

令和 6 年 6 月 26 日現在

機関番号：23201
研究種目：若手研究
研究期間：2020～2023
課題番号：20K14767
研究課題名(和文)人に「寄り添う」制御の理論体系の構築：非線形制御とあいまいさに基づくアプローチ

研究課題名(英文)Construction of controller design for a system that "coheres" with people: an approach based on nonlinear control and ambiguity

研究代表者
大倉 裕貴 (Yuki, OKURA)
富山県立大学・工学部・講師

研究者番号：20842777
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：人が行う意思決定は、機械システム側から見ると、あいまいで非線形性を有している。それによって引き起こされる現象が、人にとっての不快感や作業結果としての不利益などにつながり、人機械協働のための制御系の設計を難しくしている。そこで、システムの効率性などの性能だけでなく、人が感じる快適さなどの価値も取り入れた制御、すなわち人に寄り添う制御の理論体系の構築を目指すことを、本研究の目的としていた。そのために、(1)制御モデルの構築、(2)モデルの統合と理論的な解析、(3)数値シミュレーションによる制御モデルの有効性の検証、これらの3つの内容を遂行していく。

研究成果の学術的意義や社会的意義

日本では現在少子高齢化社会が着々と進んでおり、工場での作業や農作業、物資の運送など、現在の日常を支える様々な場面で深刻な人手不足に陥る可能性がある。このような人手不足によって起こる社会の問題に対する解決策の一つとして、人と機械とがうまく協働・共存することのできる社会の実現が望まれる。本研究で得られた制御モデルは将来的に、協働することをうまく考慮にいった、機械の制御システムを実現するための基盤技術のための基礎理論の一部として貢献できると期待される。

研究成果の概要(英文)：Decision-making by humans is ambiguous and nonlinear from the perspective of machine systems. Phenomena caused by such ambiguity can lead to discomfort and disadvantageous work results for humans, making the design of control systems for human-machine collaboration difficult. Therefore, the objective of this research was to construct a theoretical system of control that incorporates not only system performance such as efficiency, but also values such as comfort that people feel, that is, a control system that is friendly to people. To this end, we will carry out the following three tasks: (1) construction of a control model, (2) integration of the model and theoretical analysis, and (3) verification of the effectiveness of the control model through numerical simulation.

研究分野：システム制御

キーワード：非線形制御 人間機械系 協調運搬システム

様式 C - 19、F - 19 - 1 (共通)

1. 研究開始当初の背景

日本では現在少子高齢化社会が着々と進んでおり、工場での作業や農作業、物資の運送など、現在の日常を支える様々な場面で深刻な人手不足に陥る可能性がある。このような人手不足によって起こる社会の問題に対しての解決策の一つとして、人と機械とがうまく協働・共存することのできる社会の実現が望まれる。そのためには、協働することをうまく考慮にいった、機械の制御システムを実現するための基盤技術の確立が課題となる。

人と機械システムが協働するための課題として、人の行う意思決定や動作の「あいまいさ」がある。例えば1m先にあるテーブル上のコップを掴むという動作を一つ考える。仮に同じ作業を同一人物が100回繰り返し行ったとしても、掴むために動かした手の軌跡が、座標空間上で数ミリも変わらず100回とも同じ軌跡になることは難しい。規模はさまざまであるが、人が行う意思決定や動作の「あいまいさ」を機械システム側が考慮に入れなかったため、共同で作業を行う人間側に不快感や不利益などが起こり、望ましくない結果が得られてしまうことを意味している。したがって「あいまいさ」を考慮に入れた制御手法の確立が重要となる。

2. 研究の目的

当初の背景で述べたように、人が行う意思決定は、機械システム側から見ると、あいまいで非線形性を有している。それによって引き起こされる現象が、人にとっての不快感や作業結果としての不利益などにつながり、人と機械協働のための制御系の設計を難しくしている。そこで、システムの効率性などの性能だけでなく、人が感じる快適さなどの価値も取り入れた制御、すなわち人に寄り添う制御の理論体系の構築を目指すことを、本研究の目的としていた。そのために、(1)制御モデルの構築、(2)モデルの統合と理論的な解析、(3)数値シミュレーションによる制御モデルの有効性の検証、これらの3つの内容を遂行していく。

