

令和 5 年 6 月 23 日現在

機関番号：12612  
研究種目：挑戦的研究(萌芽)  
研究期間：2021～2022  
課題番号：21K19762  
研究課題名(和文)人間らしさを許容するハイブリッドインタラクティブな人機情系の在り方に関する研究

研究課題名(英文)Development of Emotion-Inclusive Hybrid Interactive Systems: Bridging Human-Machine Interactions with Human-like Qualities

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) 4,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、人間-機械-情報環境系を対象に考え、人の好みや意欲に配慮した動作支援や能力拡張に資する“情報”と“力(ちから)”のインタラクション(ハイブリッドインタラクション)の在り方をシステム論的に解明することを目的に、空気圧駆動系との力の相互作用制御技術および感情を取り入れた意思決定モデルの開発に焦点を当て、人間らしさを表現可能な、情報の非対称性や不確かさを含む非協力ゲームモデルの調査をおこない、それらのインセンティブ制御を応用して人機間のより自然で効果的な相互作用の実現可能性を検討した。

#### 研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、人間と機械のより自然な相互作用を促進する技術の開発に焦点を当てた。制御技術と感情を取り入れた意思決定モデルの開発により、ヒトと機械の相互理解と協調性が向上するシステム論が確立できる。これは、製造業や医療、介護等の分野でのロボットの活用拡大に寄与し、社会全体の生産性向上や労働力不足の解消につながる。また、非協力ゲームのモデル化によるインセンティブ制御は、情報の非対称性や選好の不確か性を考慮した効果的な意思決定を可能にし、社会的な問題解決に役立つことが期待できる。

研究成果の概要(英文)：This study focused on human-machine-information environment systems, and aimed at elucidating the hybrid interaction between "information" and "force" that contributes to motion support and capability expansion with consideration of human preferences and motivation from a systems theory perspective. We were focused on the development of a decision-making model that incorporates emotion and control technology for force interaction with pneumatic drive systems to elucidate the nature of hybrid interaction from a systems-theoretic perspective. We investigated non-cooperative game models that can express human-like characteristics and include information asymmetry and preference uncertainty. We also investigated the feasibility of more natural and effective interaction between humans and machines by applying incentive control to these models.

研究分野：制御工学

キーワード：インタラクション モデリング 動的システム ゲームモデル 感情 意思決定

## 1. 研究開始当初の背景

サイバー空間と人々がボーダーレスかつ機能的に連携する超スマート社会を実現するためには、人々を取り巻くサイバー空間上の情報処理システムが人間らしさ(嗜好や気まぐれなど)に適応する機能を具える必要がある。

このような機能を自動化する場合には、人や組織(ヒト)の合理的な振る舞いや意思決定を数理的に議論可能な、ゲーム理論分野で培われてきた意思決定モデルを活用することが自然である。プレイヤー同士が互いに行動の予想(腹の探り合い)をしたうえで自身の行動を決定するゲーム的狀況が数理モデルで表せる。特に、相手の選好が不確かな狀況の意思決定を表すベイジアンゲームは、プレイヤーの本音と建前が扱える興味深いモデル表現である。さらに、メカニズムデザイン理論と呼ばれる不確かなゲームに対するルール設計法がある。この設計理論は、ゲーム特有の腹の探り合いが無駄となる条件を数理最適化の可解問題に帰着させてゲームのルールを定める。このような腹の探り合いを打ち消す設計論は、制御分野で代表される制御系設計の概念に類似しており非常に興味深い。

ここで、自然科学法則に従うモノを対象とする制御理論は、物理法則や実験式から求まる対象の数理モデルが妥当である限り、所望の制御性能を達成する制御器の設計法や制御構造を与える学問体系である。しかし、想定外の外乱が生じる場合や経年劣化などの予測困難な不確かさがある場合、また、人の感情や本音などの内面情報に依存する意思決定など、それらの物理法則が微分方程式で記述困難な狀況では、一般的に、制御理論の不得意とするところである。つまり、制御理論的手法をゲームのメカニズムデザインに応用するためには、人と機械がどのような物理量・情報をどのように相互作用(インタラクション)させるかを理論的および技術的観点から確立させることが重要である。

## 2. 研究の目的

本研究では、人間-機械-情報環境系(人機情系:じんきじょうけい)を対象に考え、人の好みや意欲に配慮した動作支援や能力拡張に資する“情報”と“力(ちから)”のインタラクション(ハイブリッドインタラクション)の在り方をシステム論的に解明することを目的と定める。

