

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20H04248

研究課題名（和文）時空間共有型サービスのためのパーソナライズドプライシング

研究課題名（英文）Personalized Pricing for Time and Space Sharing Services

研究代表者

波多野 大督 (Hatano, Daisuke)

国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・研究員

研究者番号：10709728

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 16,790,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、共有型サービスにおける信頼性を向上させるための価格設定モデルの開発を目的とする。協力ゲーム理論と機械学習の技術を組み合わせて、パーソナライズドプライシングの基盤技術の構築を試みた。

（1）ロヴァース拡張や許可構造を利用し、利用者の特徴の組合せに応じた価格設定を変更するための問題設定並びにアルゴリズムの構築をした。（2）因果における公平性を考慮したアルゴリズムを構築することで、性別や人種などの保護属性のみが異なる顧客に対し、公平な価格設定を可能とした。（3）限界貢献ネットを用いた説明手法を構築することで、従来手法が持つ欠点を克服した説明手法について検討した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

学術的には、協力ゲーム理論と機械学習を融合させることにより、共有型サービスにおける価格設定の新しいアプローチを提案する。特に共有型サービスの特性を考慮した精緻な価格設定モデルを構築するための理論的基盤を提供し、価格設定の透明性と説明可能性に焦点を当てた点は、アルゴリズムの公平性と信頼性に関する重要な知見をもたらす。

社会的には、利用者は、より公正で納得のいく価格でサービスを利用できるようになり、サービスの信頼性と質が向上する。一方、サービス提供者は価格設定の理由を明確に説明することができるため、利用者との信頼関係が強化され、持続可能なサービス運営が可能となる。

研究成果の概要（英文）：We developed a pricing model for sharing services to improve price reliability. To this end, we aimed to construct fundamental technologies for personalized pricing by combining techniques from cooperative games and machine learning.

(1) We constructed a problem setting and algorithm based on the Lovasz extension and precedence constraints for pricing, depending on the combination of customer features. (2) We developed a method that ensures more equitable pricing through causal fairness in order to provide the consistent price for customers who differ only in sensitive attributes such as gender and race. (3) We discussed an explanation method that overcomes some drawbacks of existing methods by constructing an explanation method based on marginal contribution nets.

研究分野：ゲーム理論

キーワード：協力ゲーム 費用配分問題 機械学習の公平性 説明可能AI

### 1. 研究開始当初の背景

共有型サービスが益々発展するためには信頼性を向上する必要があり、信頼性の向上には、サービスの質に応じた適切な価格設定が必要不可欠である。共有型サービスの質はサービス提供者や共同利用者の特徴に大きく依存するため、個々の情報に基づいて価格設定を行うパーソナライズドプライシングが近年注目されている。これまでにオークションなどについては価格設定の研究が盛んであったが、ライドシェアなどの時空間を共有するサービスの価格設定はあまり研究が進展していない。ライドシェアでは、共同利用者間で利用料を分配する必要があり、協力ゲーム理論の費用分配問題で解決できる。これまでに、ある種のライドシェアを含む、費用分配問題に対して最適な分配を発見する効率的なアルゴリズムが提案されている。しかし、現時点では個々の情報は考慮されておらず、以下の特徴をもつ費用分配問題を考える必要がある。まず、ライドシェアでは女性同士の方が安心するなど、利用者の特徴によりサービスの質が変わるため、質に応じた価格設定が望ましい。次に、費用分配問題を扱うための一般的な枠組みである協力ゲームでは利用者の集合が所与であるが、一般的にどの利用者がいつサービスを利用するかは未知である。最後に、価格設定は利用者に対してブラックボックスであり、利用者が価格設定の理由を理解できることが信頼性に繋がる。これらの問題はこれまであまりなされていなかった協力ゲームと機械学習の技術の融合で解決できる可能性が高い。

