

令和 3 年 6 月 9 日現在

機関番号：32689

研究種目：若手研究

研究期間：2018～2020

課題番号：18K13781

研究課題名（和文）次世代都市インフラシステム構築のための動的インセンティブ設計・制御法

研究課題名（英文）Dynamic incentive and control algorithm for the development of the next-generation urban infrastructure systems

研究代表者

和佐 泰明（Wasa, Yasuaki）

早稲田大学・理工学術院・講師（任期付）

研究者番号：60793560

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究課題では、次世代都市インフラシステムの基盤技術創出を目指して、競争関係にある個人最適の均衡状態と全体最適の矛盾を解消する動的インセンティブ設計法の基盤理論構築を行った。まず、契約理論に最適制御理論とゲーム理論を融合させたモデルベース動的インセンティブメカニズムの開発に成功した。加えて、戦略的モデル情報提供時のシステム全体の影響解析を行った。さらに、電力システムおよび交通システムの数理モデルを通して提案手法の有効性を定量的に示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多様な利害関係を調整するメカニズムの構築は、電力市場の文脈で国内外問わず精力的に取り組まれ、超スマート社会の実現においても重要な技術課題である。関連研究の多くは特定のメカニズムに対する性能解析を重視しているが、どのメカニズムがどのような意味で最適であるか、という設計問題に対する研究は不十分であった。本研究課題では、設計問題の最適解を導出する基盤理論を系統的手法で明らかにした。開発した解析・設計方法は電力や交通を含む超スマート社会の多様な実運用方策に対して、理論的性能保証の提供による貢献が期待できる。

研究成果の概要（英文）：This research project aims at developing fundamental technologies for next-generation urban infrastructure systems. This project has developed a new dynamic incentive mechanism merging contract theory, optimal control theory and game theory to lead the individually optimal state into a global optimizer. Moreover, the proposed mechanism is applied to the optimal design for the strategic bidding problem of the agents' private model information under moral hazard. The effectiveness of the proposed mechanism is also demonstrated via simulations on dynamic power networks and traffic systems.

研究分野：制御・システム工学

キーワード：制御工学 動的インセンティブ設計 ゲーム理論 契約理論 都市インフラシステム

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、研究者個人に帰属します。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 交通・エネルギー・経済をはじめとする異分野技術を高度に相互活用した都市インフラシステムの再構築による超スマート社会の実現が求められている。その課題解決の一つとして、異なる目的や意思を持つ複数エージェント間の動的な調整メカニズムの基盤理論構築が挙げられる。

(2) 多様な利害関係を調整するメカニズムの構築は、電力市場の文脈で国内外問わず精力的に取り組まれ、超スマート社会の実現においても重要な技術課題である。関連研究の多くは特定のメカニズムに対する性能解析を重視しているが、どのメカニズムがどのような意味で最適であるか、という設計問題に対する研究は不十分であった。

2. 研究の目的

(1) 本申請課題では、項目1 - (2)に示すメカニズムの最適設計問題に対する解決を目指す。特に、システム制御の立場から数理モデルに基づく理論的構築をめざす。一般に、物理システムと社会経済システムのサブシステムが相互作用する動的環境下で、異なる目的や意思を持つ複数エージェント間の競争により生じる均衡状態(個人最適)は、一般にシステム全体の最も効果的な状態(全体最適)と異なることが知られている。この矛盾を解消するための方法論の提供を目的とした。

(2) また、構築した方法論に対して、実効性と設計上の限界を定性的分析および定量的分析の両面から検証することも目的の一つと据えた。

3. 研究の方法

(1) まず項目2 - (1)の達成に向けて、契約理論とゲーム理論および最適制御理論を融合する形で、プリンシパル・複数エージェント間の動的インセンティブ設計・制御法の開発を目指す。

(2) 項目3 - (1)で開発した方法論に対して、項目2 - (2)の定性的分析を行う。具体的には、開発した方法論には事前に提供されるモデル情報がすべて正しいという仮定のもとで議論を進めるが、個人最適に誘導するモデル情報をどの程度戦略的に提示する可能性があるのか、を主眼において理論的に解析する。

