

機関番号：15401

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2008 ~ 2010

課題番号：20500014

研究課題名 (和文) 雑音を伴う大規模システムに対する確率ナッシュ均衡論の構築と実装

研究課題名 (英文) Construction and Implementation of Stochastic Nash Equilibrium for Large-Scale Systems with Noise

研究代表者

向谷 博明 (MUKAIDANI HIROAKI)

広島大学・大学院教育学研究科・准教授

研究者番号：70305788

研究成果の概要 (和文)：

本研究では、大規模システム内に不確定要素を含むナッシュ均衡問題を扱った。具体的には、不確定要素を伊藤の確率微分方程式で表現することによって、確率ナッシュ均衡を得るための条件並びに戦略組を求めるための数値計算アルゴリズムの導出を行った。従来の結果と異なり、モデル化誤差や環境変動による不確定要素が存在しても、ナッシュ均衡戦略が構築可能となった。さらに、シミュレーションによって提案手法の有効性を確認した。

研究成果の概要 (英文)：

In this study, the Nash equilibrium problem for a class of large-scale uncertain systems has been addressed. After describing the uncertainties by means of Ito differential equation, in order to attain the stochastic Nash equilibrium and to obtain the strategy set some conditions and numerical algorithms have been established. As compared with the existing results, even if there exist the modeling errors and the uncertainty due to the variation of environment, it has been shown that the Nash equilibrium strategy can be designed. Moreover, the proposed methodology has been confirmed via the numerical simulation.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2009年度	900,000	270,000	1,170,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,800,000	840,000	3,640,000

研究分野：情報数理

科研費の分科・細目：情報学・情報学基礎

キーワード：ナッシュ均衡, 確率微分方程式, リカッチ方程式

1. 研究開始当初の背景

ジョン・ナッシュ (John F. Nash, 1928-) は「ゲーム理論」の進展に革命的貢献をしたとして 1994 年にノーベル経済学賞を受賞した。彼が考案したナッシュゲーム理論は、非協力ゲームにおける「均衡解」を与える。その結果、「個々が自己の利益を追求するあまり、全体の利益が促進さ

れない」といった危機的状況を改善することが可能となる。ナッシュ均衡論の応用範囲は、経済学・工学・情報科学・政治学など多岐に渡っており、応用例として「独占禁止法」が有名である。

一方、自律分散制御によりレスキューロボットの一種である多連結ヘビ型ロボットが、瓦礫などの悪路を進行する場合、システムダイナミクスの

モデル化誤差、環境変動による外乱が問題となることが知られている。すなわち、モデル化誤差により所望の制御性能を達成しない。あるいは、予期せぬ悪路から受ける振動によってシステムの安定性が保証されない場合が存在する。その結果、既存の分散制御では、ロボットの動きを十分に制御できず、目標位置に到達しないことが問題視されている。また、必要以上の消費電力を消費し、最悪、自律移動不能といった危機的状況を招く恐れがある。

現在、ナッシュ均衡論に基づく戦略は、消費コスト削減や不確定要素に対して頑強(ロバスト)である等、システム全体の利益促進に関して非常に有用であることが最近の研究で少しずつ明らかになってきた。その一方で、不確定要素や環境変動を考慮した場合でも、ナッシュ均衡状態を得ることが、実用上、非常に大きな課題となっている。

2. 研究の目的

本研究では、システムに含まれる不確定要素をウィナー過程によって記述し、環境変動を外乱として捉える。この確率システムに対して、新規に確率ナッシュ均衡戦略を考える。本研究では、大規模確率システムに対して、不確定要素および環境変動による制御性能の劣化を回避するために、動的ゲーム理論における確率ナッシュ均衡解によるロバスト知的分散型制御アルゴリズムを開発する。さらに、大規模なシステムモデルの変動をマルコフジャンプシステムで表現することによって、確率システムのためのナッシュゲームも考える。特に、従来の結果と異なり、環境変動による不確定要素を、マルコフジャンプ確率システムに置き換えることによって、ナッシュゲーム問題が適用できるシステムのクラスを格段に拡張できることを示す。具体的には、マルコフジャンプ確率システムのためのナッシュ均衡を定義し、戦略対が存在するための必要十分条件を既存の結果を応用して導出する。次に、弱結合大規模確率システムへの応用を考える。その結果、より一般的な結果を与えることが可能である。その他の特徴として、ナッシュ均衡戦略を求めるために連立型確率代数リカッチ方程式を解くための数値計算アルゴリズムを線形行列不等式の観点から検討する。

