

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 29 年 8 月 25 日現在

機関番号：12612

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26630199

研究課題名(和文) 不完全情報ゲームの均衡選択制御と動的メカニズムデザインの実現

研究課題名(英文) Equilibrium selection control for games with imperfect information and realization of dynamic mechanism design

研究代表者

小木曾 公尚 (Kogiso, Kiminao)

電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授

研究者番号：30379549

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、ゲーム理論モデルで記述される戦略的な意思決定の制御(ナッシュ均衡を選択する制御法)を実現するために、制御工学的アプローチで代表されるフィードバック制御を採用し、i) プレイヤが有する利得を変更することで、また、ii) プレイヤが有する信念情報を推定する手法を開発した。i) では、非戦略的意思決定(電力市場モデル)に対し、また、戦略的意思決定(スノードリフトゲーム)に対し、所望のナッシュ均衡を実現する計算法を示した。そして、ii) では、不確かな意思決定(ベイジアンゲーム)に対し、信念の推定値から所望のナッシュ均衡を実現するための戦略を求めるフィードバック制御系設計問題に帰着させた。

研究成果の概要(英文)：This research aims to realize strategic decision-making control (control method to select Nash equilibrium) using the game theory model, based on feedback control represented by a control engineering approach. The achievements of this research are two methods: i) one is a method of altering a player's utility, and ii) the other is a method of estimating the belief information that the player privately holds. In i) we presented a calculation method to achieve the desired Nash equilibrium for non-strategic decision-making (power market model) and strategic decision-making (snow drift game). In ii), we reduced uncertain decision making, called Bayesian game, to a feedback control design problem in which a strategy for achieving a desired Nash equilibrium is derived from the belief estimate.

研究分野：制御理論

キーワード：ゲーム理論 ベイジアンゲーム 最適化理論 フィードバック

## 1. 研究開始当初の背景

ゲーム理論とは、利害や対立の関係を相互に持つ人や組織が戦略的に意思決定をおこなう状況(腹の探り合い)を記述し、戦略的な意思決定の構造を分析する学問分野である。一方で、人や組織の戦略的な意思決定を勘案したうえで所望の結果(均衡)を得られるような制度設計の概念として、メカニズムデザインがある。ゲームの帰結から戦略的な意思決定の構造を分析するゲーム理論と、所望の結果を得られるように適切な制度を設計するメカニズムデザインは、解析と設計の関係にある。メカニズムデザインは、所望の性質を持つオークションルールなどの制度設計に用いられ、実際に周波数帯の割当てオークションなどに利用され、社会的にも大きな成果を上げている。しかしながら、メカニズムデザインによる制度設計の問題点は、設計法を発見的に試行錯誤により見つけなければならない点である。そこで、プレイヤー(人や組織)の得る利得値を変化させること、また、プレイヤーの内面情報を推測することで、所望の均衡を実現する制御系を構成する制御工学的アプローチを考える。

制御理論は、システムを期待どおりに動作させるための知識と技術を提供する学問である。動的システムのモデリング法や解析・設計のための知識と技術が蓄積されている。よって、ゲーム理論の解析や設計問題に、制御理論の視点を導入することで、合理的な意思決定に関する斬新な研究成果が期待される。これは、制度設計の観点から、合理的意思決定を促すことが重要であると考えられるためである。本研究では、制御理論の考え方に基づき、システムの状態推定や所望の結果を得る制御系設計手法を考える。設計方法は、プレイヤー(個人または組織)が希望の行動を選択できるようにするインセンティブの計算と同等となる。意思決定におけるアクチュエータとしてのインセンティブを考慮することは、制御理論を制度構築に適用することが可能となる。

非戦略的意思決定では、各プレイヤーが非戦略的な状況のために自身の効用を最大化する状況を考慮する。これは、ミクロ経済学における価格理論モデルとして議論される。この理論は、需要と供給との間の相関に基づいて市場メカニズムを分析するために使用される。たとえば、自然エネルギーなどによる発電電力の売電を認める場合、電力市場における需要と供給の不均衡(電力需給ギャップ)の問題を考える必要がある。近年、電気消費量が増加しているため、効率的な電気エネルギーの使用と発電が重要であるが、電力需要は時間的に変化し、需要を正確に推定することは一般的に困難である。電力会社は、常に安定し

