

令和 5 年 5 月 25 日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19H04174

研究課題名(和文) 離散構造表現に基づく最適化基盤技術

研究課題名(英文) Optimization based on discrete structure representations

研究代表者

畑埜 晃平 (Hatano, KOhei)

九州大学・基幹教育院・准教授

研究者番号：60404026

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,300,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、線形制約を持つ数理最適化問題において、整数係数を持つ線形制約を非決定性ZDD(NZDD)と呼ばれるデータ構造を用いて簡潔に表現することにより、等価かつ簡潔な最適化問題(拡張定式化)を構築する方法を提案した。本手法は、線形/2次/半正定値/混合整数計画問題など多くの最適化問題のクラスに適用可能である。また、機械学習におけるスパースな線形分類学習の標準である、1ノルム正規化ソフトマージン最適化問題に対して、本手法の拡張を示した。人工データ・実データにおいて提案手法は拡張定式化を行わずに最適化ソルバーを適用するナイーブ手法に対して、多くの場合計算時間・領域の大幅な改善が得られた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

オペレーションズ・リサーチや機械学習・人工知能分野において、大規模な最適化問題を解く必要性は高まっている。本手法は大規模な線形制約の冗長性を利用して、簡潔かつ等価な最適化問題に変換するものであり、基盤技術としてその潜在的な貢献は大きいといえる。

研究成果の概要(英文)：In this project, we propose a method to obtain a concise extended formulation of a given optimization problem with linear constraints of integer coefficients, based on the Non-deterministic ZDD (NZDD) representation of the linear constraints. Our method is applicable to wide classes of optimization problems such as LP, QP, SDP and MIP. Furthermore, we propose an extension of our method to the 1-norm regularized soft margin optimization problem, a standard formulation of learning sparse linear classifiers. In the experiments on synthetic and real datasets, our method often improves computation time and maximum memory usage compared to the naive application of optimization solvers.

研究分野：機械学習

キーワード：連続最適化 離散最適化 拡張定式化 決定ダイアグラム

1. 研究開始当初の背景

最適化手法はデータに基づいた意思決定において必要不可欠な基盤技術である。資源の最適配分、スケジューリングといった OR 分野での意思決定問題や、「ビッグデータ」を活用した機械学習などで最適化は主要な役割を果たす。また、近年では、情報科学以外の分野においても最適化は有効と考えられている。例えば、材料開発における有望な化合物の探索問題も、エネルギー関数のブラックボックス最適化問題の1つと捉えられる。

これらの分野では、しばしば NP 困難な離散最適化問題を扱い、また、データの大規模化に伴い、省スペース性/計算効率性を極限まで追求することが求められる。したがって、最適化手法は、最悪時の理論評価の良さだけでなく、実際の問題/データの特徴（スパース性など）を活かした実効的な良さを合わせ持つ必要がある。本研究課題を動機づける学術的「問い」は「問題/データに内在する構造を利用し最適化手法をより効率化・省スペース化が可能か？また、どこまで可能なのか？」である。

2. 研究の目的

本研究の目的は、問題/データの構造を考慮した最適化の可能性と限界を明らかにすることである。そこで、本研究では、「問題/データの離散構造化」+「離散構造表現に基づく最適化」という新たな枠組を提案し、(i)どのような最適化問題において、(ii)どのような離散構造表現が有効か？ (iii) それら離散構造表現に対応した効率的な最適化は可能か？という一連の問題群に取り組む。本研究によって得られる最適化基盤技術は最適化手法の抜本的な高速化ないし省スペース化を達成し、「ビッグデータ」解析に大いに資するものである。

3. 研究の方法

本研究では、まず 1 ノルム正則化ソフトマージン最適化問題に焦点を絞った上で、申請者らの準備的成果である NZDD 上のハードマージン最適化問題解法の模倣手法[Fujita+, TCS20]の拡張を試みた。一方、1 ノルム正則化ソフトマージン最適化問題における線形制約は NZDD 上の動的計画法に基づいて書き換えが可能であることに着目し、拡張定式化の構築を試みた。