3. 研究の方法

本研究では、新しい制御モデル・手法の構築を目指した。モデル構築にあたり、状態空間モデルを元にした数理モデルの定式化を行い、安定性やシステムの応答の性質について、その理論的な解析を行なっていった。また、協調運搬を例に、運搬時の振る舞いを数理モデルで表現し、高性能計算機上で数値シミュレーションを行い、その際のさまざまな状態の応答を数値的に確認、解析・評価を行うことで、得られた制御モデルの有効性について検討を行った。

4. 研究成果

研究の目的であった、制御モデルの構築と理論的解析、および数値シミュレーションによる有効性の検証について、「あいまいさ」に着目して次の成果が得られた。

(1): システムの状態応答から人が加えた力を推定してアシストする手法

人が物体に加えた力は直接計測できない状況を考える。力覚センサなどによって直接力が計測できる場合もあるが、センサの設置場所がロボットアームの先端のみであるといった、計測可能な場所が限定的な場合も想定される。そこで、力が直接計測できない状況下においても人が物体に加えた入力をロボットが推定し、人のアシストをする制御を実現するために、外乱オブザーバを用いる。これによって、物体の位置や速度、角度といった状態の値を用いて、計測できない未知の力を推定する。そして、得られた推定値を用いて人の操作を補助するアシスト制御の設計を提案する。特に研究ではまず、線形システムに対する外乱オブザーバを用いて有効性を検討した[1]のちに、得られた結果を入力アフィンな非線形システムへ拡張するために非線形外乱オブザーバを導入した[2]。協調運搬システムに適した推定を行うための、外乱オブザーバに必要な非線形ゲインの設計方法とその収束性についても提案した。数理モデルとして定式化し、協調運搬を数値例題として、手法の有効性について評価した。

(2): 「あいまいさ」が悪影響を及ぼす際の堅い制約による制御

人と機械システムとの協働作業において、環境によっては「あいまいさ」が悪影響を及ぼす場合が考えられる。例えば狭い通路や、障害物が多く存在する環境下での協調運搬作業などでは、あいまいな作業によって通路や障害物にぶつかってしまうことを避けなければならない。そこで、解析力学などで考えられるホロノミック拘束と呼ばれる拘束の考え方を活用して、制御入力を与えることで、強い拘束がかかったかのような応答をする制御モデルの構築を考案した[3]。メカニカルシステムを対象としたポートハミルトン系によって対象システムと制御入力をモデル化し、応答についての数理的な性質を解析し、協調運搬を例に数値シミュレーションによってその有用性を検証した。

(3): 人と機械システムをエージェントと捉えた時の最適動作に関する検討

人と機械システムとの協働作業において、人と機械システムは異なる思惑・アルゴリズムによって作業をすることが考えられる。例えば協調運搬において、機械システムは最短で運搬が実現できるように素早く、最短距離を通るために壁側に寄った動作をするプログラムが組まれていたとする。この時に、ある人は運搬物をぶつけないと慎重に考えて、できるだけ壁から遠い場所を通って運びたいと思う人であったとすると、機械システムと人との価値観が異なり、それぞれの動作が悪影響を及ぼす可能性も考えられる。それぞれが異なる評価に基づいて動作を決定する際、システムとしてどのように情報のやりとりをするべきか、どのような制御入力を与えれば良いか、などを考慮する必要が考えられる。そこで、人や機械システムをそれぞれエージェントとして数理的に捉え、それぞれが異なる評価関数に基づいて運搬作業を行う状況における制御モデルについて検討をした[4]。本研究では最適レギュレータによるモデル化に留まっており、次の展開として、他の最適化や最適制御モデルについてなど、手法の範囲を広げたモデル化が必要となる。

