

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 24 日現在

機関番号：33924

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560304

研究課題名(和文) GPGPUクラスタによる超並列最適化を用いた知的制御系設計法の開発

研究課題名(英文) Intelligent control system design based on hyper parallel computing with GPGPU cluster computer

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) 4,400,000円、(間接経費) 1,320,000円

研究成果の概要(和文)：GPGPUユニットを活用した超並列計算による知的制御系をシステムを構築するため、(1)不確かさを含む多項式によるパラメトリックアプローチ、(2)多項式の正定性に基づくSOS(Sum-of-Square)最適化、(3)双線形行列不等式による最適化、(4)非同期型粒子群最適化、の各アプローチについて研究を行い研究成果を得た。また制御対象としては、(a)モバイルマニピュレーター、(b)操舵系の自律制御、(c)跳躍ロボット、(d)装着型パワーアシスト、(e)受動歩行、について提案する制御手法を適用し、制御手法の有効性を証明した。

研究成果の概要(英文)：To develop efficient controller design methods using hyper parallel computation with GPGPU cluster computer we studied design methods based on (1) Parametric approach for uncertain polynomials, (2) SOS(Sum-of-Square) approach, (3) Bilinear matrix inequality optimization, (4) Asynchronous particle swarm optimization. Many research results have been obtained with these intensive studies. To evaluate the effectiveness of the proposed methods, we implemented the proposed control system on (a) Mobile manipulator, (b) Steering support system, (c) Jumping robot, (d) Wearable power assist system, and (e) Passive walking.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学/知能機械学・機械システム

キーワード：超並列計算 GPGPUクラスタ パラメトリックアプローチ Sum-of-Square 非同期型粒子群最適化 確率モデル遺伝的アルゴリズム

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、新しいネットワーク型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用する試み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計画法で必要十分条件を表現できない問題 (難最適性非凸問題) 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大域的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 104 コアの Beowulf クラスタ計算機システムを拡張し、最新の GPGPU の技術を用いて 2 桁多いプロセスを並列に実行できる 10080 コアからなる超並列クラスタ計算機システムを構築する。超並列計算を用いた数値最適化アプローチ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、開発した設計法を用いてネコ型ロボット、モバイルマニピュレータ、跳躍ロボットの制御システムを設計・実装し、提案手法の有用性を検証する。

3. 研究の方法

本応募研究課題の予算で導入する GPGPU 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) GPGPU 技術を活用して 1 万コアを超えるフォワードコンパチビリティに優れた Beowulf 型の超並列計算機 (GPGPU クラスタ) を構築して超並列計算機システムの上で動作する制御系設計 CAD を実装
- (2) プロセス数 1 万超の並列化が可能な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「ネコ型 4 脚ロボット」、「モバイルマニピュレータ」、「跳躍ロボット」の適応知的制御システムを設計・実装し、未知環境への適応力と制御性能を検証

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) 双線形行列不等式 BMI の並列最適化アルゴリズム、(d) 粒子群最適化に基づくアプローチ、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、超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) モバイルマニピュレータの位置と力のロバスト適応制御について、慣性モーメントなどのダイナミクスに関する不確かさだけでなく、未知の作業領域やベース車輪の摩擦や減圧による半径の変化など、実作業空間における幾何学的な不確かさも考慮したロバスト適応制御手法を提案し、安定性を証明するとともに実機実験により有効性を証明した。

(2) Stability Feeler によるロバスト性解析については、まず実数 μ 解析について、係数に不確かさを有する区間多項式の安定領域をもれなく解析できる Stability Feeler の手法を援用し、また超並列計算に対応できるよう、変数領域を部分領域に分割して安定領域を拡張しながら最大化する「部分領域拡張法」を提案し、実数 μ 解析における上下界値の保守性を低減化する手法を提案し、有効性を検証した。

次に、上記で考えた提案手法を区間行列の安定領域解析、および実数構造不確かさのロバスト D 安定解析に応用することで、実システムに対する有効なアプローチとなり、また超並列計算の技術を有効に活用できるロバスト解析手法を開発した。

