

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04170

研究課題名(和文)人と機械の組織形成による問題解決法の研究

研究課題名(英文) Study on Problem-solving by Organizing Humans and Machines

研究代表者

松原 繁夫 (Matsubara, Shigeo)

大阪大学・数理・データ科学教育研究センター・特任教授(常勤)

研究者番号：80396118

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：人と機械の組織形成による問題解決法の確立に向け、集合知の基礎理論である多様性予測定理の考え方を予測問題から様々な問題に展開した。集団が発揮する性能は個々人の能力と多様性から決まるという観点から、協調の促進および共謀の抑制を考察した。具体的には、(1)予測多様性維持法として、逐次クラウドソーシングにおける効率的なタスク分割法の考案、(2)予測多様性拡大法として、フリーフロート型カーシェアリングにおける乗車需要と車両配置の不均衡を解消する、参加者間の契約に基づく分散制御法の考案、(3)平均個人誤差削減法の考案に向けた通販サイトでの評判システムにおける買収行動の均衡分析を行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、人と機械の協働を人と機械の組織形成による問題解決と捉え、クラウドソーシングにおけるタスク割当て、カーシェアリングの分散制御、評判システムの戦略的操作など予測問題と異なる問題領域でも多様性予測定理の考え方に基づく問題解決が有効であることを示した。これは、これまで別々に扱われてきた問題を人と機械の組織形成という観点から統一的に取り扱える可能性を示すもので、集合知の理解を一步進めるものとなっている。本成果は、人工知能に関する最難関会議での採録や、エージェントに関する国際会議での最優秀論文賞の受賞に見られるように高い評価を受けている。

研究成果の概要(英文)：Toward establishing a problem-solving method through the organizational formation of people and machines, we have developed the idea of the diversity prediction theorem, a basic theory of collective intelligence, from prediction problems to various problems. From the viewpoint that the performance exhibited by a group is determined by the abilities and diversity of individuals, we examined the promotion of cooperation and the suppression of collusion. Specifically: (1) As a prediction diversity maintenance method, we have devised an efficient task partitioning method for sequential crowdsourcing. (2) As a prediction diversity expansion method, we have devised a decentralized regulation method based on contracts among participants to resolve the imbalance between ride demand and vehicle allocation in free-float car sharing. (3) Toward devising an individual error reduction method, we have conducted an equilibrium analysis of bribery in a reputation system on EC sites.

研究分野：知能情報学

キーワード：マルチエージェントシステム 集合知 インセンティブ設計

## 1. 研究開始当初の背景

近年の人工知能技術の進展により、機械学習は人を凌駕する性能を示す場合があるが、それは多くの場合、明確に定義された特定の目的を持つ問題に限られている。物事を意味づけ、状況を把握するといった広範な知能の実現に向けて、データに基づく人工知能システムと人が持つ知識をどう組み合わせるかという課題の重要性が増している。我々はこれまでに、経済指標の予測問題を、複数の人の予測者と機械の予測器から成る組織形成の問題として定式化し、最適組織の形成法を提案している。当該手法は集合知に関する基礎理論として知られる多様性予測定理に基づいている。集団的誤差の削減には、平均個人誤差の削減とともに予測多様性の拡大が有効である。ここで、平均個人誤差は個人の平方誤差の平均を、予測多様性は個人の予測と集団的予測の平方差の平均を表す。予測多様性が高いとは個々の予測に負の相関があることを意味し、互いに誤りを打ち消す形での意見集約が可能となって集団的誤差が減少する。しかし、多様性を強調する研究は多くあるが、人の多様性を機械(計算機)でどう取り扱うか議論したものはまだ少ない。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、人と機械の組織形成による問題解決という観点から、多様性予測定理を基礎に、予測多様性の維持・拡大、平均個人誤差を削減する方法の考案である。多様性予測定理は集合知に関するもので、単純には個々の能力と集団の多様性から予測精度が決まるとするものである。我々は既に予測問題を人の予測者と機械の予測器から成る組織形成の問題として定式化し、最適組織の形成法を提案している。この多様性予測定理に基づく問題解決の考え方を拡張して、課題1：予測多様性維持法の考案、課題2：予測多様性拡大法の考案、課題3：平均個人誤差削減法の考案を実施する。

## 3. 研究の方法

3つの課題に関して以下の方針のもと研究を進める。

### (1) 予測多様性維持法の考案

予測多様性を維持するには多くの参加者を集める必要がある。それには参加者に自己に関係する問題であると認識させることが必要である。一方、情報を与えれば、付随して意見(先行成果物)も与えることになって判断の独立性(多様性)を低下させる。よって、本研究では問題情報の提供の仕方と判断の独立性の関係に着目し、その関係について分析する。

### (2) 予測多様性拡大法の考案

予測多様性を拡大するにはより広範な意見を収集する必要がある。報酬設定を工夫することで広範な意見を取り出せる可能性がある。ただし、個々の参加者にとって新たな情報を得ることの費用は異なるため、単純な報酬設定では限界がある。よって、本研究では参加者に発生する費用と全体の性能改善の関係に着目し、その関係について分析する。