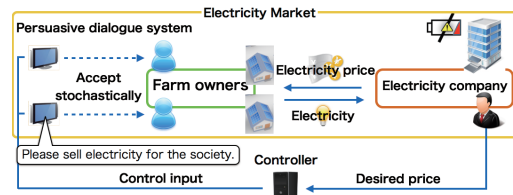


図 1 説得対話システムを導入した売電価格制御システム

た供給を確保するために、発言施設を維持するために莫大なコストがかかる。コストの問題を解決するために、需要対応や売電方法が検討されてきた。その一つとして、電力の売電に着目することが考えられる。この方法では、太陽光発電所およびエネルギー貯蔵施設を所有する電力所有者から電力を購入することによって、需給ギャップを減らすことが目標となる。つぎに、電力会社が説得力のある対話システムを使って発電家と購入価格を交渉することを想定する。このとき、制御システムの観点から、売電システムは、売電家の意思決定を制御するためのアクチュエータの一種として捉えることができる(図1参照)。したがって、市場は、説得機能を有する対話システムのアクチュエータによって制御される制御対象と考えることができる。

戦略的意思決定では、各プレイヤーが相手との相互作用のもとで予想される対戦相手の行動に対し、自身の効用を最大化しようとする状況を考慮する。これは、ミクロ経済学のゲーム理論モデルで形成されている。本研究では、標準形式のゲームと、ゲームの結果としてのナッシュ均衡を考える。標準型ゲームは、生物学、工学、経済学における非協調ゲームのモデリングと分析ツールに研究され使用されてきた。多くは、モデリングと解析に焦点を当てているが、系統的な設計論に関する研究も重要である。本研究では、現時刻でのゲームにおけるプレイヤーの効用を、所望の平衡に対応する別の理想的なゲームに変えることを目指す利得設計問題に焦点を当てる。つぎに、設計後のゲームは、所望の均衡を実現する利得行列で構成される。この利得の設計は、利得値の動的変化モデルを考慮して、プレイヤーの行動を所望のものに変えることが可能であるため、制御システムの設計問題に帰着できる。

## 2. 研究の目的

本研究では、前述の非戦略的、または、戦略的意思決定に基づく意思決定数理モデルに対し、均衡選択制御の方法および数値計算法を提案することが目的である。また、不確かな戦略的意思決定では、プレイヤーの内面情報(本音と建前)が扱えるベイジアンゲームモデルを対象にし、プレイヤーの内面情報の推定法

		Player 2	
		Cooperate, C	Defect, D
Player 1	Cooperate, C	$(b - \frac{c}{2}, b - \frac{c}{2})$	$(b - c, b)$
	Defect, D	$(b, b - c)$	$(0, 0)$

図 2 スノードリフトゲーム

に基づき、所望の均衡を実現する制御系設計法を提案する。本報告書では、それぞれの手法の有効性を数値例により確認する。

### 3. 研究の方法

(1) 相互作用を考慮していないモデル(電力市場モデル)による制度設計

相互作用を考慮しない制御系の一例として、電力市場における電力売買の場合を考える。電力市場モデルは、複数人の売電家、電力会社から構成され、売電時の電力価格は、売電家各々が電力会社に売る電力量に依存すると仮定する。売電量は、売電家各々についての嗜好に依存し、この嗜好を売電意欲と呼ぶ。電力会社は、売電家の売り出す電力量に依存した売電価格で電力を買取る。そこで、電力会社が売電家と価格交渉をおこない、売電家の売電意欲(利得値)を変更させるアクチュエータとして説得対話システムを電力市場に導入する。その結果として、いくつかの仮定のもとで所望の価格で電力を買い取れる制御系(制度)の設計が可能となる。この市場モデルは、ある種の最適化問題で定式化することができる。さらに、ある観測された均衡から所望の均衡へ遷移させるために、均衡の更新式(離散時間非線形差分方程式、数理モデル)を導出した。この数理モデルは、最適化問題の最適性条件から求められる。また、最適化問題の制約式を満たすように電力価格を調整する更新式も同時に導出した。この電力市場モデルに対し、目標の価格との誤差を入力とする比例積分制御器を用い、所望の電力価格を実現する。