3. 研究の方法

従来より、動的ゲーム問題は、数多くの研究結果が存在し、それらの一部は新現代ロバスト制御問題等に応用された。しかし、これら一連の結果では、パラメータ変動やモデル化誤差等の不確定要素に対して画一的な理論がないことが欠点となっている。その理由は、不確定要素が

存在するため、評価関数の具体的な値が計算できず、戦略集合が定義できないことに由来する。そこで、このような問題に対して、二つのアプローチを導入する。一つは、不確定要素を伊藤の確率微分方程式に基づくウィナー過程で表現される外乱と考える手法である。確率微分方程式を導入することによって評価関数が計算でき、その結果、戦略対を得られることが期待できる。もう一つは、パレート最適性の導入や、パレート最適性を軸に二次コスト保証制御と混合した戦略に置き換える手法である。さらに、大幅な環境変動によって、システムパラメータが劇的に変化する、あるいは不規則なモード遷移を伴うシステムを扱う手法として、マルコフジャンプシステムによる解析手法を導入する。マルコフジャンプシステムの特徴は、システムの故障や環境変動に伴って、システムのパラメータが変化したり、あるいは構造そのものが変化するという場合に、制御系設計が行える点で大変有用なシステム表現であると考えられる。実際、通信システム、航空機システム等に多くの実績が報告されている。以上の確率システム表現をもとに、不確定要素や環境変動に頑強な確率ナッシュ均衡戦略を導出する。さらに、大規模連立型確率非線形行列方程式を解くための数値計算アルゴリズムの開発に着手する。

続いて、大規模計算を実行するために、Message Passing Interface (MPI)を基盤とした6台規模のP.C.クラスタを構築する。また、P.C.上でのメモリ管理が設計者によって自由に調整できるように、オペレーティングシステムのチューニングを行う。一方、LANの通信速度によるボトルネックを解決するため、ギガビットのLANの再構築を行う。その後、構築されたP.C.クラスタ上で動作させるためのアプリケーションソフトの開発を手がける。出来上がったP.C.クラスタの性能評価を行うため、システムテストを繰返し、実用に耐えうる仕様に引き上げる。

次に、個別に開発してきた各サブシステム部を統合し、全体的なシステムの構築を行う。具体的には、P.C.クラスタにグラフィックシミュレータをモジュールとしてリンクさせ、確率ナッシュゲーム理論による均衡アルゴリズムを実装する。そして、システムが良好に機能するように各サブシステムの調整および改善を行う。また、P.C.クラスタの性能を安定化させ、十分な計算能力を獲得する。最終的に、完成したシステムによって、シミュレーションならびに数値実験によりデータを獲得し、得られた確率分散型均衡戦略アルゴリズムの有効性を評価・検討する。

4. 研究成果

本研究では、まず、マルチプレーヤを含む伊

藤確率微分方程式によって記述される不確定システムに対して、状態フィードバックによるコスト保証制御問題を扱った。主な貢献は、確率的な不確定要素をウィナー過程に置き換えることによって、状態に依存するノイズとして伊藤確率微分方程式で表現することにより、従来研究では定義できなかった確定的不確定要素を含むナッシュゲーム問題をパレート最適問題へ読替えた点である。以上により、モデル化誤差による不確定要素および確率的な不確定要素に対して、ロバストなパレート最適を実現する制御が実現可能となった。具体的には、従来から報告されているコスト保証制御問題の結果を利用して、平均二乗安定を保証するパレート最適戦略を得るための確率リカッチ不等式を導出した。次に、確率パレート最適問題の戦略組を得るために、Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 条件を利用して最適性の必要条件を新規に導出した。さらに、得られた連立型確率リカッチ方程式を解くために、ニュートン法の適用を行った。結果として、得られたアルゴリズムは局所二次収束を達成するため、必要な解を高速に求めることができる。また、同様な問題に対して、線形行列不等式による定式化も行った。線形行列不等式による解法によって、低次元でかつ既存の数値計算パッケージを利用して手軽にパレート準最適解を得ることが可能となった。最後に、拡張として、静的出力フィードバックによる問題も考察した。静的出力フィードバックによって、一部の状態が観測できない場合にも、戦略集合を得ることが可能となった。本来、確定的不確かさをもつ確率システムに対して、ナッシュ均衡が定義できなかった問題が、パレート最適問題及びコスト保証制御によって同様な効用をもたらす制御戦略が構築できるようになったことは、国内外において、同様の結果が公表されていない点で大変意義深い結果であると考えられる。