(3) 項目3 - (1)で開発した方法論が有する機能の有効性を検証するために、具体的な応用展開を見据えて電力システムおよび交通システムを模擬したモデルを用いて、項目2 - (2)の定量的分析を行う。

4. 研究成果

契約理論に基づく動的インセンティブ設計として、当初の計画通りの成果を得た。

まず、項目3 - (1)の達成に向けた成果をまとめる。

(1) 有限区間連続時間線形システムに対する最適な動的インセンティブ設計法と付随する最適制御則に関して、経済分野で発展してきた契約理論をシステム制御分野で蓄えられた動的ゲーム理論および最適制御理論の枠組みと融合する形で、数学的厳密性を保証したまま理論的に導出することに成功した。なお、線形システムはシステム制御分野では標準的数理モデルの一つである。

(2) 項目4 - (1)で開発した手法はエージェントから提供されるモデル情報が正しい限り、個人合理性(参加条件)と誘因両立性(個人最適化)が保証されることを理論的に示した。

(3) 項目4 - (1)で開発した枠組みに対して、無限区間計画問題の場合において数学的厳密性を保証したまま理論拡張に成功した。

(4) 項目4 - (1)で開発した枠組みに対して、離散時間における問題を検討し、とあるインセンティブが与えられた時のゲーム的状况下での最適制御則を理論的に導出し、システム全体で最適となるインセンティブを数値的に導出した。

(5) 項目4 - (1)で開発した枠組みに対して、非線形システムへの適用を検討し、入力アフィンシステムかつ入力に関して2次形式の評価関数の場合において、理論拡張できることを明らかにした。なお、動的インセンティブの変数は、経済分野で知られる「隠れた価格」、最適化分野で知られる「随伴変数(ラグランジュ乗数)」と理解することができ、電力市場を想定した場合

に自然かつ最適な価格設定ができることを示唆している。

(6) 項目4 - (5)の理論の一般拡張において、上記考察で用いてきたリスク中立型エージェント・リスク中立型プリンシパルだけでなく、リスク回避型エージェント・リスク回避型プリンシパルへの拡張も可能であることを示している。具体的には、線形2次ガウス型システムおよび指数関数で定義されたリスク付評価関数の場合、最適インセンティブを状態フィードバックの形で導出・記述できることを明らかにしている。このモデルはシステム制御分野のみならず、経済分野の契約理論の具体例として度々用いられている共通の数理モデルであることから、今後多くの理論展開や応用が期待される。

つぎに、項目3 - (2)および項目3 - (3)の達成に向けた成果をまとめる。

(7) 項目4 - (1)で開発した理論的枠組みではエージェントの最適行動（制御入力）の耐戦略性の保証を与える最適インセンティブを設計しているが、入力以外のモデル情報には制約がないことが分かった。つまり、エージェントは事前に渡すモデル情報を戦略的に伝達した方が個人の利益を増大させ、システム全体の性能を悪化させる可能性を秘めている。まず、限定的な状況下で戦略的にモデル情報を渡した際のシステム全体に与える悪影響の効果を理論的に導出した。また、項目4 - (1)で開発したインセンティブモデルの下で、エージェント群がモデル情報の戦略的提供した場合の社会システム全体への悪影響を理論的解析するとともに、数値シミュレーションを通して定量的に分析した。

(8) 電力システムの基本モデルに適用し、プリンシパルの評価パラメータに対する物理的性能の影響とエージェントの不確実性に対するリスク感度の影響を定量的に分析し、設計法の有効性と良好な性能を達成できることを確認した。

(9) 本課題に関連する成果は国内主要学会から学術奨励賞を受賞、国際的主要学会においてBest Paper Award Finalistに選出された。

また、項目3 - (3)での達成に向けて交通システムへの適用を検討した際、当初の計画にはなかった成果も得られた。

(10) 個人へのインセンティブ情報を陽に表現できる高速道路上交通システムの基本モデルを新たに構築した。まず、現実的な設定を踏まえた車両ごとの車線利用特性を考慮したミクロ数理モデルを構成した。構築したモデルは現実のマクロ現象の再現ができ、車両ごとにインセンティブを自然な形で追加することができ、インセンティブによる交通流適正化の実応用を視野に入れた検証が可能となった。この結果は研究開始当初に想定していた方法よりも理論的に扱う数理モデルに親和的で実用性の観点で優れている。また、特定のインセンティブ手法に対する性能評価を行い、インセンティブが有効であることまでを確認した。

