

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 16 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330261

研究課題名(和文) 離散構造のオンライン予測基盤技術

研究課題名(英文) Foundations for Combinatorial Online Prediction

研究代表者

畑 堃 晃平 (Hatano, Kohei)

九州大学・附属図書館・准教授

研究者番号：60404026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：離散構造のオンライン予測問題は、スケジューリング、ランキング予測、ネットワーク動的最適化など様々な分野に現れる。個々の問題については幾つかの先行研究がなされているが、統一的な方法論は確立されておらず、計算量の観点から見ても改善の余地が残されている。

本研究ではオフライン離散最適化アルゴリズムをオンライン予測手法に変換する、という汎用的なアプローチをとる。本アプローチの利点は離散最適化手法の近似精度がオンライン予測の予測精度に反映される点にある。よって、良いオフライン離散最適化手法が存在すれば、頑健なオンライン予測手法に変換出来る。

研究成果の概要(英文)：Online prediction problems of combinatorial objects arise in many applications such as scheduling, ranking and network optimization and so on. For individual problems, there are several results on robust and efficient online prediction methods. However, there is no unified approach on how to design efficient algorithms and there seems rooms for improvements.

In this project, we consider a generic approach that converts offline algorithms for combinatorial optimization into prediction algorithms. An advantage of our approach is that the prediction performance reflects the approximation performance of offline algorithms. Therefore, good offline algorithms imply good online prediction algorithms.

研究分野：機械学習、オンライン予測

キーワード：オンライン予測 離散構造 離散最適化 スケジューリング 順序 Bradley-Terry モデル ブースティング バンディット問題

1. 研究開始当初の背景

離散構造のオンライン予測問題は、スケジューリング、ランキング予測、ネットワーク動的最適化など様々な分野に現れる。個々の問題については幾つかの先行研究がなされているが、統一的な方法論は確立されておらず、計算量の観点から見ても改善の余地が残されている。

オンライン離散最適化問題に対する新しいアプローチとして Hedge アルゴリズムが挙げられる。エキスパート(予測器)の集合が与えられた下で Hedge アルゴリズムは(後から見て)最適なエキスパートにほぼ匹敵する予測を行うことができる。よって、各離散構造エキスパートとみなし Hedge アルゴリズムを適用する事により、十分良いリグレットの上界を達成できる。しかし、このアプローチは一般に非効率的である。なぜなら、多くの場合、離散構造のクラスのサイズはに関して指数的に大きいため Hedge アルゴリズムは各試行毎に指数時間を要するためである。

個々の離散構造クラスに対しては効率的なオンライン予測手法が多数知られている。例えば、k-sets, 順列, 全域木等が挙げられる。また、複数の離散構造クラスに対する汎用的なオンライン予測手法については申請者らの先行研究が知られている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、効率的かつ頑健な離散構造のオンライン予測基盤技術の確立である。本研究ではオフライン離散最適化アルゴリズムをオンライン予測手法に変換する、という汎用的なアプローチをとる。本アプローチの利点は離散最適化手法の近似精度がオンライン予測の予測精度に反映される点にある。したがって、良いオフライン離散最適化手法が存在すれば、頑健なオンライン予測手法に変換出来る。逆に、オンライン予測手法から省メモリオフライン手法を得る事も期待できる。

3. 研究の方法

本研究方法の概要を述べる。まず、(1) 離散構造をベクトルで表現することにより、(2) 問題をオンライン離散最適化問題からオンライン連続凸最適化問題に帰着させる。その上で連続凸最適化問題を解き、(3) 得られた連続解をランダムサンプリング・ラウンディングなどの手法を用いて再度離散化する。その際、オンライン連続凸最適化手法の性能を近似的に保ったまま離散化を行う。

4. 研究成果

(1) オフライン - オンライン変換

オンライン離散最適化に対するより汎用的なアプローチは、対応するオフライン離散最適化アルゴリズムをオンライン予測手法に“変換”する事である。より正確には、我々は離散構造クラスに対するオフライン近似ア