### (3) 平均個人誤差削減法の考案

収集される意見にはバイアスが存在し、それが個人誤差を大きくする要因となる。よって、本研究では実環境を観察してバイアスのモデル化を行い、その上で計算論的な分析を行う。

## 4. 研究成果

本研究では、(1)予測多様性維持法の考案、(2)予測多様性拡大法の考案、(3)平均個人誤差削減法の考案の研究を行った。以下、それぞれの課題について、得られた主な成果と、その国内外における位置づけとインパクト、および今後の展望について述べる。

### (1) 予測多様性維持法の考案

#### 研究の主な成果

予測多様性維持法に関しては、逐次クラウドソーシングにおける効率的なタスク分割法を考案した。経済指標予測などの複雑な予測タスクは、複数のサブタスクに分割することで予測者の確保が容易となる。タスク分割には、消費者物価指数CPIの予測、個人消費支出PCEの予測といった同種サブタスクへの分割と、データ収集、予測モデル構築、予測モデル検証といった異種サ

ブタスクへの分割がある。前者を水平分割、後者を垂直分割と呼ぶ。垂直分割では品質面で先行サブタスクと後続サブタスクに依存関係が存在する。この垂直分割の効率性に関する議論はこれまでは実験的なものが主で理論的分析が不十分であった。この問題を解決するため、本研究ではタスク依存度を定義し、戦略的行動に関する数学的分析とシミュレーションを組み合わせることで効率性の分析を行った。その結果、垂直分割を行う場合、サブタスクを凹型配置する（難易度に関して最初のタスクを高く、中間タスクを低く、最終タスクを中程度とする）ことで、最終成果物の品質を高くできることを明らかにした。

タスク制御の考え方をさらに発展させ、中間成果物の品質認識の不確実性を考慮した適応的予算配分法を考案した。品質評価行動を導入し、部分観測マルコフ決定過程として問題を定式化することでワークフローを制御する。計算機シミュレーションを用いた評価により、作業者のスキル分布が一様で、タスク難易度が最初は高く、最後は低くなる場合に品質改善効果が最大となることを発見した。

#### 国内外における位置づけとインパクト

多くの作業者を確保する手段としてクラウドソーシングあり、人工知能分野においてもクラウドソーシングの制御に関する研究が多く行われている。本研究は予測多様性の考え方を導入することでクラウドソーシング制御をさらに発展させることに成功した。タスク分割、特に垂直分割は作業可能者を増やすが、一方で先行成果物の存在が作業の独立性を阻害する。つまり、作業者の確保と個々の作業者の能力を十分活用する形で多様性を維持することはトレードオフの関係にある。本研究は、この課題に対して一つの解を与えるものである。また、これまで別種の問題と見られてきた意見集約法とタスク割当法を橋渡しするものと見ることもできる。

本成果は、英文論文誌 Chinese Journal of Electronics、および、クラウドソーシングに関する国際ワークショップに採録された。

#### 今後の展望

本研究では、中間成果物の品質認識の不確実性を考慮に含めるなど議論を発展させてきているが、まだ品質関数や作業者スキルの分布などが既知であることを仮定している。これら前提を緩和できるように本成果を拡張する。具体的には、多腕バンディット問題の理論と統合することを目指す。

## (2) 予測多様性拡大法の考案

#### 研究の主な成果

予測多様性拡大法に関しては、フリーフロート型カーシェアリングにおける参加者間の契約に基づく分散制御法を考案した。本研究では人と機械の組織形成の考え方を物理空間上の制約を含む対象へ展開することを念頭に、カーシェアリングを題材として選択し議論を展開した。乗車希望者は、自己の周囲に利用できる車がない場合、運転中利用者に対価を支払うことで降車地点の変更を依頼する。このような契約を導入することで選択の多様性を拡大する。利用する車の決定と当該運転中利用者への支払い額の決定にはVCGオークションを用いる。さらには、物理空間上の車両の偏りを軽減するために再配置価値を定義し、その計算法を提示した。計算機シミュレーションを用いた評価により、提案法が6ケース中5ケースにおいてベースライン手法より高いサービス提供水準を達成することを、また、すべてのケースにおいて、ベースライン手法より高い社会的効用を達成することを確認した。

契約に基づく分散制御法の考え方をさらに発展させ、カーシェアリングにおいて契約解除を許容するレベル付コミットメント契約に基づく分散制御法を考案した。利用者は既に契約を結んでいても、さらに好条件の提案がくれば、違約金を支払うことで前契約を解除できる。ここで、適切な違約金額の設定法を提案している。需要が頻繁に発生する場合には、既存手法よりも高い社会的余剰を達成することを確認した。