続いて、離散時間弱結合大規模確率システムに対して、確率 LQ 最適制御問題、確率パレート最適制御問題、確率ナッシュ均衡問題の三つの確率制御問題を扱った。考慮された全ての問題において、対象となるシステムの係数行列に含まれるノルム有界型時変不確定要素を確率過程で表現される確率的な不確定要素に変換し、様々な問題を考察した。その結果、従来と比較して、ノルム有界型時変不確定要素から導かれる状態及び制御入力に依存するノイズに対し、ロバストな制御性能を発揮できる。本研究の主な貢献として、結合パラメータに依存しない近似確率分散戦略の提案があげられる。提案された近似確率分散戦略は、弱結合パラメータが未知であっても設計できる。また、弱結合パラメータが十分小さければ、近似確率分散戦略は、a

準ナッシュ均衡状態を満足するだけでなく確率パレート準最適性を満足することを新規に示した。その結果、各サブシステムでは、確率 LQ 最適制御問題を解くだけで良く、設計された近似確率分散戦略をフィードバックすれば、全体のコストの総和は準最適性を保証し、非協力ゲームにおける準ナッシュ均衡状態に遷移させることが可能となった。これらの性質は、実システムの適用を視野に入れた場合、設計が簡略かつ多目的の制御を実現できるという意味で非常に有用な結果であると考えられる。

最後に、システムパラメータが劇的に変化するシステムを扱う手法として、先進的な試みとして、マルコフジャンプシステムによる解析手法の導入を行った。マルコフジャンプシステムの特徴は、システムの故障や環境変動に伴って、システムのパラメータが変化するといった場合に、制御系設計が行える点であり、本研究でも、そのような確率的な不確定要素を含んでいても、ナッシュ均衡戦略を得ることに成功した。従来と比較して、環境変動による不確定要素を、マルコフジャンプ確率システムに置き換えることによって、ナッシュゲーム問題が初めて解かれた点で大きな成果であると考えられる。その他の成果として、戦略対が存在するための必要条件の導出を行った。従来手法では、システムの構造までが変化するようなモデルは扱えないのに対して、本研究の手法では、より一般的な確率システムが扱える点で重要な進展であると考えられる。また、これらの有用性は、今後予想される実プラントへの適用に関して、実装できるシステムのクラスを格段に拡張できたという意味で大変評価できる斬新な結果であると考えられる。

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. Hiroaki Mukaidani, Hua Xu and Vasile Dragan : Stochastic Optimal Control for Weakly Coupled Large-Scale Systems via State and Static Output Feedback, *IET Control Theory & Applications*, 査読有, Vol. 4, Iss. 9, 2010, pp. 1849-1858.
2. 相良 宗臣, 向谷 博明 : 弱結合大規模マルコフジャンプ確率システムのためのナッシュゲーム, *電気学会論文誌 C*, 査読有, Vol. 131-C, No. 3, 2011, pp. 644-654.

