

令和 4 年 6 月 14 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2019～2021

課題番号：19K21970

研究課題名（和文）数理モデルを融合したスーパーバイザ型人工知能

研究課題名（英文）Artificial Intelligence with Supervision from A Mathematical Model

研究代表者

東 俊一（Azuma, Shun-ichi）

名古屋大学・工学研究科・教授

研究者番号：40420400

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、人工知能を単体で利用する場合よりも高い性能を得るために、スーパーバイザと呼ばれる装置で人工知能（予測器）を管理する「スーパーバイザ型人工知能」の基礎研究を実施した。ここでいうスーパーバイザとは、数理モデルに基づいて得られるものであり、人工知能単体では避けられない予測誤差を補償する役割を演じる。本研究では、スーパーバイザ型人工知能の一種である予測ガバナと呼ばれる既存技術を深化させるとともに、マルチエージェント制御やイベント駆動制御などを対象にしたスーパーバイザ型人工知能を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

近年、人工知能に大きな注目が集められているが、人工知能によって導き出された答えがいかに正しくても、現状ではその理由を説明できないと言われており、このことが実用化への障害になることもあった。その解決策のひとつは、人工知能がうまく働くメカニズムを理論的に解明することであるが、残念ながらそのような成果が得られる目途は立っていない。そこで、本研究では、人工知能に数理モデルを融合することで、人工知能が本質的にもつ不確かさを数理モデルによって補償する方法を開発した。これにより、人工知能単体で用いる場合と比べ、我々がより安心して人工知能を利用できる基礎を作ることができた。

研究成果の概要（英文）：This study has established a series of fundamental results on the so-called “supervised artificial intelligence,” which is artificial intelligence with supervision from a mathematical model. In particular, we have progressed the existing theory of prediction governor and developed supervised artificial intelligence for multi-agent control, event-triggered control, and so on.

研究分野：制御工学

キーワード：人工知能 数理モデル 制御工学

### 1. 研究開始当初の背景

2012年の画像認識コンテスト ILSVC をきっかけに、深層学習に大きな注目が集められ、人工知能の研究が爆発的な勢いで行われてきた。

しかしながら、人工知能によって導き出された答えがいかに正しくても、現状ではその理由を説明できないと言われており、このことが実用化への障害になることもあった。実際、応募者が産業界との共同研究で耳にするのは、「うまくいく理由がわからないものは、実機では怖くて使えない」ということである。つまり、高いレベルでの「安全性」と「安心感」が求められるシステムにおいては、人工知能をその基幹系で利用するのは難しいということである。

その解決策のひとつは、人工知能がうまく働くメカニズムを理論的に解明することであるが、残念ながらそのような成果が得られる目途は立っていなかった。

### 2. 研究の目的

上述の研究背景のもと、本研究では、人工知能単体よりも高い性能を得る方法の開発を目的とした。特に、図1に示すように、人工知能(予測器)に、数理モデルに基づくスーパーバイザと呼ばれる装置を取り付け、人工知能を管理する機構を「スーパーバイザ型人工知能」と呼び、その理論的な枠組みの構築を目指した。

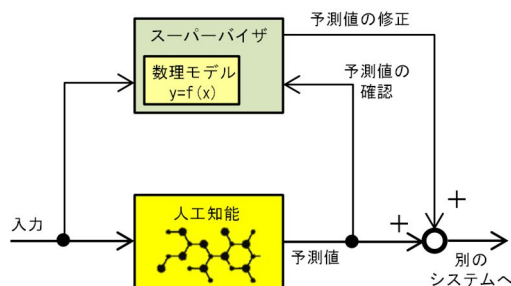


図1 スーパーバイザ型人工知能  
数理モデルに基づくスーパーバイザによって、人工知能を監視し、誤りがあれば即座に修正する。

### 3. 研究の方法

#### 3.1 基本的な考え方

図2に示される、予測器と動的システムで構成されるシステムを考える。ここで、動的システムへの指令値は、事前に明確に定められているのではなく、ある計算過程によって予測され与えられるものとする。つまり、予測器は動的システムへの指令値を生成する役割を担う。いま、予測器を実現する数理モデルは存在するが、人工知能での代用が望まれる場合を考える。たとえば、数理モデルが微分方程式や最適化問題の解として表現されているときは、その出力を計算するのに時間がかかるが、このような場合がそれにあたる。