(3) SOS アプローチによる制御系設計については、2 次評価関数として記述できる制御性能について、その性能限界を内点法による凸最適化を用いて解析する手法を提案した。つぎに実システムにおけるアクチュエータの制約である入力制限を考慮した非線形システムの安定化手法を提案し、ロバスト D 安定とする場合も含め、提案手法の有効性を検証した。

ここで活用した SOS 手法について、従来はパラメータの次数を高次元化することで保守性を低減していたが、新たに部分領域に分割した複数のサブ問題の集合へと緩和して保守性を低減化する手法を提案したため、超並列計算を用いた解析・設計が可能となった。

(4) 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、Flatness と時間軸スケーリングに基づく線形化手法を適用し、さらに量子粒子群最適化によるゲイン調整を用いた制御系設計手法を提案した。またより複雑なシステムにも対応させるため、非線形デスクリプタシステムとして制御対象を記述することを提案し、非同期型の粒子群最適化手法を用いて制御系設計を行う手法を提案した。この非同期型の粒子群最適化手法は、GPGPU クラスタによる超並列計算に適しており、アルゴリズムの並列化におけるロス を最小化でき、最大効率で計算を実行できるため、今後より複雑な対象への応用が期待できる。

(5) ネコ型 4 脚ロボット (RoboCat-1) の走行制御について、システムを構築するとともに実時間トロット走行制御が可能な、参照軌道生成法を提案した。また、未知の不整地に対する走行性能を向上させるため、脚部の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、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。

(6) 多数プロセスによる超並列計算に適した DPMBGA (Distributed Probabilistic Model Building Genetic Algorithm) による固定構造 H 制御系の設計手法を提案した。提案手法は、各 Gene の計算を並列に行えるため、超並列化に非常に適した手法である。実際の制御系ではモーションドライバなどハードウェアの制約から制御器構造が制約されるため固定構造の制御系を設計する必要があるが、このような現実の制御系設計に適用可能なロバスト制御手法であり、また解決困難な問題としても知られている固定構造 H 制御系の設計手法について、この DPMBGA の手法に基づく新しい制御系設計手法を提案し、ベンチマーク問題を用いて、有効性を証明した。

(7) 跳躍ロボットの制御においては、空中での姿勢制御と、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、環境に適應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、追従性と外乱抑制を両立できるアクティブコンプライアンス手法を提案し、またロバストな連続跳躍が可能な軌道生成手法を構築した。

(8) 強化学習による非線形制御手法について研究を行い、リアプノフ関数を報酬に反映させる制御系設計手法を提案した。既知部分については多項式モデルとしてモデル化し、

平衡点まわりの DOA (Domain of Attraction) を最大かするとともに、この DOA に状態を誘導する強化学習に基づくコントローラの設計手法を提案した。

(9) パワーアシストの制御においては、装着者の意図をフェーズシーケンスとサポートベクターマシン (SVM) に基づいて判定する手法を提案し、アシスト率を上げてもぎくしゃくせず、スムーズなサポートが可能なインテリジェント制御システムの構築方法を提案した。またサブシステムとしては、装着者の意図と外乱抑制を両立するため、ZMP (Zero Moment Point) に基づくアクティブコンプライアンス手法を開発した。提案した手法は、実機実験を複数の被験者に対しておこない、有効性を確認した。

(10) 受動歩行の安定性を最大化する足裏形状最適化手法を提案した。ロボットにおける歩行において、受動歩行はエネルギーを最小化する自然な歩容を実現するために重要な技術要素であるため、本研究では、並列計算を考慮した遺伝的アルゴリズムを用いて、受動歩行の安定性を最大化する足裏形状の設計を行い、実機実験により有効性を確認した。ここで得た情報は、4 脚ロボットおよび装着型パワーアシストに展開することが可能であり、未知環境に対応できるロボット走行を実現する制御システムを実現するために重要な情報を得ることができた。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 19 件)

Tadasuke Matsuda, Michihiro Kawanishi, Tatsuo Narikiyo, Robust D-stability Analysis of Linear Systems With Real Structured Uncertainties by the Stability Feeler, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol.4, No. 4, 2014, DOI: 10.9746

