

令和 2 年 6 月 8 日現在

機関番号：12608

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K16005

研究課題名(和文) 平均時性能と最悪時性能の両方に理論保証をもつオンラインアルゴリズムの開発

研究課題名(英文) Development of online algorithms with theoretical guarantees for both average and worst case performance

研究代表者

河瀬 康志 (Kawase, Yasushi)

東京工業大学・工学院・助教

研究者番号：90734559

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：オンライン最適化の自然な確率的入力モデル化として、12種類を考察し、それぞれのモデルに対しアルゴリズムが達成できる理論性能についての関係を明らかにした。また、ビデオ広告の割当に関するオンラインアルゴリズムや、バッファ付きのオンラインナップサック問題に対するアルゴリズムの構築も行った。動的な状況でのゲーム(展開型ゲーム)に対する均衡解析や安定マッチング問題に対する近似解法の構築を、オンラインアルゴリズムの技術を用いることにより成功している。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、オンラインアルゴリズムの最悪時性能や平均時性能を評価するための枠組みについて、基本的な部分を整備することが完了できた。オンライン問題に対するアルゴリズム開発は、理論計算幾何学的に重要なだけでなく、機械学習やオペレーションズリサーチ、ネットワーク工学など様々な分野において応用上重要な課題でもある。そのため、本研究における各種入力モデルに対する統一的成果が、実際に現場でアルゴリズムを用いるときの設計指針として用いられることが期待できる。

研究成果の概要(英文)：I examined twelve types of natural stochastic input models for online optimization problems, and revealed the relationship between the theoretical performances of algorithms for the models. I have also successfully constructed an online algorithm for a video-ad allocation problem, and an algorithm for online knapsack problems with a resource buffer. In addition, by using online optimization techniques, I have analyzed equilibrium in dynamic games and constructed algorithms that find approximately stable matching.

研究分野：アルゴリズム論

キーワード：オンライン最適化 オンラインアルゴリズム 競合比解析 安定マッチング ナップサック問題 劣モジュラ関数

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

1. 研究開始当初の背景

古典的なアルゴリズムの設計や解析では、初めに全ての情報を与えられることを仮定する。しかし、この仮定は実際の応用を考えると現実的ではないことがある。例えば、株の取り引きや電車の座席予約などでは未来の情報を知ることができず、部分的な情報しかもたない状況で決断を下さなければならない。このように、入力が一つ一つ逐次的に与えられ、入力が与えられる毎に出力を行わなければならないような問題を**オンライン問題**といい、オンライン問題に対するアルゴリズムを**オンラインアルゴリズム**という。逆に、初めから入力を全て知っていることを仮定する問題を**オフライン問題**といい、オフライン問題に対するアルゴリズムを**オフラインアルゴリズム**という。オンラインアルゴリズムは、データを1つずつ読み込む毎に逐次計算を行っているともみることがもできる。そのため、データを一度に扱うことは難しい大規模データ(**ビッグデータ**)を扱う状況に対しても有用である。

オンラインアルゴリズムの性能を評価するためには、**競合比**という指標がよく用いられる。競合比とは、「オフライン問題としての最適利得」と「オンラインアルゴリズムで得られる利得」の比である。競合比を解析する上では、どのような入力モデルを仮定するかによって、複数の測り方が考えられる。理論計算機科学の分野では、最悪の入力が与えられることを仮定すること(**最悪順序モデル**)により、アルゴリズムの性能を理論的に保証するという研究が盛んに行われている。最悪順序モデルは、いわばリスクを取らない方針であり、いつでもそこその性能を示すアルゴリズムを設計できるが、現実的な入力においてはあまり性能がよくないという問題点がある。一方、機械学習などの分野では、入力はパラメータが未知である独立同一分布によって生成されていると仮定すること(**未知独立同一分布モデル**)により、平均的な性能を解析することが標準的である。しかし、入力がどのような分布に従うと仮定することが妥当であるかという問題や、想定外の状況が起きるリスクをはらんでいる。近年では、**ランダム順序モデル**というモデルも現れた。これは、入力が何が何回現れるかについては最悪の状況を考えるが、現れる順番はランダムであると仮定した場合の期待値を考えるモデルである。しかし、これも想定外の状況が起きるリスクの対策はできておらず、トレンドに変化がある場合を扱えないという問題も残っている。