本研究で提唱するハイブリッドインタラクション(力と情報による人機情系の駆動)は、モノとヒトの制御に対する概念、および、それを具現化する第一原理の代替・補間を熟考する契機を与えてくれる。これまでの研究活動で得られた申請者の見識を基に制御理論とゲーム理論が得意とする概念や道具を融合し、ハイブリッドインタラクションの人機情系に潜在する機能の顕在化を狙う。そして、人間らしい意思決定を制御対象として扱う、新しい制御理論の体系化を目指す。

## 3. 研究の方法

本研究の挑戦性に鑑みて、つぎの3課題に取り組み、本研究の目的達成を目指す。

### 課題1) 空気圧駆動系の擬人化による力のインタラクション

本課題では、科研費基盤C(18K04012)で開発した空気圧駆動系を擬人化し、プレイヤーの内面情報(タイプ)の定式化が可能な非協力ベイジアンゲームで力のインタラクションを表現することを目指す。まず、空気圧駆動系を通して人と力のインタラクションを実現するために、駆動系の回転角度と剛性の同時制御技術を開発する。つぎに、駆動系を擬人化するために、ヒトの非合理的な意思決定モデルを構築し、想定外な狀況を数理的モデルで表す。そして、繰り返しゲーム[1]を用いてヒトの意思決定をゲームモデルで定式化する。

### 課題2) インセンティブ制御による情報のインタラクション

情報のインタラクションを実現する情報提示系を構築し、前述のゲームモデルを制御系設計モデルとして扱い、所望の均衡状態を選択制御するインセンティブ制御系の設計理論(制御理論によるメカニズムデザイン)を構築する。情報提示には、クラウドサーバーによる情報環境を整備し、科研費挑戦的萌芽(26630199)で得られた信念推定法(Kogiso et. al., *IEEE CDC*, '16)を採用する。

### 課題3) ハイブリッドインタラクションによる機能の数理的解明

これまでの課題を統合して得られた人機情報系モデルに対する事例として、駆動系を介して人の力支援システムを考え、前述の二課題を情報と力のハイブリッドインタラクションで統合した系全体を、人間らしさを許容するシステム論的枠組みで議論し、その特性を明確にする。本課題では、これまでに課題で取り組んだ、駆動制御系およびそのベイジアンゲームモデル、そして、駆動制御系の使用者に対する情報提示系を組み合わせ、ハイブリッドインタラクションによる新しい計測制御の理論の体系化と関連技術の開発をおこなう。そして、システム統合および各システム調整により第一原理の代替・補完手法を探り、本研究課題の挑戦性を顕在化させる。

#### 4. 研究成果

本研究期間では、課題 1) および 2) の一部について以下に記す 3 成果が得られている。残りの課題 2) および 3) については、今後も継続的に取り組む予定である。

課題 1) に関する力のインタラクションを実現する空気圧駆動装置として、McKibben 型空気圧ゴム人工筋を用いた拮抗構造のアクチュエータを開発した (図 1)。このアクチュエータは、未知負荷が加わる状況でも、力センサを用いずにヒトとの接触部 (ジョイント部) の角度および剛性を同時に制御することができる (Shin, et. al., *IEEE TMECH*, 2022)。さらに、拮抗構造の動的モデルを解析することで、制御可能な関節剛性の範囲を可視化することに成功した (Shin, et. al., *AR*, 2022) (図 2)。これにより、情報のインタラクションを実現する情報提示系 (課題 2) の基礎技術にできる。さらに、人間への力支援を柔軟にするために開発した拮抗構造空気圧アクチュエータを 2 つ連結した 2 軸アームを制作し、その位置決め制御技術を開発した (白石ら, *SCI*, 2022)。

一方、アクチュエータの擬人化を実現する意思決定アルゴリズムとして、人の非合理的な意思決定を感情に起因するものと捉え、感情の時間変化を非線形モデルで定式化し、意思決定の合理性や非合理性をパラメータで調整可能な数理モデルを開発した (Iinuma, et. al., *MCMDS*, 2021) (図 3)。また、インセンティブ制御のゲームモデル化に関しては、情報の非対称性および利得値の不確かさを考慮した繰り返しゲームモデルを用いて、プレイヤーの感情はそのプレイヤーにしか分からない内部情報として扱う [1] ことで、また、エネルギーの消散性を導入して人間らしい意思決定を再現する [2] ことで、非対称情報下での 2 人ゼロサムゲームで裁判記録 (殺人事件) のモデル化をおこない、擬人化の妥当性について検討した。