さらに、上記の拡張定式化手法が整数係数の線形制約を持つ一般的な最適化問題に拡張し、拡張定式化の等価性を示した。さらに様々なデータにおいて、提案手法の性能を検証を行った。

4. 研究成果

【主な成果】

整数係数の線形制約の集合に対して、それらを表現する決定ダイアグラムに基づき等価で簡潔な表現に書き換える手法（拡張定式化）を提案した（図1）。提案手法はまず（1）制約行列を表現する NZDD を構築し、（2）NZDD に基づく拡張定式化を与える。この拡張定式化は元の問題の制約数（データサイズ）には依存せず、決定ダイアグラムのサイズにのみ依存する。したがって、元の最適化問題が巨大であっても、（冗長であり）簡潔な決定ダイアグラム表現を持つならばサイズの小さい最適化問題に書き換えることができ、最適化を効率化できる。整数計画問題と 1 ノルム正則化ソフトマージン最適化問題の大規模人工データ・実データにおいて多くの場合計算時間・最大メモリ使用量の大幅な改善を示した[Kurokawa+, arXiv22].

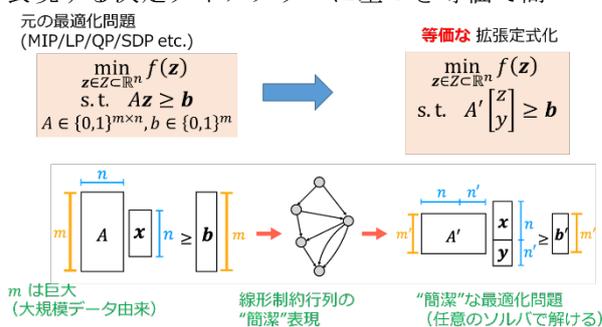


図 1: 研究成果の概要

【その他の成果】

1. 通信工学へのオンライン予測技術の応用

5G/6G 無線通信では、これまでの3G/4Gといった無線通信方式よりも高周波の電波を利用するため、より大容量の情報を高速に通信することが可能になる一方、高周波の電波は壁や障害物によって遮蔽されやすくなるため、複数の周波数や機器の候補を動的に選択する問題が生ずる。本チームでは、エジプト・サウジアラビアの研究グループと共同で、バッテリー制約下でのオンライン周波数選択問題に対して、工学的な知見に基づくヒューリスティクスを加えたバンディット手法を応用した。妥当なシミュレーション環境下では、従来のナイーブな手法や理論研究のみよりも高性能であり、最適な意思決定に十分匹敵する事を示している [Hashima+ Globecom22] (通信工学のトップ会議 Globecom2021 に採択)。他にも多数の通信工学上のオンライン意思決定問題に対して、オンライン予測手法の応用を行った。

2. オンライン意思決定問題に関する研究

オンライン予測の最悪時理論評価の限界を打破すべく、より実問題を反映した現実的かつ自然な条件下において効率的かつ頑健なオンライン予測手法の研究を行った。特に、付加情報が与えられたオンライン2値行列補完問題に対して、付加情報を加味した新しい正則化項に基づくオンライン予測手法を提案し、最適化な誤り回数上界を達成した [Liu+, ACML21] [LiuL, Mathematics22]。この研究は log-det 正則化の数少ない成功例の1つであり、オンライン凸最適化におけるケーススタディとしても重要な意味を持つ。