2. 研究の目的

本研究では、入力モデルによる競合比の違いを比較検討することを目標とする。具体的には、競合比の値にはどのような関係があるのか、最適なアルゴリズムにはどういった違いが生じるか、複数のモデルに対して同時に競合比の意味で良いアルゴリズムをつくることはできるのかを考察する。また、そのトレードオフの大きさはどの程度であるか評価する。

さらに、リクエストアンサーゲームをランダム順序モデルなどに拡張することを検討する。これにより、**複数の入力モデルを同時に扱うための統一的な枠組みを与える**ことを目標とする。

3. 研究の方法

本研究では、具体的なオンライン問題に対し、各種入力モデルの元での競合比解析を行い、入力モデルの違いによる競合比の変化や最適なアルゴリズムの違いについて考察する。具体的な問題としては、オンラインナップサック問題、オンライン劣モジュラ最大化問題、広告割当問題を中心として扱う。また、それぞれの問題に対し複数の入力モデルに対し同時に性能が良いアルゴリズムの設計を試みる。その後、リクエストアンサーゲームの拡張により、各入力モデルの一般的な関係を考察する。これにより、入力モデルによる競合比のトレードオフを明らかにし、平均時性能と最悪時性能を同時に保証するアルゴリズムを設計する指針を与える。

4. 研究成果

具体的なオンライン問題としての課題として、ビデオ広告の割当に関するオンラインアルゴリズムの設計について最悪解析と平均解析の両面から取り組んだ。ビデオ広告割当問題は、YouTube などの動画配信サイトにおいて、どの広告をユーザーに割り当て、広告主にいくら請求するかを決めるオンライン問題である。本研究では、理論的に最適なアルゴリズムを提案し、数値実験によっても有効性を確認している。本研究の成果は人工知能のトップ会議である IJCAI において採録されている。

また、逐次的にアイテムが与えられる状況において、容量制約を満たすアイテム集合は一時的に保持できるようなオンラインナップサック問題について解析を行った。最終的に保持できる容量だけでなく、追加のバッファを用いてもアイテムを保持できるようなモデルを新たに考案し、最適なアルゴリズムの設計に成功した。この成果は ISAAC2019 に採択されている。

オンライン最適化の自然な確率的入力モデル化として、12 種類を考察し、それぞれのモデルに対しアルゴリズムが達成できる理論性能についての関係を明らかにした。「平均時性能」には様々な定義が可能であるが、このモデル化により、自然に定義できるいくつかの「平均時性能」に対して関係を明らかにするに成功した。これにより、オンラインアルゴリズムの最悪時性能や平均時性能を評価するための枠組みの基本的な部分について整備をすることが完了した。

さらに、当初の計画にはなかったが、動的な状況でのゲーム（展開型ゲーム）に対する均衡解析や安定マッチング問題に対する近似解法の構築を、オンラインアルゴリズムの技術を用いることにより成功している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計14件（うち査読付論文 14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 Kawase Yasushi, Yamaguchi Yutaro, Yokoi Yu | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Computing a Subgame Perfect Equilibrium of a Sequential Matching Game | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the 2018 ACM Conference on Economics and Computation | 6. 最初と最後の頁 131-148 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1145/3219166.3219200 | 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 Yasushi Kawase and Hanna Sumita | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Randomized Strategies for Robust Combinatorial Optimization | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the 33rd AAAI Conference on Artificial Intelligence | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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 Kawase Yasushi, Han Xin, Makino Kazuhisa | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Unit Cost Buyback Problem | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Theory of Computing Systems | 6. 最初と最後の頁 1-22 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s00224-018-9897-7 | 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 Kawase Yasushi, Yamaguchi Yutaro | 4. 巻 257 |
| 2. 論文標題 Antimatroids induced by matchings | 5. 発行年 2019年 |
| 3. 雑誌名 Discrete Applied Mathematics | 6. 最初と最後の頁 342 ~ 349 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1016/j.dam.2018.09.032 | 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 Kawase Yasushi、Miyachi Atsushi | 4. 巻 80 |
| 2. 論文標題 The Densest Subgraph Problem with a Convex/Concave Size Function | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Algorithmica | 6. 最初と最後の頁 3461 ~ 3480 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s00453-017-0400-7 | 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 Kawase Yasushi、Makino Kazuhisa、Seimi Kento | 4. 巻 80 |
| 2. 論文標題 Optimal Composition Ordering Problems for Piecewise Linear Functions | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Algorithmica | 6. 最初と最後の頁 2134 ~ 2159 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) https://doi.org/10.1007/s00453-017-0397-y | 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 Kawase Yasushi、Makino Kazuhisa、Seimi Kento | 4. 巻 80 |
| 2. 論文標題 Optimal Composition Ordering Problems for Piecewise Linear Functions | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Algorithmica | 6. 最初と最後の頁 2134 ~ 2159 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00453-017-0397-y | 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 Kawase Yasushi、Miyachi Atsushi | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 The Densest Subgraph Problem with a Convex/Concave Size Function | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Algorithmica | 6. 最初と最後の頁 1-20 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/s00453-017-0400-7 | 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, Kawase Yasushi, Fujita Sumio, Fukunaga Takuro | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Online Optimization of Video-Ad Allocation | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI2017) | 6. 最初と最後の頁 423-429 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24963/ijcai.2017/60 | 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 Yasushi Kawase and Atsushi Iwasaki | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Near-Feasible Stable Matchings with Budget Constraints | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI2017) | 6. 最初と最後の頁 242-248 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.24963/ijcai.2017/35 | 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 Constantinos Daskalakis and Yasushi Kawase | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Optimal Stopping Rules for Sequential Hypothesis Testing | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the 25th Annual European Symposium on Algorithms (ESA2017) | 6. 最初と最後の頁 32:1-32:14 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/lipics.esa.2017.32 | 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 |