そこで、図1のように、人工知能を予測器の本体とするが、数理モデルに基づくスーパーバイザを取り付けて、人工知能の出力に誤りが無いかを監視し、誤りがあれば即座に誤りを修正するようにする。これが本研究で考えるスーパーバイザ型人工知能の基本的なアイデアである。

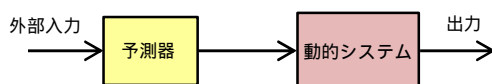


図2 本研究で考えたシステム  
動的システムの指令値が予測器を通して与えられる。

### 3.2 準備状況と本研究のアプローチ

代表者らは、2015年より、JST CRESTのプロジェクトの一環で電力システムを対象に「予測ガバナ」と呼ばれるしくみを発案した（南，東，第2回制御部門マルチシンポジウム，2015，特願2014-209483）。

これは、図2のシステムにおいて、予測器が発生する予測誤差を、過去の真値を用いて補正し、予測誤差がシステム全体の性能に影響を及ぼさないようにするものである。

本研究では、この基本的な技術と考え方を、以下の観点から発展させるアプローチをとることとした。

- (1) 理論的に深化させる。
- (2) 実用化を目指し、技術的なレベルアップをする。
- (3) 電力システム以外での応用可能性を検討する。

## 4. 研究成果

### 4.1 主要成果

#### (1) 予測ガバナの理論的深化

「フィードバック制御」および「時系列予測」の観点から、予測ガバナのメカニズムを考察し、既存の制御技術と予測技術との比較を行い、理論的な位置付けを明らかにした。

#### (2) スーパーバイザ型人工知能によるマルチエージェントシステムの制御

マルチエージェントシステムの基本的な制御のひとつとして被覆制御が知られている。これは、各エージェントの状態を、状態空間上に任意の密度で配置するものである。

これを実現するためには、各エージェントはポロノイ領域の重心を時々刻々と計算し続ける必要があるが、その計算量は一般に大きい。そこで、その重心のおおよその位置を予測する人工知能と、重心を正確に計算するスーパーバイザを図1のように組み合わせた制御器を開発した。

従来は計算量が大きかったために制御周期を短く設定することはできなかったが、提案法により制御器により、図3のように従来とほぼ同じ制御性能（被覆完成までの時間）を得ながら制御周期を短くすることが可能となった。

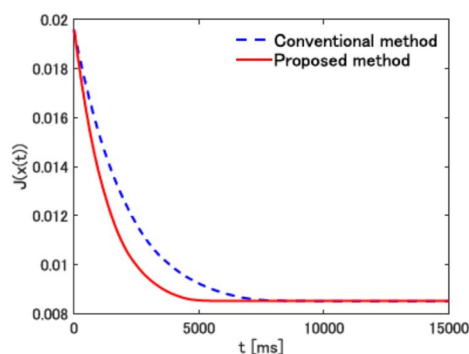


図3：被覆の完成度合いの時間変化の例  
(伊藤，東，ほか：第62回自動制御連合講演会，2019から引用)

また、ホッピングローバーと呼ばれる惑星探査ロボットに対する合意制御への展開も試みた。ホッピングローバーは、ホッピング運動により空間を移動するが、その際に生じる地面との衝突により、その到着地点は当初の予定とはかなり異なることが知られている。そこで、運動の不確かさの影響を軽減するスーパーバイザ型人工知能の開発を試みたが、これについては準備的な成果に留まり、最終年度までに成果を得ることはできなかった。