福島 俊彦, 兵頭 和幸, 川西 通裕, 成清辰生, 受動歩行機の足裏形状最適化による歩行安定化, 計測自動制御学会論文集, 査読有, Vol. 50, No. 1, pp51-57, 2014, DOI: 10.9746

松田忠典・川西通裕・成清辰生, 一般化 Stability Feeler による複数の不確かなパラメータを含む対称行列安定区間導出の新手法, 電気学会論文誌 C, 査読有, Vol. 133, No. 6, pp.1109-1113, 2013, DOI:10.1541

Barkan Ugurlu, Kana Kotaka, Michihiro Kawanishi, Tatsuo Narikiyo, Actively Compliant Locomotion Control on Rough Terrain: Cyclic Jumping and Trotting Experiments on a Stiff-By-Nature Quadruped, Proceedings of the IEEE

International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Karlsruhe, Germany, 査読有, pp.3298-3305, 2013
Masatoshi Kimura, Michihiro Kawanishi, Tatsuo Narikiyo, Motion Intention Recognition for Wearable Power Assist System using Multi-Class SVM and Kinematic Model, Proceedings of the 1st International Conference on Human-Agent Interaction, 査読有, -p21, 2013
Yuta Tsuge, Tatsuo Narikiyo and Michihiro Kawanishi, Controller design for nonlinear descriptor systems using particle swarm optimization, Proceedings of the IASTED International Conference Intelligent Systems and Control, Marina del Rey, USA, 査読有, pp.211-216, 2013
Barkan Ugurlu, Masayoshi Nishimura, Kazuyuki Hyodo, Michihiro Kawanishi, and Tatsuo Narikiyo, A Framework for Sensorless Torque Estimation and Control in Wearable Exoskeletons, Proceedings of the 12th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 査読有, 2012
Yuta Tsuge, Kazuyuki Hyodo, Tatsuo Narikiyo, and Michihiro Kawanishi, Tanagorn Jennawasin, Nonlinear Control of Partially Unknown Systems Based on Reinforcement Learning and Polynomial Representation, Proceedings of the 14th IASTED International Conference on Control and Applications, 査読有, ISBN: 978-0-88986-922-6, 2012
Barkan Ugurlu, Takao Kawasaki, Michihiro Kawanishi, and Tatsuo Narikiyo, Continuous and Dynamically Equilibrated One-Legged Running Experiments: Motion Generation and Indirect Force Feedback Control, Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, 査読有, pp.1846-1852, 2012
Michihiro Kawanishi, Tatsuo Narikiyo, Shi-Jia Pei, and Hayato Kubota, Feedback Control for Steering Support System Based on Flatness and Quantum Particle Swarm Optimization, Proceedings of the 51st IEEE Conference on Decision and Control, 査読有, pp.4372-4377, 2012
Kana Kotaka, Barkan Ugurlu, Michihiro Kawanishi, and Tatsuo Narikiyo, Prototype Development and Real-time Trot-Running Implementation of a Quadruped Robot: RoboCat-1, Proceedings of the IEEE International

Conference on Mechatronics, 査読有, pp.604-609, 2012
Tatsuo Narikiyo, Michihiro Kawanishi, Tomohito Mizuno, and Yasuo Hanada, Robust Adaptive Position/Force Control of Mobile Manipulators, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 4, pp.305-314, 2011
松田忠典, 川西通裕, T.Jennawasin, 成清辰生, Stability Feeler による実数 μ 解析 部分領域拡張法による上下界値の保守性低減化, システム制御情報学会論文集, 査読有, Vol. 24, pp.211-222, 2011
T.Jennawasin, M.Kawanishi and T.Narikiyo, Performance Bounds for Optimal Systems: A Convex Optimization Approach, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, 査読有, Vol. 4, pp.423-429, 2011
Tanagorn Jennawasin, Michihiro Kawanishi, and Tatsuo Narikiyo, Optimal Control of Polynomial Systems with Performance Bounds: A Convex Optimization Approach, Proc. of the 2011 American Control Conference, 査読有, pp.281-286, 2011
Michihiro Kawanishi, Tomohiro Kaneko, Tatsuo Narikiyo, Nathan Srebro, Fixed-structure H controller design based on Distributed Probabilistic Model-Building Genetic Algorithm, Proceedings of the IASTED Intelligent Systems and Control, 査読有, pp.127-132, 2011
Tanagorn Jennawasin, Michihiro Kawanishi, and Tatsuo Narikiyo, Stabilization of Nonlinear Systems with Bounded Actuators using Convex Optimization, Proceedings of the 18th IFAC World Congress, 査読有, pp.6745-6750, 2011
Tadasuke Matsuda, Michihiro Kawanishi, and Tatsuo Narikiyo, Complete Stability Intervals of Matrices with Multiple Uncertain Parameters; Generalization of the Stability Feeler, Proceedings of the 18th IFAC World Congress, 査読有, pp.11368-11373, 2011
T.Jennawasin, M.Kawanishi and T.Narikiyo, Robust D-Stability Analysis via Polynomial Positivity, Proceedings of the 8th Asian Control Conference, 査読有, pp.1476-1480, 2011