(11) 配車サービスの経路選択最適化による交通流適正化を検討した。まず、対象とする交通流制御モデルと評価関数がこれまで検討している枠組みに帰着できることを明らかにした。つぎに、経路積分制御による等価表現とモンテカルロ法を用いた並列計算により実時間最適配分手法を提案した。また、確率的な流入車両と動的性の存在下でのWardrop均衡との関連性について数値例を通して分析した。さらに本枠組みを一般車へ拡張する際、インセンティブの受容者であるドライバーの判断に関する実験検証を検討した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

| | |
|--|-------------------------|
| 1. 著者名 Wasa Yasuaki、Hirata Kenji、Uchida Kenko | 4. 巻 2 |
| 2. 論文標題 Optimal agency contract for incentive and control under moral hazard in dynamic electric power networks | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 IET Smart Grid | 6. 最初と最後の頁 594 ~ 601 |
| 掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/iet-stg.2018.0256 | 査読の有無 有 |
| オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である） | 国際共著 - |

〔学会発表〕 計8件（うち招待講演 0件/うち国際学会 5件）

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yasuaki Wasa、Toshiyuki Muraio、Takashi Tanaka、Kenko Uchida |
| 2. 発表標題 Strategic bidding of private information for principal-agent type dynamic LQ networks |
| 3. 学会等名 17th European Control Conference（国際学会） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yasuaki Wasa、Kenko Uchida |
| 2. 発表標題 Optimal Dynamic Incentive and Control Contract among Principal and Agents with Moral Hazard and Long-Term Average Reward |
| 3. 学会等名 2019 12th Asian Control Conference（国際学会） |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 和佐泰明、内田健康 |
| 2. 発表標題 プリンシパルエージェント型LQ問題における私的情報の戦略的入札と社会厚生への影響 |
| 3. 学会等名 SICE 第7回 制御部門マルチシンポジウム |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 中島知己, 和佐泰明, 内田健康 |
| 2. 発表標題 契約理論に基づく動的電力ネットワークの最適制御とアンシラリーサービスの分析 |
| 3. 学会等名 第61回自動制御連合講演会 |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 山岡実夢, 和佐泰明, 内田健康 |
| 2. 発表標題 都市部高速道路上の交通流適正化のための車線変更マイクロモデルとインセンティブ設計の提案 |
| 3. 学会等名 SICE 第6回 制御部門マルチシンポジウム |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yasuaki Wasa, Takashi Tanaka |
| 2. 発表標題 Path-Integral Control for Optimal Vehicle Routing over Nonlinear and Dynamic Traffic Systems |
| 3. 学会等名 17th European Control Conference (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yasuaki Wasa, Kenko Uchida |
| 2. 発表標題 Strategic Bidding of Private Information for Dynamic LQ Networks under Moral Hazard |
| 3. 学会等名 21st IFAC World Congress (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Michael Hibbard, Yasuaki Wasa, Takashi Tanaka |
| 2. 発表標題 Path Integral Control for Stochastic Dynamic Traffic Routing Problems |
| 3. 学会等名 IEEE 59th Conference on Decision and Control (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

〔図書〕 計1件

| | |
|--|------------------------------|
| 1. 著者名 Yasuaki Wasa, Toshiyuki Murao, Ken-Ichi Akao | 4. 発行年 2020年 |
| 2. 出版社 Springer Nature | 5. 総ページ数 341 (pp.181-211) |
| 3. 書名 Economically Enabled Energy Management: Interplay between control engineering and economics | |

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| 早稲田大学理工学術院和佐泰明研究室ホームページ http://www.aoni.waseda.jp/wasa/index.html |
|--|

| 6. 研究組織 | | |
|---------------------------|-----------------------|----|
| 氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号) | 所属研究機関・部局・職 (機関番号) | 備考 |

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

| | |
|---------|---------|
| 共同研究相手国 | 相手方研究機関 |
|---------|---------|

| | | | | |
|----|-----------------------------------|--|--|--|
| 米国 | The University of Texas at Austin | | | |
|----|-----------------------------------|--|--|--|