するリアプノフ関数により制御システムの大域的な安定性を維持する制御理論を導出し、実機実験により AAAN 制御の有効性を証明した。

(2) マルチエージェントシステム

IoT 技術とマルチエージェント制御理論による電力ネットワークの高効率分散制御拡張ラグランジュ乗数法の一つであり、解析的な凸最適化アルゴリズムとして知られている ADMM(Alternative Direction Multiplier Method)とマルチエージェントシステムの合意制御理論を用いて分散型 ADMM アルゴリズムを開発し、スマートメーターなど IoT 技術を活用する電力ネットワーク制御へ応用して以下の(1)~(3)について高効率な分散制御を実現した。

(a) リアルタイムプライシングとデマンドレスポンス

電力供給者・需要家の利益最大化のため、社会厚生関数(Social Welfare Function)を導入し、利益最大化を達成するリアルタイムプライシングアルゴリズムを開発した。再生可能エネルギーを入力信号としたデマンドレスポンスにより電力需給最適化を実現し分散型 ADMM をパワーグリッドのエコノミックディスパッチ問題に応用することで、常にエネルギーバランスを満たしつつ、極めて早い収束速度で大域的な最適解が得られることを示した。

(b) 熱電併給(CHP: Combined Heat and Power)システムの協調制御

燃料電池は出力電力に対して発電効率が非線形な特性となるため従来の ADMM 凸最適化手法では厳密に扱うことができない。本研究では新たに効率マッチングの考え方を導入し、効率マッチングを実現する逐次最適化アルゴリズムを開発することで、非線形な発電効率に対応できる新たな分散型 ADMM アルゴリズムを開発した。実機データから構築した精密な CHP システムモデルに基づいた協調制御のシミュレーションにより、分散アルゴリズムが速やかに収束し、高い最適化効率を得られることを示した。

(c) IoT 通信ネットワークにおける不確かさ(時間遅れ,飽和)を考慮したロバスト制御

IoT 通信ネットワークを活用して電力ネットワーク,無線センサネットワーク,交通網の制御を行う際,局所的なエージェント間の協調行動によって,大域的な目標を達成できるか否かを検証するコンセンサス制御問題が重要となる。本研究では, IoT 通信ネットワークにおいて時間遅れや飽和などの不確かさが存在する制約付きコンセンサス問題を,グラフ構造のエッジダイナミクスを用いて冗長性のない低次元なマルチエージェントシステムへと変換し,これを静的な非線形要素を含むルーリエ・システムのネットワークとして表現することでリアプノフ関数を構築し,従来は出来なかった大域的に指数オーダーの収束性を達成するロバストなコンセンサス制御を実現した。

(3) 脚式ロボット

脚式ロボットの制御においては,着地時の衝撃緩和が重要な要素となる。また地面の状況が未知であり,摩擦や突起など,種々の外乱が存在するため,これらに対応できるロバスト性,環境に適応できるインテリジェンスが必須となる。このような問題に対して,ネコ型 4 脚ロボット(RoboCat-1)の走行制御について,未知の不整地に対する走行性能を向上させるため,連続変数を扱うことができる actor-critic 強化学習によって未知の走行パラメータを推定し,推定器をマルチエージェントの構成とすることでアルゴリズムの収束性を改善した床反力センサに基づくアクティブコンプライアンス制御手法を提案し,目標とする歩容への追従性能と衝撃緩和性能を両立できる知的制御系設計手法を構築した。また実験により提案手法の有効性を検証した。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計 11 件)

Tanagorn Jennawasin, Michihiro Kawanishi, Tatsuo Narikiyo, Banjerdpongchai David, Iterative LMI Approach to Robust State-feedback Control of Polynomial Systems with Bounded Actuators, International Journal of Control, Automation and Systems, 査読有, Vol.17, No.4, pp.847-856, 2019
DOI: 10.1007/s12555-018-0292-6

Hamed Jabbari Asl, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Bounded-Input Prescribed Performance Control of Uncertain Euler-Lagrange Systems, IET Control Theory & Applications, 査読有, Vol.13, No.1, pp.17-26, 2019
DOI: 10.1049/iet-cta.2018.5480

Somar Boubou, Hamed Jabbari Asl, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Real-time Recognition and Pursuit in Robots Based on 3D Depth Data, Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol.93, pp.584-600, 2019
DOI: 10.1007/s10846-017-0769-1

Hamed Jabbari Asl, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Neural network-based bounded

control of robotic exoskeletons without velocity measurements, *Control Engineering Practice*, 査読有, Vol.80, pp.94-104, 2018
DOI: 10.1016/j.conengprac.2018.08.005

Huynh Ngoc Tran, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Satoshi Kikuchi, Shozo Takaba, Whole-day Optimal Operation of Multiple Combined Heat and Power Systems by Alternating Direction Method of Multipliers and Consensus Theory, *Energy Conversion and Management*, 査読有, Vol.174, pp.475-488, 2018
DOI: 10.1016/j.enconman.2018.08.046

Dinh Hoa Nguyen, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Optimal Demand Response and Real-time Pricing by a Sequential Distributed Consensus-based ADMM Approach, *IEEE Transactions on Smart Grid*, 査読有, Vol.9, No.5, pp.4964-4974, 2018
DOI: 10.1109/TSG.2017.2676179

Dinh Hoa Nguyen, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Robust Consensus Analysis and Design under Relative State Constraints or Uncertainties, *IEEE Transactions on Automatic Control*, 査読有, Vol.63, No.6, pp.1784-1790, 2018
DOI: 10.1109/TAC.2017.2752843