これらに加え、過去の研究で得られた、不確かさを活用した制御手法[5]によるアプローチを組み合わせることで、状況下に応じて人の「あいまいさ」を持つ操作を推定し、汲み取った制御の実現が可能になることが示唆された。本研究期間で明らかにできたのは、あくまで数理的な制御モデルにおける有用性であるため、次の展開として、実環境で用いられる機械システムやロボットに制御モデルが実装された際の効果について研究を進めていく必要がある。

引用文献

- [1] 中田智大・大倉裕貴・小島千昭, 人とロボットによる協調運搬システムの外乱オブザーバを用いたアシスト制御について, 第65回システム制御情報学会研究発表講演会, 2021年5月
- [2] 大倉裕貴・中田智大・小島千昭, 人とロボットによる協調運搬システムの非線形外乱オブザーバを用いたアシスト制御, 電気学会論文誌C, 142巻, 9号, pp. 1021-1030, 2022.
- [3] Y. Okura, K. Fujimoto, and C. Kojima, "Virtual Holonomic Constraints Control for port-Hamiltonian Systems: A Case Study of Fully Actuated Mechanical Systems", 1st Virtual IFAC World Congress (IFAC-V 2020), July, 2020, pp. 5598-5603.
- [4] Y. Okura, C. Kojima, M. Nakamura, K. Sakakibara, and T. Motoyoshi, "A Study on Cooperative Control for Multi-agent Systems Based on Nonlinear Optimal Regulator", The SICE Annual Conference 2020 (SICE 2020), Online, September, 2020, pp. 1227-1229.
- [5] Y. Okura, K. Fujimoto, I. Maruta, A. Saito, and H. Ikeda, "Bayesian Inference for Path Following Control of Port-Hamiltonian Systems with Training Trajectory Data", SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 13, No. 2, pp. 40-46, 2020.

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 0件）

1. 著者名 大倉裕貴・中田智大・小島千昭	4. 巻 142
2. 論文標題 人とロボットによる協調運搬システムの非線形外乱オブザーバを用いたアシスト制御	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 電気学会論文誌C	6. 最初と最後の頁 1021 ~ 1030
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1541/ieejieiss.142.1021	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 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 影山侑輝・大倉裕貴・小島千昭
2. 発表標題 カルマンフィルタに基づく状態推定を用いた人とロボットによる協調運搬システムのアシスト制御について
3. 学会等名 第66回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 中田智大・大倉裕貴・小島千昭
2. 発表標題 人とロボットによる協調運搬システムの外乱オブザーバを用いたアシスト制御について
3. 学会等名 第65回システム制御情報学会研究発表講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 影山侑輝・中田智大・大倉裕貴・小島千昭
2. 発表標題 状態推定に基づく協調運搬システムのアシスト制御
3. 学会等名 2021年度電気・情報関係学会北陸支部連合大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 大倉裕貴・小島千昭
2. 発表標題 仮想非ホロノミック拘束によるポートハミルトン系の制御と協調搬送システムへの適用について
3. 学会等名 第9回計測自動制御学会制御部門マルチシンポジウム
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Okura, K. Fujimoto, and C. Kojima
2. 発表標題 Virtual Holonomic Constraints Control for port-Hamiltonian Systems: A Case Study of Fully Actuated Mechanical Systems
3. 学会等名 1st Virtual IFAC World Congress (IFAC-V 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Okura, C. Kojima, M. Nakamura, K. Sakakibara, and T. Motoyoshi
2. 発表標題 A Study on Cooperative Control for Multi-agent Systems Based on Nonlinear Optimal Regulator
3. 学会等名 The SICE Annual Conference 2020 (SICE 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 大倉裕貴・小島千昭・中村 正樹・榊原一紀・本吉達郎
2. 発表標題 非線形最適制御によるマルチエージェントシステムの協調制御について
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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