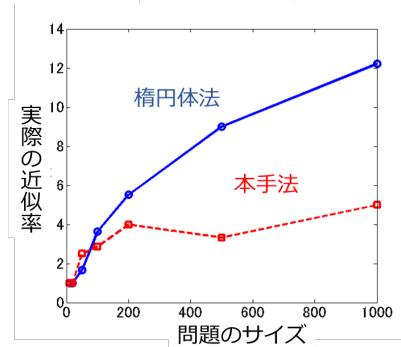
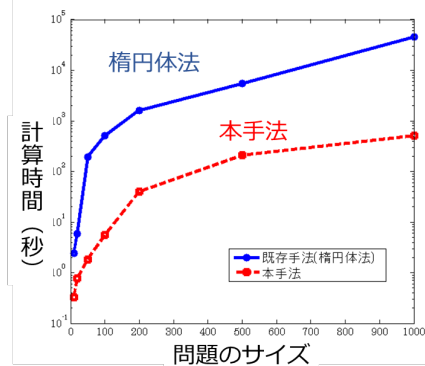


図 1: オフライン - オンライン変換における離散化(メタラウンディング)の性能比較

ルゴリズムを仮定する。

オフライン近似アルゴリズムを用いたオンライン予測法には2つの既存の結果が知られている。いずれも、近似アルゴリズムに対しては、性能が悪化する、もしくは各試行ごとの計算時間が全試行回数 T に依存する、という欠点を持つため、実用的ではない。

本研究では、近似アルゴリズムが連続緩和に基づくという仮定を設ける。この仮定は、多くのオフライン離散最適化問題が、LP 緩和に基づく近似解法を持つことから、自然であるといえる。

この仮定の下で、本結果のキーとなる概念は“メタラウンディング”である。メタラウンディングとは、LP 緩和型近似アルゴリズムにおけるラウンディング(連続解から離散解に変換するプロセス)をより頑健にしたものである。元々、メタラウンディングとはある種の離散最適化問題に対する近似アルゴリズムに対して提案された概念である。我々はメタラウンディングがオンライン離散最適化においても有効である事を示した。

特に、本結果における技術的な貢献は、プースティング手法によるメタラウンディングの構成である。プースティングとは複数の予測ルールを統合することによってより予測精度の高い予測ルールを構築する手法である。一見、何の関係のないように見えるかもしれないが、メタラウンディングとプーステ

ィングは似たような構造の問題を持ち、実際同様の最適化問題によって定式化できる。

本メタラウンディング構築手法は、楕円体法に基づく既存手法と異なり、オフライン近似アルゴリズムの近似率を知らなくても動作する。したがって、ヒューリスティクスも活用できるので応用においても有用である。予備実験において、本メタラウンディング構築手法は既存手法よりも 100 ~ 1000 倍高速であり、かつより良い近似率を達成する事を示した (図 1)。本結果は学習理論に関する国際会議 ALT2013 において受理された [9]。

(2) 順序制約付きオンラインスケジューリング問題

本研究では、複数のジョブと単一の機械、およびジョブ間の順序制約が与えられた下で、繰り返しゲーム的なオンラインスケジューリング問題を考える。この問題においては、各試行毎に、予測者は、順序制約を満たすスケジュールを決定し、その後、各ジョブの所要時間が明らかにされる。予測者の損失は全ジョブの流れ時間 (処理時間 + 待ち時間) の合計である。予測者の最終目標は、T 試行の後、後から見て最適な固定のスケジュールにほぼ匹敵する予測をオンラインで行うことである。

本研究では、オフラインの目下最良の近似アルゴリズムにほぼ匹敵するオンラインスケジューリング手法を開発した。提案手法の理論的な性能 (リグレット) は、オフライン問題に対する近似が一定以上は困難であるという計算量理論で自然な仮定の下では、最適である。本結果は学習理論に関する国際会議 ALT2015 において受理された [3]。