| | |
|---|--------------------------|
| 1. 著者名 Yasushi Kawase, Kei Kimura, Kazuhisa Makino, and Hanna Sumita | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Optimal Matroid Partitioning Problems | 5. 発行年 2017年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the 28th International Symposium on Algorithms and Computation (ISAAC2017) | 6. 最初と最後の頁 51:1-51:13 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.4230/LIPIcs.ESA.2017.32 | 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 Yasushi Kawase and Atsushi Iwasaki | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Approximately Stable Matchings with Budget Constraints | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the 32nd AAAI Conference on Artificial Intelligence (AAAI2018) | 6. 最初と最後の頁 - |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) なし | 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 Yasushi Kawase, Hanna Sumita, and Takuro Fukunaga | 4. 巻 - |
| 2. 論文標題 Submodular Maximization with Uncertain Knapsack Capacity | 5. 発行年 2018年 |
| 3. 雑誌名 Proceedings of the 13th Latin American Theoretical Informatics (LATIN2018) | 6. 最初と最後の頁 653-668 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-319-77404-6_48 | 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 1件 / うち国際学会 4件)

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yasushi Kawase and Hanna Sumita |
| 2. 発表標題 Randomized Strategies for Robust Combinatorial Optimization |
| 3. 学会等名 33rd AAAI Conference on Artificial Intelligence (国際学会) |
| 4. 発表年 2019年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yasushi Kawase |
| 2. 発表標題 Submodular Maximization with Uncertain Knapsack Capacity |
| 3. 学会等名 The 13th Latin American Theoretical Informatics (国際学会) |
| 4. 発表年 2018年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 河瀬康志 |
| 2. 発表標題 予算制約付き安定マッチング問題に対する近似アルゴリズム |
| 3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会 最適化の基盤とフロンティア研究部会 (WOO) (招待講演) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|-----------------------------------|
| 1. 発表者名 澄田範奈, 河瀬康志, 藤田澄男, 福永拓郎 |
| 2. 発表標題 動画広告割当のオンライン最適化 |
| 3. 学会等名 日本応用数理学会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|---------------------------------------|
| 1. 発表者名 澄田範奈, 河瀬康志, 藤田澄男, 福永拓郎 |
| 2. 発表標題 動画広告割当のオンライン最適化 |
| 3. 学会等名 日本オペレーションズ・リサーチ学会関西支部研究講演会 |
| 4. 発表年 2016年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Hanna Sumita, Yasushi Kawase, Sumio Fujita, and Takuro Fukunaga |
| 2. 発表標題 Online Optimization of Video-Ad Allocation |
| 3. 学会等名 The 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence (国際学会) |
| 4. 発表年 2017年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yasushi Kawase and Atsushi Iwasaki |
| 2. 発表標題 Near-feasible stable matchings with budget constraints |
| 3. 学会等名 The 26th International Joint Conference on Artificial Intelligence (国際学会) |
| 4. 発表年 2017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 |
|--|---------------------------|-----------------------|----|
|--|---------------------------|-----------------------|----|