Hamed Jabbari Asl, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Adaptive Neural Network-based Saturated Control of Robotic Exoskeletons, *Nonlinear Dynamics*, 査読有, Vol.94, No.1, pp.123-139, 2018
DOI: 10.1007/s11071-018-4348-1

成清辰生, 松本 大河, Barkan Ugurlu, 川西 通裕, 強化学習を用いてダンパ係数を指定した 4 脚ロボットのコンプライアンス制御, *日本ロボット学会誌*, 査読有, Vol.35, No.5, pp.414-423, 2017
DOI: 10.7210/jrsj.35.414

Aneesh N. Chand, Michihiro Kawanishi, Tatsuo Narikiyo, Adaptive Pole Placement Pitch Angle Control of a Flapping-Wing Flying Robot, *Advanced Robotics*, 査読有, Vol.30, No.16, pp.1039-1049, 2016
DOI: 10.1080/01691864.2016.1196609

Michihiro Kawanishi, Yuta Tsuge, Shi-Jia Pei, Tatsuo Narikiyo, Feedback Control for Steering Support System based on Flatness and Particle Swarm Optimization, *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 査読有, Vol.10, No.2, pp.1-11, 2016
DOI: 10.1299/jamdsm.2016jamdsm0023

[学会発表](計 21 件)

Hamed Jabbariasl, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, An Assist-as-Needed Velocity Field Control Scheme for Robotic Exoskeletons, *International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS)*, pp.3322-3327, 2018

Asl Hamed Jabbari, 成清辰生, Tsao Po Yu, 川西通裕, 歩容変化に適応する下肢パワーアシストロボットの速度場制御, *自動制御連合講演会*, 2018

Takumi Zaitzu, Ngoc Huynh Tran, Michihiro Kawanishi, Tatsuo Narikiyo, Advanced SVR control by PSO to handle over-voltage in distribution system, *自動制御連合講演会*, 2018

成清辰生, 山藤祐希, ASL Hamed Jabbari, 川西通裕, 速度場制御を用いたパワーアシストロボットの AAN 制御, *計測自動制御学会ライフエンジニアリング部門シンポジウム論文集*, 2018

Huynh Ngoc Tran, Shinichi Tanabe, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Akinori Sato, Operation Optimization Method of Microgrid Using Multi-Agent Control, *SICE 2018 Annual Conference*, 2018

財津太功実, NGOC Tran Huynh, 成清辰夫, 川西通裕, 分散型制御器を用いた配電システムの安定化, *電気学会電力・エネルギー部門大会論文集*, 2018

Hamed Jabbari Asl, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Prescribed Performance Velocity Field Control of Robotic Exoskeletons with Neural Network, *Proceedings of the 2017 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics*, pp.2704-2709, 2017

Dinh Hoa Nguyen, Huynh Ngoc Tran, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, A Lyapunov approach for transient stability analysis of droop inverter-based mesh microgrids using line-based model, *2017 IEEE Conference on Control Technology and Applications (CCTA)*, pp.1655-1660, 2017

Hamed Jabbari Asl, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Neural network velocity field control of robotic exoskeletons with bounded input, *2017 IEEE International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics*, pp.1363-1368, 2017

Somar Boubou, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Object recognition from 3D depth data with Extreme Learning Machine and Local Receptive Field, *2017 IEEE International*

- Conference on Advanced Intelligent Mechatronics, pp.394-399, 2017
- Dinh Hoa Nguyen, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Low-rank Distributed Consensus Controller Design for Linear Multi-Agent Systems under Randomly Switching Directed Topologies and Model Uncertainties, 20th IFAC World Congress, pp.2465-2470, 2017
- Somar Boubou, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Adaptive filter for denoising 3D data captured by depth sensors, 2017 3DTV Conference: The True Vision - Capture, Transmission and Display of 3D Video (3DTV-CON), pp.11-4, 2017
- Hamed Jabbari Asl, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, An assist-as-needed control scheme for robot-assisted rehabilitation, 2017 American Control Conference (ACC), pp.198-203, 2017
- Dinh Hoa Nguyen, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Demand response collaborative management by a distributed alternating direction method of multipliers, 2016 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia (ISGT-Asia), pp.759-764, 2016
- Dinh Hoa Nguyen, Ngoc Huynh Tran, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Stability certificate for transmission power grids under network changes, 2016 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), pp.294-299, 2016
- Dinh Hoa Nguyen, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Dynamic environmental economic dispatch: A distributed solution based on an alternating direction method of multipliers, 2016 IEEE International Conference on Sustainable Energy Technologies (ICSET), pp.1-6, 2016
- Dinh Hoa Nguyen, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, A distributed optimal power dispatch control approach for environment-friendly power grids, 2016 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE), pp.258-263, 2016
- Dinh Hoa Nguyen, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, On Consensus of Nonlinear Multi-Agent Systems with Output Constraints, 6th IFAC Workshop on Distributed Estimation and Control in Networked Systems (NECSYS), pp.103-108, 2016
- Dinh Hoa Nguyen, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Multi-agent system consensus under input and state constraints, 2016 European Control Conference (ECC), pp.537-542, 2016
- Aneesh N. Chand, Michihiro Kawanishi, Tatsuo Narikiyo, Non-linear model-free control of flapping wing flying robot using iPID, 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), pp.2930-2937, 2016
- ⑳ Somar Boubou, Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Differential Histogram of Normal Vectors for Object Recognition with Depth Sensors, 2016 International Conference on Autonomous Robot Systems and Competitions (ICARSC), pp.162-167, 2016

6 . 研究組織

(1)研究分担者
なし

(2)研究協力者
なし

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。