### 2. 研究の目的

本研究では、共有型サービスにおける信頼性を向上させるための価格設定モデルの開発を目的とする。協力ゲーム理論と機械学習の技術を組み合わせて、パーソナライズドプライシングの基盤技術の構築を試みる。具体的には、利用者の特徴に基づく価格設定、また、妥当性や信頼性を向上させる方法として、公平性指標を考慮した価格設定と価格設定の説明手法について研究する。これにより、共有型サービスの質を高め、利用者にとってより信頼できるサービスを提供するための基盤技術の構築を目指す。

### 3. 研究の方法

以下の3つの課題に焦点を当てる：

- (1) 利用者の特徴に応じた価格設定：共有型サービスでは、同じサービスでも、共同利用する利用者の特性によりその質が異なる場合があり、価格設定もそれに応じて変わるべきである。例えば、女性同士でライドシェアをした方が安心できる場合などである。本課題では、許可構造やロヴァース拡張を応用し、乗客の特徴ベクトルから適切な価格を決定する問題設定並びにそのアルゴリズムを開発する。
- (2) 公平な価格設定：(1)で考慮する価格はオプション料金と捉えることができ、性別による影響を加味するが、それ以外では、性別や人種などの保護属性のみが異なる顧客に対して、価格が変わらないことが価格設定の信頼性に繋がる。本課題では、より公平な価格設定が可能となる因果上での公平性を目標とした手法を開発する。
- (3) 価格設定の妥当性の説明：価格の妥当性を主張するためには、利用者にとって納得のいく価格設定であることが重要である。そのため、利用者が価格設定の理由を理解できるように、価格設定の透明性を確保する。この課題では、価格設定の理由を明確に示す説明可能 AI を目指す。

本研究では、協力ゲーム理論や組合せ論、機械学習の技術を駆使して、これらの課題に取り組み、共有型サービスにおける公平性や透明性を確保可能な新しい価格設定モデルを構築する。



図 1. 研究概要図

#### 4. 研究成果

##### (1) 利用者の特徴に応じた価格設定：許可構造を考慮した価格設定に関する研究[波多野 2019] 研究概要

スキルシェアリングサービスなどでは利用者の特徴により実行可能なタスクが異なる。また、そのタスク間に優先順位が存在する場合がある。例えば、タスク2と3はタスク1が完了していなければ、遂行できないなどの状況である。この場合、より上位のタスクを実行できるプレイヤーに多くの報酬を配分したいが、従来の協力ゲームでは、タスクの順序関係が表現できないため、そうなるとは限らない。

そこで、タスク間の関係が許可構造と呼ばれる有向非巡回グラフで表現された協力ゲームにおける費用配分問題として、シャプレイ値を効率的に求めるためのアルゴリズム開発を目的とする。

本研究では、まず、許可構造の簡単な場合として、ポセットアンチマトロイドに着目し、研究を進めた。ポセットアンチマトロイドでは、上位のタスクがすべて完了していなければ、そのタスクを遂行できないという制約を意味する。また、報酬を決める特性関数として各タスクの報酬を足し合わせたものが報酬となる加法的関数を仮定する。つまり、許可構造上の加法的な協力ゲームを考え、その問題に対してシャプレイ値を求めるアルゴリズムを提案した。その後、許可構造を拡張した問題としてアンチマトロイドやその拡張についても分析し、その特徴を明らかにした。

##### 貢献

本研究の貢献は以下の2点である。1つはポセットアンチマトロイド上の加法的協力ゲームに対して多項式時間アルゴリズムを構築した点でもう一つはポセットアンチマトロイドの拡張であるアンチマトロイドにおける重要な特徴を明らかにした点である。

まず、多項式時間アルゴリズムを構築するにあたり、シャプレイ値が、許可構造におけるパスという概念と非常に関連が深いことを明らかにした。このパスはポセットアンチマトロイドにおいてはノードの個数しか存在しないという性質があり、このパスがトポロジカルソートにより探索可能であることを示した。具体的に、その計算量は $O(V + E)$ である。ここで、 $V$ はグラフのノード数で $E$ はグラフの枝数を表す。

次に、この研究の拡張として、上流のタスクの内、一つでも完了していれば下流のタスクが実行できる制約を表す構造としてアンチマトロイドに拡張した問題についても分析した。この問題に対しても、シャプレイ値とパスとの関係性について明らかにすることで、効率的なシャプレイ値計算手法を提案した。