(3) 順序確率モデルに対するオンライン密度推定

Bradley-Terry モデルとは、複数チームの勝敗に関する古典的な確率モデルである。近年、ランキング学習や推薦アルゴリズムの発達により、その有用性から注目を集めている。このモデルに対するオンライン密度推定問題は、標準的な枠組みであるオンライン凸最適化で定式化できるが、パラメータの空間の“半径”が過大に見積もられるために、リグレット解析が不十分であった。

本研究では [1] では半径の厳密な解析を通して、従来手法の新たなリグレット評価を与えると共に、よりよいリグレット限界を持つ新手法を提案した。本結果は学習理論におけるトップ国際会議である COLT2015 に受理された [2]。

(4) その他

その他の研究として、フィードバックが限定された状況 (バンディット問題) での順列のオンライン予測手法 [5]、強化学習におけるオ

ンライン予測手法 [1,6]、行列のオンライン予測手法 [4]、モンテカルロ木探索手法 [7]、コンピュータ将棋におけるカーネル法の応用 [8] の研究を行った。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 9 件)

1. Y. Ma, T. Zhao, K. Hatano, and M. Sugiyama, “An Online Policy Gradient Algorithm for Continuous State and Action Markov Decision Processes,” *Neural Computation*, vol.28, No.3, 563-593, 2016.
2. I. Matsumoto, K. Hatano, and E. Takimoto, “Online Density Estimation of Bradley-Terry Models,” *Proceedings of the 28th Conference on Learning Theory (COLT 2015)*, JMLR W&CP 40, 1343-1359, 2015.
3. T. Fujita, K. Hatano, S. Kijima, and E. Takimoto, “Online Linear Optimization for Job Scheduling under Precedence Constraints,” *Proceedings of 26th International Conference on Algorithmic Learning Theory (ALT 2015)*, LNCS 6331, 345-359, 2015.
4. K. Moridomi, K. Hatano, E. Takimoto, and K. Tsuda, “Online matrix prediction for sparse loss matrices,” *Proceedings of the Sixth Asian Conference on Machine Learning (ACML 2014)*, JMLR W&CP 39, 250-265, 2015.
5. N. Ailon, K. Hatano, and E. Takimoto, “Bandit Online Optimization Over the Permutahedron,” *Proceedings of 25th International Conference on Algorithmic Learning Theory (ALT 2014)*, LNCS 8776, 215-229, 2014.
6. Y. Ma, T. Zhao, K. Hatano, and M. Sugiyama, “An Online Policy Gradient Algorithm for Continuous State and Action Markov Decision Processes,” *Proceedings of European Conference on Machine Learning and Principles and Practice of Knowledge Discovery in Databases (ECML/PKDD 2014)*, LNCS 8725, 354-369, 2014.
7. K. Teraoka, K. Hatano, and E. Takimoto, “Efficient Sampling Method for Monte

Carlo Tree Search,” IEICE Trans. Inf. Syst., vol. E97-D, no. 3, pp. 392-398, 2014.

8. 末廣大貴, 畑埜晃平, 坂内英夫, 瀧本英二, 竹田正幸, “SVMによる2部ランキング学習を用いたコンピュータ将棋における評価関数の学習,” 電子情報通信学会論文誌 D, vol. J97-D, no. 3, pp. 593-600, 2014.
9. T. Fujita, K. Hatano, and E. Takimoto, “Combinatorial Online Prediction via Metarounding,” Proceedings of 24th Annual Conference on Algorithmic Learning Theory (ALT 2013), LNCS 8139, 68-82, 2013.

〔学会発表〕(計 19 件)