(2) 相互作用を考慮したモデル(スノードリフトゲーム)による制度設計

相互作用を考慮したモデルの一例としてスノードリフトゲームを考える。これは、ソフトウェア開発過程の一部を表現できることが知られている。スノードリフトゲームのテーブルを図2に示す。ゲームのテーブルは、相互作用を考慮した定式化において、2人が選択する行動により、獲得する利得をまとめた表である。プレイヤーは、共通する2種類の行動(協力する(C)、協力しない(D))を選び、相手の行動に依存して両者の選択結果に対応する利得を得る。このとき、プレイヤーは、高い利得を得る選択をおこなう(プレイヤーは合理的な選択をおこなう)。括弧内左側の利得はプレ

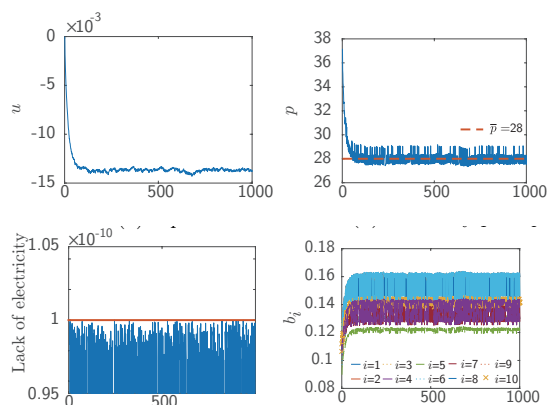


図 3 売電価格システムの時間応答

イヤ1に、右側はプレイヤー2に対応する。例えば、プレイヤー1がレビューをおこなう(C)、プレイヤー2がおこなわない(D)と選択した時は、それぞれ、 $b-c$ 、 $b$  というように利得を得る。しかし、より高い利得を得るためには、選択を確定できない場合が存在する。そこで、計画を立てて確率的に行動を選択することを考え、この確率を混合戦略という。この際に得られる利得は、各プレイヤーが各行動に割当てた確率を掛けあわせた、ある結果の発生確率とその結果に対応する利得値を掛けあわせた値であり、期待利得と呼ぶ。このゲームは、各プレイヤーに対するある種の最適化問題で定式化される。与えられた均衡から、所望の均衡へ遷移させるために、均衡の更新式を示す。均衡であるための最適生条件を変形することで、均衡の更新則が導出される。

(3) ベイジアンゲームの均衡選択制御

意思決定の不確かさを扱えるベイジアンゲームにおいては、信念を所与とするが、その確率分布を正確に把握することは一般に困難である。ベイズナッシュ均衡に従いプレイヤーが戦略を選択するとき、各プレイヤーは信念に基づいて自身の期待効用を最大化するはずであるから、観測されたプレイヤーの行動からベイズナッシュ均衡が得られるはずである。たとえば、アドホック無線通信ネットワークを対象にした文献において、信念を推定することは、あるベイズナッシュ均衡が観測されたときに、あるノードが“悪意のあるプレイヤーである確率”をベイズナッシュ均衡から推定することに相当し、信念の推定が可能になることで同様な攻撃監視や検出の問題へ応用が期待される。また、観測される混合戦略の組がベイズナッシュ均衡になる信念を導出できることから信念学習へ応用が期待される。しかしながら、ベイジアンゲームにおいては、あるベイズナッシュ均衡を所与としたときに対応する信念の推定手法は見当たらない。

ベイズナッシュ均衡は、信念を所与とし、決定変数が互いに影響し合う複数の最適化問

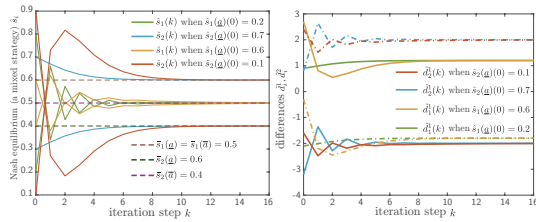


図 3 混合戦略(ナッシュ均衡)の時間遷移

題の局所最適解として求める。従来の研究では、ベイジアンナッシュ均衡は、解析的に解くことができる簡単な問題を対象としているか、繰り返し最適化問題を解く手法を用いて求めている。そのため、解析的にベイジアンナッシュ均衡に対応する信念を求めることは容易ではない。