##### (2) 利用者の特徴に応じた価格設定：ロヴァース拡張を利用した価格設定に関する研究 研究概要

ライドシェアなどの利用者の特徴の組合せに応じて価格を調整する必要があるサービスに対して、従来の協力ゲームの枠組みでは対応できない点が問題である。例えば、喫煙や飲酒している人とは同乗したくないなど、利用客の特徴の組合せとサービスの利用時間に応じて価格を変化させる必要がある場合がある。この価格差はオプション料金と解釈することが可能である。従来の協力ゲームでは、利用客の特徴（性別や年齢）に応じた価格設定が困難であるため、上記のような問題設定には対応できない。その理由として、協力ゲームが特徴関数と呼ばれる集合関数上で定義されることが挙げられる。このため、各乗客に対応する距離などの、一つの情報しか活用できない。また、従来の協力ゲームでは、特性関数が所与であることが多いが、この仮定は現実問題ではあまり見られない。

そこで、本研究では以下の2点の解決を試みる。(i)特徴の組合せとサービスの利用時間に応じた価格設定、(ii)利用時間とそのときのサービスの値段から各プレイヤーの価格推定。本研究では上記の2点の問題点を解決する、シャプレイ値を推定するサンプリングアルゴリズムを提案した。

##### 貢献

(i)、(ii)を解決する方法としてロヴァース拡張に対するサンプリングアルゴリズムを提案した。具体的には、(i)について、集合関数の拡張の一つであるロヴァース拡張に着目する。ロヴァース拡張は特性関数の取りうる値を $\{0,1\}^N$ の離散空間から $[0,1]^N$ の連続空間に拡張する方法の一つである。つまり、特性関数への入力が部分集合ではなく、 $[0,1]^N$ のベクトルとなる。特性関数 $v$ を特徴の組合せによる価格の増減に対応させ、各集合が取りうる値をサービスの利用時間とすることでロヴァース拡張として自然に表現できる。例えば、 $x$ を降順にソートされた $[0,1]^N$ ベクトルとすると、これらのプレイヤーがサービスに払う料金は $\hat{v}(x) = \sum_{i=1}^n (x_{\pi(i)} - x_{\pi(i+1)})v(\{\pi(1), \dots, \pi(i)\})$ と表現できる。ここで、 $\pi(i)$ はソート後の $i$ 番目のプレイヤーを表す。ライドシェアの例では、 $x$ を利用時間ベクトル、 $v$ を利用者の特徴ベクトルの組合せから評価される値とすることで、上記の問題を自然に表現できる。(ii)について、各プレイヤーのサービス利用時間が $[0,1]^N$ から一様ランダムにサンプルされると仮定し、そのデータが $T$ 個与えられているものとする。つまり、ロヴァース拡張した特性関数に対して、シャプレイ値をサンプリング近似できればよいことを意味する。そこで、本研究ではロヴァース拡張後の特性関数におけるシャプレイ値の積分表現を求めた。具体的にはプレイヤー $i$ のシャプレイ値 $\phi_i$ は次のように計算できる。

$$\phi_i(v) = \int_{\bar{D}_i} \frac{\hat{v}(x)}{x_{\pi(1)}} dx - \int_{D_i} \frac{\hat{v}(x) - x_{\pi(n)}(\hat{v}(1_N))}{x_{\pi(1)}} dx.$$

ここで、 $\hat{v}$ は特性関数 $v$ のロヴァース拡張で、 $\bar{D}_i, D_i$ はそれぞれ $x_i$ が最大、最小となる $x$ の集合を表す。 $1_N$ は $N$ 次元の1ベクトルである。従来の積分表現では、サンプルされたサービス利用時間に1と0が含まれている必要があり、使用可能なデータに制限があったが、提案手法では、この制限を取り払うことが可能となり、より効率的なサンプリングアルゴリズムの開発が可能となった。