#### (3) 未知の線形システムに対するデータ駆動型イベントトリガー制御

近年、イベント駆動制御と呼ばれる制御方法が注目を集めているが、制御対象のモデルが構築できない場合への適用は困難であった。そこで、スーパーバイザ型人工知能によって、その場合のイベント駆動制御を実現することを考えた。

提案法では、図1に示される人工知能として状態フィードバック、スーパーバイザとしてイベント駆動器を設定し、状態軌道のオンライン情報を利用し、スーパーバイザの学習を行うと、システム全体の漸近安定化が保証できることがわかった。

#### (4) 逐次観測型スパース再構成のスーパーバイザ型人工知能としての解釈と性能向上

線形方程式のスパースな解を求める方法として、近年、代表者らは逐次観測型スパース再構成と呼ばれる方法を開発している。この方法は、 $l_1$ 最適化と解の一部の直接観測を繰り返し行うことで、正確なスパース解を求めるものである。

本研究では、この方法が、図1のスーパーバイザ型人工知能の一種として解釈できることを発見し、解の事前情報から解空間をモデル化し(解の0要素のグループ化と発生度合い)、それをスーパーバイザに組み込む方法を開発した。その結果、従来方法より劇的に観測数を減少させることが示唆された。

この成果により、2021年度に基盤研究(A)「デマンドレスポンスの実施診断：性能10倍への挑戦とオンデマンド情報取得学の創成」が採択され、更なる発展的な研究が実施できることになった。

#### 4.2 研究の総括

本研究は、予測ガバナ技術を核として、スーパーバイザ型人工知能の理論と応用の枠組みを構築することを目指したが、おおむねこの目的は達成できたものと考えている。つまり、本研究は人工知能と数理モデルの融合という課題に向けた第一歩となった。

この一方で、「1. 研究開始当初の背景」で述べたように、人工知能の動作を保証することが困難であることを動機として、本研究を開始したわけであるが、動作保証や安全性を理論的に保証するまでには至らなかった。この点について今後更なる研究が必要である。

また、研究提案時には、自動車の基幹系であるエンジン制御を対象に、スーパーバイザ型人工知能を開発・評価し、産業界へ展開する下地を作る予定であった。しかし、ここ2、3年で急激に現れてきた自動車の電動化への流れにより、エンジン制御が有効な実施例になる見込みが無くなってしまった。これに代わる有効な実施例を見つけ、産業界へ展開していくことも今後必要になると考えている。

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 Minami Yuki, Azuma Shun ichi	4. 巻 0
2. 論文標題 Prediction governors: Optimal solutions and application to electric power balancing control	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IET Control Theory & Applications	6. 最初と最後の頁 0
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/cth2.12129	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 許, 東, 小林, 山口, 有泉, 浅井
2. 発表標題 Detection of Defaulting Participant in Demand Response Based on Evaluation of Default Possibility
3. 学会等名 第63回自動制御連合講演会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Takekuma, S. Azuma, R. Ariizumi, and T. Asai
2. 発表標題 Consensus Control of Multi-hopping-rover Systems
3. 学会等名 4th International Symposium on Swarm Behavior and Bio-Inspired Robotics,
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 [4] I. Banno, S. Azuma, R. Ariizumi, and T. Asai
2. 発表標題 Data-driven Sparse Event-triggered Control of Unknown Systems
3. 学会等名 2021 American Control Conference
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 伊藤, 東, 有泉, 浅井
2. 発表標題 デュアル制御器による高速・高精度な被覆制御
3. 学会等名 第62回自動制御連合講演会, 札幌
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 坂野, 東, 有泉, 浅井
2. 発表標題 未知システムに対するデータ駆動型イベントトリガード制御
3. 学会等名 第7回制御部門マルチシンポジウム, 徳島
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
研究分担者	浅井 徹  (Asai Toru)  (30314363)	名古屋大学・工学研究科・准教授   (13901)	
研究分担者	有泉 亮  (Ariizumi Ryo)  (30775143)	名古屋大学・工学研究科・助教   (13901)	

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