#### 国内外における位置づけとインパクト

カーシェアリングの制御に関しては、これまで待ち行列ネットワーク、離散事象システム、オークションなどの数理的手法の適用が提案されている。本成果は、フリーフロート型カーシェアリングを組織形成問題としてモデル化し、利用者の降車場所と乗車場所の調整問題と考えることで問題解決を図っている。後述の Best paper award 受賞に見られるように、本成果は高い独自性を有するもので高い評価を得ている。特に、降車位置の変更は多様性予測定理において報酬制御による少数派意見への誘導と見ることができ、多様性予測定理を新たな問題領域に展開していると言える。

本成果は人工知能に関する最難関会議の一つである AAAI2021 に採録された。また、エージェントに関する国際会議 ICA2021 で発表し Best paper award を受賞するなど高い評価を得ている。

#### 今後の展望

本研究では、シミュレーションを用いて有効性を評価している。シミュレーションにおいては現実のカーシェアリングサービスを参考にパラメータを設定し需給の偏りなども考慮している

が、人工データでの評価に留まっている。タクシーなどの実際の乗降データと組み合わせて、より現実に近い環境で評価を行う。

### (3) 平均個人誤差削減法の考案

#### 研究の主な成果

平均個人誤差削減法に関しては、通販サイトでの評判システムにおける買収行動の影響を分析した。多くの通販サイトで利用者主導の評判システムが導入されており、商品の評判情報は後続の潜在的利用者が購入を判断する上で有用である。しかし、商品販売者が利用者を買収して評判情報を操作する詐欺行為の問題が指摘されている。評価値を平均化するなどして個人の主観によるばらつきの影響を排除しようとしても、買収という戦略的操作が加わると真の評価値の算出が困難になる。従来研究においても買収行動のモデル化が行われてきたが、それらは単独エージェント視点での分析に留まっている。現実世界では類似機能を有する商品は複数あって商品販売者は互いに競合の関係にあるにも関わらず、ゲーム理論的観点での分析が不十分であった。本研究では、まず実際の通販サイトのデータを収集し、評判情報と販売数が指数関数の関係でうまく表現できることを明らかにした。つぎに、商品販売者の効用をモデル化し、その上で商品販売者の均衡戦略を分析した。その結果、買収が無効となる条件、Nash 均衡の存在、および、均衡において社会最適な状況に比べてより多くの利用者が買収されることを明らかにした。この分析結果は、評判システムでの意見集約法の高度化に役立つものと考えられる。

#### 国内外における位置づけとインパクト

評判システムに対する戦略的操作についてはこれまで多くの議論があり、商品販売者の買収行動もその一つである。ただし、従来研究では意思決定論的観点での議論であった。本研究ではゲーム理論的観点で分析した点に独自性がある。

本成果は知識発見とデータマイニングに関する国際会議 PAKDD2022 に採録された。

#### 今後の展望

本成果は、買収行動が存在する場合の均衡分析に留まっている。この分析結果をもとに買収行動に頑健な評判システムの考案にまで研究を拡張する。

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 1件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Jiang Huan, Zuo Min, Matsubara Shigeo	4. 巻 29
2. 論文標題 Efficient Task Decomposition for Sequential Crowdsourced Task Solving	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Chinese Journal of Electronics	6. 最初と最後の頁 468 ~ 475
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1049/cje.2020.03.003	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 該当する

〔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 Koh Satoh and Shigeo Matsubara
2. 発表標題 Box-Office Prediction Based on Essential Features Extracted from Agent-Based Modeling
3. 学会等名 Principles and Practice of Multi-Agent Systems. PRIMA 2020. (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Kentaro Takahira and Shigeo Matsubara
2. 発表標題 Contract-Based Inter-User Usage Coordination in Free-Floating Car Sharing
3. 学会等名 The Thirty-Fifth AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI-21) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuto Iwata and Shigeo Matsubara
2. 発表標題 Usage Coordination Utilizing Flexible Contracts in Free-floating Car Sharing
3. 学会等名 The 5th IEEE International Conference on Agents (ICA2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Yuya Itoh and Shigeo Matsubara
2. 発表標題 Adaptive Budget Allocation for Cooperative Task Solving in Crowdsourcing
3. 学会等名 the 5th IEEE Workshop on Human-in-the-Loop Methods and Future of Work in BigData (IEEE HMDData 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 安達光太郎, 松原繁夫
2. 発表標題 ブロックチェーンシステムにおける非中央集権性を充足する合意形成メカニズム
3. 学会等名 情報処理学会第82回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 二ノ宮仁, 松原繁夫
2. 発表標題 動的環境下における誘因両立性を考慮した推薦方式の提案
3. 学会等名 情報処理学会第82回全国大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 滝井健介, 松原繁夫
2. 発表標題 クラウドソーシングにおけるアイデア生成過程の逐次改善によるタスク指示法
3. 学会等名 電子情報通信学会2020年総合大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Xin Zhou, Shigeo Matsubara, Yuan Liu, Qidong Liu
2. 発表標題 Bribery in Rating Systems: A Game-Theoretic Perspective
3. 学会等名 The 26th Pacific-Asia Conference on Knowledge Discovery and Data Mining (PAKDD2022) (国際学会)
4. 発表年 2022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		
中国	Beijing Technology and Business Univ.		
シンガポール	Nanyang Technological University		