[学会発表](計 11 件)

諸橋草太, 川西通裕, 成清辰生, FRIT のオンライン更新則の一提案, 計測自動制御学会第 13 回制御部門大会, 2013 年 3 月 5 日, 福岡県福岡市(アクロス福岡)

Y. Tsuge, T. Jennawasin, T. Narikiyo, and M. Kawanishi, Nonlinear Control of Partially Unknown Systems based on Reinforcement Learning and Polynomial Representation, 計測自動制御学会第 13 回制御部門大会, 2013 年 3 月 5 日, 福岡県福岡市 (アクロス福岡)

小高加菜, ウグルバルカン, 川西通裕, 成清辰生, AC サーボ駆動による 4 脚ロボット (RoboCat) の連続跳躍運動制御, 日本ロボット学会第 30 回記念学術講演会, 2012 年 9 月 17 日, 北海道札幌市 (札幌コンベンションセンター)

兵藤和幸, 嵯義昭, 成清辰生, 川西通裕, 受動歩行を用いた歩行機コンテストによる教育, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2012 年 5 月 28 日, 静岡県浜松市

小高加菜, ウグルバルカン, 川西通裕, 成清辰生, 4 脚ロボットの基礎研究, 日本機械学会ロボティクス・メカトロニクス講演会, 2012 年 5 月 28 日, 静岡県浜松市

河崎孝夫, ウグルバルカン, 兵頭和幸, 川西通裕, 成清辰生, 一脚ロボットに対する接地 / 浮遊相の連続切り替え運動制御, 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 2012 年 3 月 15 日, 奈良県文化会館

金子智博, 川西通裕, 成清辰生, 分散確率モデル遺伝的アルゴリズムによる固定構造 H 補償器の設計, 第 12 回計測自動制御学会制御部門大会, 2012 年 3 月 15 日, 奈良県文化会館

兵頭和幸, 成清辰生, 川西通裕, 受動歩行におけるモーションキャプチャを用いた運動分析, 第 12 回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2011 年 12 月 23 日, 京都大学

柘植雄太, 兵頭和幸, タナゴーン ジェンナワシン, 成清辰生, 川西通裕, 強化学習を用いた倒立振子の振り上げ制御, 第 54 回自動制御連合講演会, 2011 年 11 月 20 日, 豊橋科学技術大学

川西通裕, 成清辰生, 中田皓史, サポートベクターマシンを用いた外骨格型パワーアシスト装置の動作推定, 第 54 回自動制御連合講演会, 2011 年 11 月 20 日, 豊橋技術科学大学

成清辰生, 川西通裕, 水野智仁, 花田康夫, モバイルマニピュレータの位置と力のハイブリッド制御 - 理論および実験 -, 第 55 回システム制御情報学会研究発表講演会, 2011 年 5 月 17 日, 大阪大学コンベンションセンター

6. 研究組織

(1) 研究代表者

川西 通裕 (KAWANISHI, Michihiro)

豊田工業大学・工学系研究科・准教授

研究者番号: 0028387

[図書](計 1 件)

Tatsuo Narikiyo and Michihiro Kawanishi, In-Tech, Recent Advances in Robust Control - Theory and Applications in Robotics and Electromechanics, pp.117-138, 2011