また、実験結果からも提案アルゴリズムの優位性が示された。図2は人工データにおける実験結果で、左から Mean squared error, データ数を増やしたときの実行時間, プレイヤー数を増やしたときの実行時間である。比較対象として従来手法であるシヨケ積分回帰を用いた。従来手法ではプレイヤー数が20以上の場合、制限時間である30分を超えたため、結果がプロットされていない。このことから、提案アルゴリズムは非常に効率的にシャプレイ値を求めることができる手法であると言える。

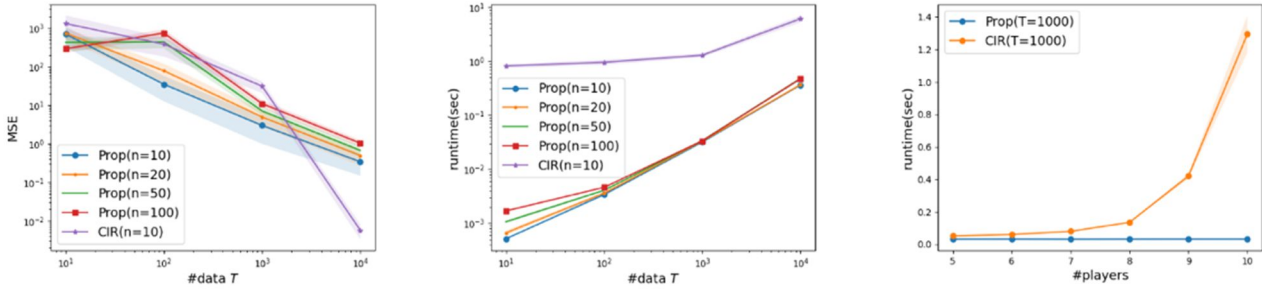


図 2. ロヴァース拡張を利用した価格設定に関する研究の実験結果

(3) 公平な価格設定: dividend を用いた経路固有反事実的公平性のための手法[波多野 et.al., 2023]

#### 研究概要

信頼性のある価格設定として、人種などの保護属性に応じて価格が変動しないことが望ましい。このような問題は機械学習における公平性で取り扱われる。本研究では、より詳細な影響を鑑みるために因果を考え、因果上での不公平なバイアスの軽減を試みる。例えば、自転車のライドシェアにおいて、非白人が多く住む地域にあまり自転車ステーションを置かないことにより、サービスの不均衡が発生する可能性があり、ステーション当たりのメンテナンスにかかる費用が白人地域よりも高くなることから非白人が多く住む地域においては自転車の利用料金が高くなる可能性がある。本研究ではこのような保護属性と因果的に関わる要素により価格が不公平に変動する状況を是正する。

このような問題は図3で示されるような因果グラフで表現される。図3は、体力を伴う職業の採用の例である。各ノードは特徴を表しており、枝は因果の影響を意味する。赤いパスは不公平な影響を表している。つまり、性別を変化させたときの子どもの数への影響を予測値に反映させるのは不公平であるが、性別と体力強度の関係性を考慮するのは公平であることを意味する。この場合、前者は社会的・文化的側面を考慮したものであるのに対して、後者は生得的な側面を考慮したものである。つまり、その国の文化などによって決まる因果を考慮するのは不適切である一方で、その人が元来もつ能力の違いについては考慮すべきである。つまり、本研究の目的は価格設定を決める予測モデル、それに関わる因果グラフと不公平なパスが与えられたときに、保護属性を変化させても、価格が変化しないように予測モデルの出力を修正する方法を提案することである。

本研究では従来手法が抱える計算時間に関する問題点を解決する手法の開発を試みた。それは、不公平なパスがその国の宗教や法律に依存し変化するため、予測モデルのローカライゼーションの際にモデルの再学習が必要な点である。これは、近年の基盤モデルのような大規模モデルに対してはより一層深刻な問題点となる。その解決策として、効率的な修正手法を提案した。

#### 貢献

効率性の問題点を解決するために、本研究では、協力ゲームで用いられる dividend を用いた不公平の修正手法を提案した。手法の流れとしては、dividend は任意の集合関数に対して一意に決定する性質をもつことから dividend 上で不公平な影響を解消するように修正し、修正後の dividend に対応する集合関数を復元することで公平な予測値を達成する。一方で、集合関数は