10. 森富賢一郎, 畑埜晃平, 瀧本英二, “相対評価に基づく協調ランキング問題,” 電子情報通信学会 第 25 回 IBISML 研究会, 信学技報, vol. 115, no. 511, IBISML2015-94, 1-8, 2016.
11. 森和香菜, 畑埜晃平, 瀧本英二, “累積的でない損失関数に対するオンライン予測,” 冬の LA シンポジウム, 2016.
12. 森富賢一郎, 畑埜晃平, 瀧本英二, “相対評価に基づく協調ランキング問題,” 第 18 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2015), 2015.
13. 柴垣篤志, 小川晃平, 畑埜晃平, 竹内一郎, “特徴と標本の同時セーフスクリーニング,” 第 18 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2015), 2015.
14. 松本晃輔, 畑埜晃平, 瀧本英二, “離散最適化問題に対する ZDD 構築,” 夏の LA シンポジウム, 2015.
15. 森富賢一郎, 畑埜晃平, 瀧本英二, “マハラノビス距離のオンライン予測,” 夏の LA シンポジウム, 2015.
16. 松本一成, 畑埜晃平, 瀧本英二, “Bradley-Terry モデルのオンライン密度推定,” 電子情報通信学会 第 21 回 IBISML 研究会, 信学技報, vol. 115, no. 112, IBISML2015-21, 173-180, 2015.
17. T. Fujita, K. Hatano, S. Kijima, and E. Takimoto, “Online Linear Optimization over Permutations with

Precedence Constraints,” NIPS 2014 Workshop on Discrete Optimization in Machine Learning (DISCML), 2014.

18. I. Matsumoto, K. Hatano, and E. Takimoto, “Online Prediction with Bradley-Terry Models,” NIPS 2014 Workshop on Analysis of Rank Data: Confluence of Social Choice, Operations Research, and Machine Learning, 2014.
19. N. Ailon, 畑埜晃平, 瀧本英二, “順列に対するバンディット問題,” 第 17 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2014), 2014.
20. 森富賢一郎, 畑埜晃平, 瀧本英二, 津田宏治, “疎な損失行列に対する行列のオンライン予測,” 第 17 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2014), 2014.
21. 中園拓巳, 瀧本英二, 畑埜晃平, “組み合わせ論的 MTS 問題,” 情報処理学会 第 150 回アルゴリズム研究会 (SIGAL), 2014.
22. 藤田隆寛, 畑埜晃平, 来嶋秀治, 瀧本英二, “Online scheduling of precedence-constrained jobs on a single machine,” 情報処理学会 第 134 回アルゴリズム研究会 (SIGAL), 2014.
23. 藤田隆寛, 畑埜晃平, 来嶋秀治, 瀧本英二, “Online Linear Optimization over Permutations with Precedence Constraints,” 夏の LA シンポジウム, 2014.
24. K. Moridomi, K. Hatano, E. Takimoto, and Koji Tsuda, “Online Matrix Prediction with Log-Determinant Regularizer,” 電子情報通信学会 第 16 回 IBISML 研究会, 63-70, 2014.
25. I. Matsumoto, K. Hatano, E. Takimoto, “Online Prediction with Bradley-Terry Models and Logistic Models,” 電子情報通信学会 第 16 回 IBISML 研究会, 55-62, 2014.
26. 森富賢一郎, 畑埜晃平, 瀧本英二, “Burg ダイバージェンスを用いた行列のオンライン予測,” 第 16 回情報論的学習理論ワークショップ (IBIS2013), 2013.
27. 松本一成, 畑埜晃平, 瀧本英二, “BT モデルのオンライン推定に対するリグ

レット解析,” 第16回情報論的学習理論
ワークショップ(IBIS2013), 2013.

28. 森富 賢一郎, 畑埜 晃平, 瀧本 英二,
“Burg ダイバージェンスを用いた行列
のオンライン予測,” 夏のLAシンポジウ
ム, 2013.

〔図書〕(計 0件)

〔産業財産権〕

出願状況(計0件)

取得状況(計 0件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.i.kyushu-u.ac.jp/~hatano/>

6. 研究組織

(1)研究代表者

畑埜 晃平 (HATANO, Kohei)

九州大学・附属図書館・准教授

研究者番号: 60404026

(2)研究分担者

該当なし.

(3)連携研究者

瀧本 英二 (TAKIMOTO, Eiji)

九州大学・システム情報科学研究院・教授

研究者番号: 50236395

来嶋 秀治 (KIJIMA, Shuji)

九州大学・システム情報科学研究院・准教

授

研究者番号: 70452307

永野 清仁 (NAGANO, Kiyohito)

公立はこだて未来大学・システム情報科学

部・准教授

研究者番号: 20515176