3. 向谷 博明, Hua Xu : 離散時間弱結合大規模確率システムにおける動的ゲームの特徴, *計測自動制御学会論文集*, 査読有, Vol.46, No.8, 2010, pp.501-510.
 4. Muneomi Sagara, Hiroaki Mukaidani and Toru Yamamoto : Near-Optimal Control for Singularly Perturbed Stochastic Systems, *IEICE Trans.*, 査読有, Vol.E92-A, No.11, 2009, pp.2874-2882.
 5. 向谷 博明 : 動的ゲーム理論とロバスト性, *計測と制御*, 査読有, Vol.48, No.9, 2009, pp.718-723.
 6. Hiroaki Mukaidani and Hua Xu : Pareto Optimal Strategy for Stochastic Weakly Coupled Large Scale Systems with State Dependent System Noise, *IEEE Trans. Automatic Control*, 査読有, Vol.54, No.9, 2009, pp.2244-2250.
 7. Hiroaki Mukaidani : Robust Guaranteed Cost Control for Uncertain Stochastic Systems with Multiple Decision Makers, *Automatica*, 査読有, Vol.45, No.7, 2009, pp.1758-1764.
 8. Hiroaki Mukaidani : Soft-Constrained Stochastic Nash Games for Weakly Coupled Large-Scale Systems, *Automatica*, 査読有, Vol.45, No.5, 2009, pp.1272-1279.
- [学会発表] (計12件)
1. Hiroaki Mukaidani : Stochastic Nash Games for Weakly Coupled Large Scale Discrete-Time Systems with State- and Control-Dependent Noise, *49th IEEE Conference on Decision and Control*, December 15, 2010, pp.1429-1435, Atlanta, Georgia, USA.
 2. Hiroaki Mukaidani : A Numerical Computation of Linear Quadratic Dynamic Games for Stochastic Systems with State- and Control-Dependent Noise, *49th IEEE Conference on Decision and Control*, December 16, 2010, pp.4126-4131, Atlanta, Georgia, USA.
 3. Hiroaki Mukaidani : An Approximate Pareto Strategy Design for Weakly Coupled Large Scale Discrete-Time Systems with State- and Control-Dependent Noise, *IEEE Multi-conference on Systems and Control*, September 8, 2010, pp.761-766, Yokohama, Japan.
 4. Hiroaki Mukaidani : Static Output Feedback Strategy of Stochastic Nash Games for Weakly-Coupled Large-Scale Systems, *2010 American Control Conference*, June 30, 2010, pp.361-366, Baltimore, Maryland, USA.
 5. Hiroaki Mukaidani : Soft-Constrained Stochastic Nash Games for Multimodeling Systems via Static Output Feedback Strategy, *48th IEEE Conference on Decision and Control*, December 17, 2009, pp.5786-5791, Shanghai, PRC.
 6. Hiroaki Mukaidani : Guaranteed Cost Control for Uncertain Stochastic Systems with Multiple Decision Makers via Static Output Feedback, *48th IEEE Conference on Decision and Control*, December 16, 2009, pp.2917-2922, Shanghai, PRC.
 7. Hiroaki Mukaidani : Decentralized Stochastic Guaranteed Cost Control for Uncertain Nonlinear Large-scale Interconnected Systems under Gain Perturbations, *2009 American Control Conference*, June 12, 2009, pp.5097-5102, St. Louis, Missouri, USA.
 8. Hiroaki Mukaidani : Stochastic Nash Games for Multimodeling Systems, *2009 American Control Conference*, June 12, 2009, pp.4404-4409, St. Louis, Missouri, USA.
 9. Hiroaki Mukaidani : Stochastic H_∞ Control Problem with State-Dependent Noise for Multimodeling Systems, *2009 American Control Conference*, June 12, 2009, pp.4410-4415, St. Louis, Missouri, USA.
 10. Hiroaki Mukaidani : Stochastic Pareto Near-Optimal Strategy for Weakly-Coupled Large-Scale Systems with Imperfect Local State

Measurements, *47th IEEE Conference on Decision and Control*, December 10, 2008, pp.4293-4299, Cancun, Mexico.

11. Hiroaki Mukaidani : Infinite-Horizon Soft-Constrained Stochastic Nash Games with State-Dependent Noise in Weakly Coupled Large-Scale Systems, *2008 American Control Conference*, June 13, 2008, pp.4232-4237, Seattle, USA.
12. Hiroaki Mukaidani : Recursive Computation of Stochastic Nash Games with State-Dependent Noise for Weakly-Coupled Large-Scale Systems, *2008 American Control Conference*, June 13, 2008, pp.5016-5022, Seattle, USA.

[その他]

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

向谷 博明 (MUKAIDANI HIROAKI)
広島大学・大学院教育学研究科・准教授
研究者番号：70305788

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：