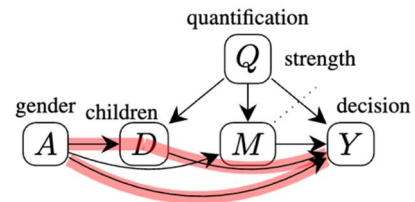


図 3 因果グラフの例

因果が考慮されていないため、直接上記の手法を適用できないという問題点がある。そこで、組合せ論で用いられている interior operator を利用して、因果を考慮した集合関数を構築した。これにより、この因果を考慮した集合関数に対応する dividend と経路固有反事実的公平性との関係が示された。予測値の修正は簡易的な式で表現できることを示した。

本提案手法は線形時間で動くことから、他の既存手法が抱える実行時間の問題を解決した初めての手法であると言える。これは実験結果からも明らかである。図4は人工データ、実データ(Adult, German credit)で実験した結果を描画したものである。図4は高い精度と低いPSEであるほど、よいアルゴリズムと言える。どのデータにおいても提案手法が既存手法よりも優れていることが示されている。また、図4

の右下は実行時間を比較したものであり、理論的結果をサポートする内容となっている。また、本研究では、単一の保護属性に対する公平性に着目した問題設定であったが、今後の展望として、交差性とよばれる、保護属性の組合せについて扱えるように公平性の定義やアルゴリズムを拡張することが考えられる。

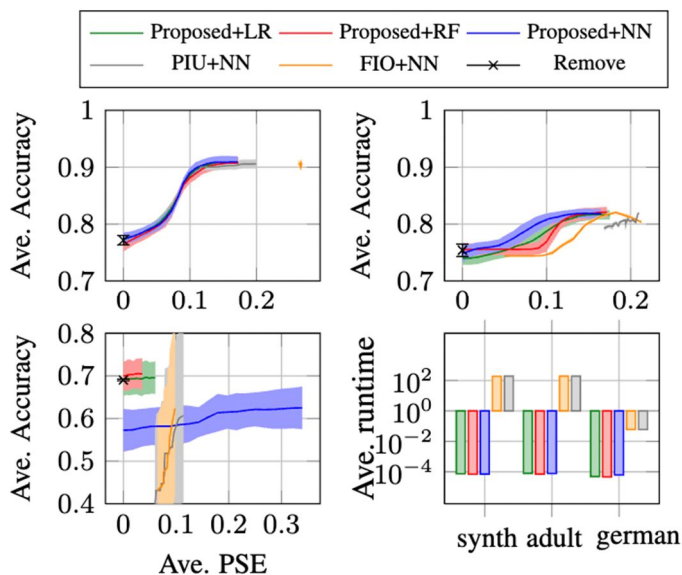


図 4. dividend を用いた経路固有反事実的公平性のための手法の実験結果(人口データ(左上), Adult(右上), German(左下), 実行時間(秒)(右下))

#### (4) 価格設定の妥当性の説明：限界貢献ネットを用いた説明手法の検討 研究概要

信頼性のある価格設定であることを主張する一つの方法として、どの特徴が価格設定に影響を与えたかを示すことが考えられる。例えば、同じサービスを利用した際に、男性と女性で価格が異なる場合、利用者は価格差がどこから来たものかを知りたくなるのは自然であり、この価格差を適切に説明できれば、サービスに対する信頼性に繋がる。これは近年機械学習で研究されている説明可能 AI によって解決可能と考えられる。典型的な説明可能 AI ではある予測モデルの出力に対して入力となる特徴ベクトルのどの特徴が予測値に寄与したかを示すことにより、説明とする。本研究では、既存の説明手法がもつ本質的な問題点について議論し、その解決法について考える。