#### 4. 研究成果

(1) 相互作用を考慮していないモデル(電力市場モデル)による制度設計

提案モデルによる価格制御の有効性を数値例で確認する。具体的には、売電価格が目標の売電価格(所望の均衡)に収束することを確認する。本報告では、電力会社が売電家の売電意欲を定めるコスト関数を正確に把握していない(モデル化誤差がある)場合を紹介する。結果を図3に示す。同図左上は、説得対話システムへの入力を示す。同図右上は、売電価格の応答を示し、目標の売電価格(28円)に収束していることがわかる。同図左下は、最適化問題の等式制約(電力の需給ギャップ)の誤差を示し、仮定した誤差の上限を満たす。下限も満足することを確認済みである。同図右下は、真の売電意欲と電力会社が想定している売電意欲の応答を示し、各パターンとも説得対話により増大している。また、同図右上・右下より、売電意欲が想定と多少異なっても(コスト関数のモデル化誤がある場合でも)売電価格に収束することがわかる。これは、フィードバック制御がコスト関数のモデル化誤差に対してロバスト性を持つことを示している。したがって、提案した電力市場の制御系において売電家の売電意欲を制御することにより、目標の売電価格が実現できることを確認した。

(2) 相互作用を考慮したモデル(スノードリフトゲーム)による制度設計

図4左図に混合戦略の時間変化を示し、同右図に、利得行列を特徴付ける利得行列の成分の差の時間応答の結果を示す。同左図から、目標の戦略値に収束していることが分かる。同右図から、戦略の変化に伴って利得行列の成分差の時間変化の見られることがわかる。目標とするナッシュ均衡を実現する利得行列が適切に求まった。提案したスノードリフトゲームの制御系において、戦略を制御するこ

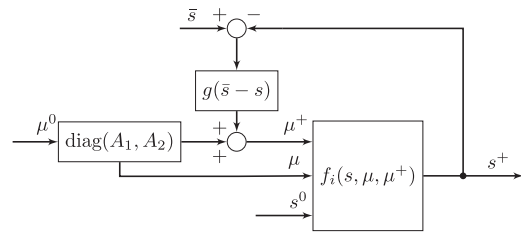
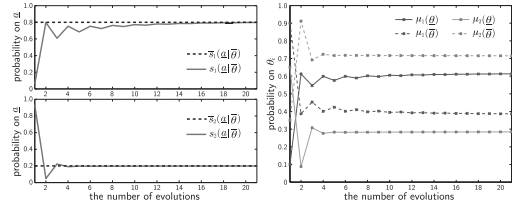


図 2 フィードバック制御による信念推定



(a) Trajectory of BN strategy (b) Trajectory of belief

図 4 数値例：信念推定

とにより、所望のナッシュ均衡が実現できることを確認した。

一般的な意思決定の定式化である相互作用を考慮した制御系について、今後の健闘課題をまとめる。本研究では、与えられたナッシュ均衡を所望のナッシュ均衡に遷移させ、その均衡を実現する利得行列を導出する。所望のナッシュ均衡を定める際、一般に複数の候補があり、その中からどのナッシュ均衡を目標として選べばよいかは、明らかでない。ゲーム理論分野で参考になる概念として、均衡選択がある。均衡選択とは、ゲームに複数の均衡解が存在する場合、ある評価基準(均衡から逸脱するリスクや得られる利得値の大きさ)で比較をおこない、どの均衡が起こりやすいか(支配、被支配の関係にあるか)を表す概念である。もし、ある評価基準に複数の均衡を照らした際に、評価に差があるならば、支配される方の均衡には合意されず、支配する均衡のほうが支配される均衡に比べ、発生しやすく、安定であるというように考えることができる。しかし、均衡選択の概念は、静的な概念であり、利得行列が遷移した異なるゲーム間におけるナッシュ均衡の比較は考慮されていない。そこで、今後の課題は、均衡概念を参考に利得行列が変化した場合を考慮できる均衡の選択に関する定義や性質を明らかにしていきたい。

(3) ベイジアンゲームの均衡選択制御

本研究では、あるクラスのベイジアンゲームを対象に考え、指定したベイジアンナッシュ均衡に対応する信念を推定する問題を解くことである。そのために、ベイジアンナッシュ均衡とそれに対応する信念を状態変数とした遷移モデルを導き出し、それに対してあるベイジアンナッシュ均衡(目標値)に追従するフィードバック構造(図5参照)を追加することで、問題を追従制御問題に帰着させて信念の推定を試み