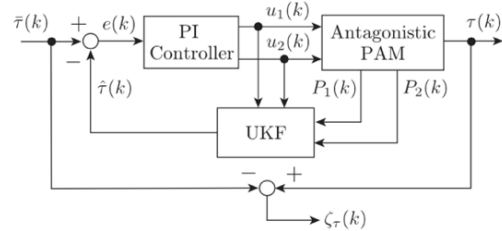


図 1 人工筋アクチュエータの同時制御系

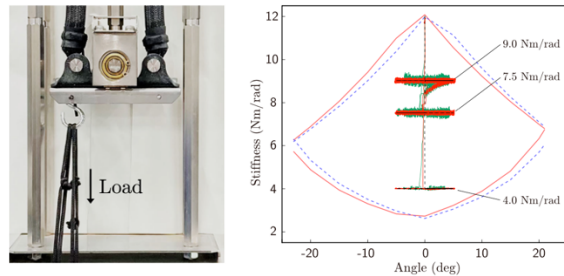


図 2 人工筋アクチュエータの制御と稼働範囲

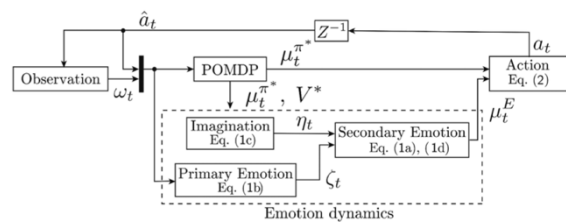


図 3 感情モデルと非合理的意思決定

#### 参考文献

- [1] Lichun Li and Jeff S. Shamma, "Efficient strategy computation in zero-sum asymmetric information repeated games," *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 65, No. 7, pp. 2785-2800, 2020.
- [2] Norah K. Alghamdi, David A. Shamma, and Jeff S. Shamma, "Analyzing the passivity of the human decision making rule in a congestion game experiment," *American Control Conference*, pp. 4826-4831, 2022.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計3件（うち査読付論文 3件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Shin Takaya, Kogiso Kiminao	4. 巻 36
2. 論文標題 Sensorless angle and stiffness control of antagonistic PAM actuator using reference set	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Advanced Robotics	6. 最初と最後の頁 423 ~ 437
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/01691864.2022.2046502	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Shin Takaya, Ibayashi Takumi, Kogiso Kiminao	4. 巻 27
2. 論文標題 Detailed Dynamic Model of Antagonistic PAM System and its Experimental Validation: Sensor-less Angle and Torque Control with UKF	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE/ASME Transactions on Mechatronics	6. 最初と最後の頁 1 ~ 1
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1109/TMECH.2021.3086218	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 -

1. 著者名 Iinuma Kaede, Kogiso Kiminao	4. 巻 27
2. 論文標題 Emotion-involved human decision-making model	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Mathematical and Computer Modelling of Dynamical Systems	6. 最初と最後の頁 543 ~ 561
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1080/13873954.2021.1986846	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4件（うち招待講演 0件/うち国際学会 1件）

1. 発表者名 新昂也, 小木曾公尚
2. 発表標題 空気圧人工筋モデルに基づく実現可能な関節角度と剛性の目標値集合
3. 学会等名 第39回日本ロボット学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 武田裕太, 小木曾公尚
2. 発表標題 非線形空気圧人工筋コントローラの多項式近似のための正則化パラメータ探索
3. 学会等名 第65回自動制御連合講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 武田裕太, 小木曾公尚
2. 発表標題 LASSOによる多項式近似を用いた暗号化制御器の設計
3. 学会等名 第67回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Yuta Takeda, Kiminao Kogiso
2. 発表標題 Experimental Regularization Parameter Search for Polynomial Approximation of Nonlinear PAM Controller
3. 学会等名 IEEE/SICE International Symposium on System Integration (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>空気圧ゴム人工筋を用いた柔軟なアクチュエータの開発  <a href="https://www.kimilab.tokyo/contents/102">https://www.kimilab.tokyo/contents/102</a>          人や組織の意思決定を制御する理論の体系化及び制御アルゴリズムの開発  <a href="https://www.kimilab.tokyo/contents/101">https://www.kimilab.tokyo/contents/101</a></p>
---

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
---------	---------