本研究では、説明可能 AI で使用される SHAP の問題点に着目する。その問題点とは、SHAP の元となるシャプレイ値の公理をもって説明としているが、その公理の使用方法に間違いがある点である。注目すべき公理はヌルプレイヤー公理と対称性の公理である。これらの公理は端的に言うと、前者は貢献がないプレイヤーであれば、そのプレイヤーのシャプレイ値が 0 であることを示しており、後者は貢献が同じ二人のプレイヤーがいる場合、それらのシャプレイ値は同じになることを示している。説明に用いる場合、シャプレイ値を見て、その特徴の貢献度が大きければ、その特徴は予測に対する貢献度が大きいと言えるが、これは上記の公理には反する利用方法である。例えば、ヌルプレイヤー公理は予測値への貢献が 0 であれば、シャプレイ値が 0 になるが、シャプレイ値が 0 であっても予測値への貢献は 0 になるとは限らない。そこで、この問題を解決する新しい説明手法を提案することを目的とし、限界貢献ネットに基づく説明手法について検討した。

#### 貢献

本研究では上記の問題点を解消する方法として、限界貢献ネットと呼ばれる、協力ゲームで用いられる特性関数のための簡易データ構造を用いて説明とすることを考える。限界貢献ネットは命題論理のルールと値のペアの集合からなる。

本研究では、命題論理のパターンとして各リテラルが正か負のどちらか一方のみで出現することが決まっている場合、ヌルプレイヤーと対称性の公理が必要十分条件の形で成立することが示された。その一方で、ルールの個数が特徴数に対して最悪指数個になる可能性があり、人間の認知能力を超えてしまうという問題があり、この点を解決する方法を考えることが今後の課題である。

## 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 0件）

1. 著者名 Ichikawa Koji, Ito Shinji, Hatano Daisuke, Sumita Hanna, Fukunaga Takuro, Kakimura Naonori, Kawarabayashi Ken-ichi	4. 巻 38
2. 論文標題 New Classes of the Greedy-Applicable Arm Feature Distributions in the Sparse Linear Bandit Problem	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 12708 ~ 12716
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1609/aaai.v38i11.29166	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 Sumita Hanna, Ito Shinji, Takemura Kei, Hatano Daisuke, Fukunaga Takuro, Kakimura Naonori, Kawarabayashi Ken-ichi	4. 巻 36
2. 論文標題 Online Task Assignment Problems with Reusable Resources	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 5199 ~ 5207
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1609/aaai.v36i5.20455	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 Takemura Kei, Ito Shinji, Hatano Daisuke, Sumita Hanna, Fukunaga Takuro, Kakimura Naonori, Kawarabayashi Ken-ichi	4. 巻 35
2. 論文標題 Near-Optimal Regret Bounds for Contextual Combinatorial Semi-Bandits with Linear Payoff Functions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence	6. 最初と最後の頁 9791 ~ 9798
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1609/aaai.v35i11.17177	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4件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 波多野大督, 原聡, 荒井ひろみ
2. 発表標題 限界貢献を利用した不公平なモデルの修正
3. 学会等名 人工知能学会全国大会 (第37回)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 波多野大督
2. 発表標題 ポセツアンチマトロイド上の協カゲームにおける効率的なシャプレイ値計算
3. 学会等名 人工知能学会全国大会 (第35回)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Kei Takemura, Shinji Ito, Daisuke Hatano, Hanna Sumita, Takuro Fukunaga, Naonori Kakimura, Ken-ichi Kawarabayashi:
2. 発表標題 A Parameter-Free Algorithm for Misspecified Linear Contextual Bandits.
3. 学会等名 Artificial Intelligence and Statistics (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Shinji Ito, Daisuke Hatano, Hanna Sumita, Kei Takemura, Takuro Fukunaga, Naonori Kakimura, Ken-ichi Kawarabayashi:
2. 発表標題 Bandit Task Assignment with Unknown Processing Time.
3. 学会等名 Neural Information Processing Systems (国際学会)
4. 発表年 2023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	原 聡  (Hara Satoshi)  (40780721)	大阪大学・産業科学研究所・准教授    (14401)	

6. 研究組織（つづき）

	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	前原 貴憲  (Maehara Takanori)  (20751407)	国立研究開発法人理化学研究所・革新知能統合研究センター・ユニットリーダー    (82401)	削除：2020年11月10日

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