る。本研究では、まず、ベイズナッシュ均衡が満たす条件をもとめ、そこから遷移モデルを導出する。最後に、その遷移モデルに対して追従制御系を構築する。図6に示す数値例を用い、提案法が信念の推定に有用であることを確認した。

5. 主な発表論文等  
〔雑誌論文〕(計2件)

1. Koji Kitagawa and Kiminao Kogiso, “Dynamic control of proclivity toward selling electricity using persuasive dialogue system,” *SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration*, Vol. 9, No. 6, pp.264-270, 2016. 査読有
2. 金川 雅和, 小木曾 公尚, “フィードバック制御によるベイジアンゲームの信念推定,” *計測自動制御学会論文集*, Vol. 51, No. 2, pp. 128-135, 2015. 査読有

〔学会発表〕(計12件)

1. 北側 紘史, Guo Mingyu, 小木曾 公尚, 畑 秀明, “所望のナッシュ均衡を実現する利得行列の設計法,” 第4回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, 3D2-3, 岡山大学(岡山県岡山市), 2017/3/6.
2. 朝日 亮輔, 小木曾 公尚, “階数条件によるベイジアンゲームの解析,” 第4回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, 3D3-5, 岡山大学(岡山県岡山市), 2017/3/6.
3. Kiminao Kogiso and Takashi Suzuki, “Parameterization of equilibrium assessment in Bayesian game with its application to belief computation,” *IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 3611-3616, Las Vegas (USA), 2016/12/12.
4. Koji Kitagawa and Kiminao Kogiso, “Filling demand-supply gap by adjusting electricity selling prices under stochastic acceptance,” *IEEE International Conference on Cyber-Physical Systems, Networks, and Applications*, pp. 25-28, 名古屋大学(愛知県名古屋市), 2016/10/6.
5. Norihito Kitagawa, Hideaki Hata, Akinori Ihara, Kiminao Kogiso, and Kenichi Matsumoto, “Code review participation: Game theoretical modeling of reviewers in Gerrit datasets,” *9th International Workshop on Cooperative and Human Aspects of*

*Software Engineering*, pp. 64-67, Austin (USA), 2016/5/16.

6. Koji Kitagawa and Kiminao Kogiso, “Control of proclivity toward selling electricity using persuasive dialog system,” *SICE International Symposium on Control Systems*, 2A2-2, 東京電機大学(東京都足立区), 2016/3/7.
7. Takashi Suzuki and Kiminao Kogiso, “Steady-state analysis of autonomous system in equilibrium assessment of Bayesian game,” *SICE International Symposium on Control Systems*, 4A1-4, 東京電機大学(東京都足立区), 2016/3/7.
8. 岡本 貴之, 小木曾 公尚, “あるベイジアンナッシュ均衡が満たす連立非線形方程式の導出,” 第3回計測自動制御学会 制御部門マルチシンポジウム, 1B2-4, 南山大学(愛知県名古屋市), 2016/3/7.
9. 鈴木 崇司, 小木曾 公尚, “ベイジアンナッシュ均衡のパラメータ表現に基づく信念の計算法,” 第3回計測自動制御学会 制御部門 マルチシンポジウム, 1B2-1, 南山大学(愛知県名古屋市), 2016/3/7.
10. Kiminao Kogiso, “Transition models of equilibrium assessment in Bayesian game,” *IEEE Conference on Decision and Control*, pp. 5996-6003, グランキューブ大阪(大阪府大阪市), 2015/12/15.
11. 小木曾 公尚, 鈴木 崇司, 岡本 貴之, “ベイジアンゲームモデルを用いたスポーツシーンにおける信念提示,” 第1回超人スポーツ学術研究会, p. 11, 筑波大学(茨城県つくば市), 2015/12/10.
12. 北側 紘史, 小木曾 公尚, “売電価格設定のための説得対話システムによる売電意欲の制御,” 第58回自動制御連合講演会, 2C1-4, 神戸大学(兵庫県神戸市), 2015/11/14.

〔図書〕(計0件)

〔産業財産権〕

○出願状況(計0件)

○取得状況(計0件)

〔その他〕

ホームページ <http://www.kimilab.tokyo/>

6. 研究組織

研究代表者:

小木曾 公尚 (KOGISO, Kiminao)

電気通信大学・大学院情報理工学研究所・  
准教授

研究者番号: 30379549