- 制約数が大きい場合、最大メモリ消費・計算時間（構築時間除く）を大幅に改善
- NZDD構築時間：いずれも3秒以下

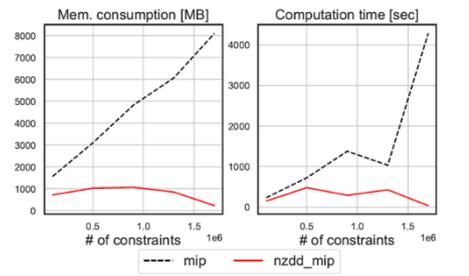


図 2: 混合整数計画問題の人工データに対する実験結果。横軸は制約数。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計22件（うち査読付論文 21件 / うち国際共著 15件 / うちオープンアクセス 9件）

1. 著者名 Yuta Kurokawa, Ryotaro Mitsuboshi, Haruki Hamasaki, Kohei Hatano, Eiji Takimoto, Holakou Rahmanian	4. 巻 arXiv:2211.06065
2. 論文標題 Extended Formulations via Decision Diagrams	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Arxiv	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) 10.48550/arXiv.2211.06065	査読の有無 無
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 該当する
1. 著者名 Hashima Sherief, Fadlullah Zubair Md, Fouda Mostafa M., Mohamed Ehab Mahmoud, Hatano Kohei, ElHalawany Basem M., Guizani Mohsen	4. 巻
2. 論文標題 On Softwarization of Intelligence in 6G Networks for Ultra-Fast Optimal Policy Selection: Challenges and Opportunities	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Network	6. 最初と最後の頁 1~9
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/MNET.103.2100587	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 Fouda Mostafa M., Hashima Sherief, Sakib Sadman, Fadlullah Zubair Md, Hatano Kohei, Shen Xuemin	4. 巻 71
2. 論文標題 Optimal Channel Selection in Hybrid RF/VLC Networks: A Multi-Armed Bandit Approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 6853 ~ 6858
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2022.3163078	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 Hashima Sherief, Fouda Mostafa M., Sakib Sadman, Fadlullah Zubair Md., Hatano Kohei, Mohamed Ehab Mahmoud, Shen Xuemin	4. 巻 9
2. 論文標題 Energy-Aware Hybrid RF-VLC Multiband Selection in D2D Communication: A Stochastic Multiarmed Bandit Approach	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Internet of Things Journal	6. 最初と最後の頁 18002 ~ 18014
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/JIOT.2022.3162135	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 Liu Yaxiong, Moridomi Ken-ichiro, Hatano Kohei, Takimoto Eiji	4. 巻 10
2. 論文標題 An Online Semi-Definite Programming with a Generalized Log-Determinant Regularizer and Its Applications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Mathematics	6. 最初と最後の頁 1055 ~ 1055
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/math10071055	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 -

1. 著者名 Mohamed Ehab Mahmoud, Hashima Sherief, Hatano Kohei, Aldossari Saud Alhajaj	4. 巻 22
2. 論文標題 Two-Stage Multiarmed Bandit for Reconfigurable Intelligent Surface Aided Millimeter Wave Communications	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2179 ~ 2179
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/S22062179	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 該当する

1. 著者名 Hashima Sherief, Mohamed Ehab Mahmoud, Hatano Kohei, Takimoto Eiji	4. 巻
2. 論文標題 WiGig Wireless Sensor Selection Using Sophisticated Multi Armed Bandit Schemes	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2021 Thirteenth International Conference on Mobile Computing and Ubiquitous Network (ICMU)	6. 最初と最後の頁 1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.23919/ICMU50196.2021.9638849	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 Hashima Sherief, Fouda Mostafa M., Fadlullah Zubair Md, Mohamed Ehab Mahmoud, Hatano Kohei	4. 巻
2. 論文標題 Improved UCB-based Energy-Efficient Channel Selection in Hybrid-Band Wireless Communication	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of 2021 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)	6. 最初と最後の頁 1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/GLOBECOM46510.2021.9685996	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 Yaxiong Liu, Ken-ichiro Moridomi, Kohei Hatano, Eiji Takimoto	4. 巻 PMLR 157
2. 論文標題 An online semi-definite programming with a generalised log-determinant regularizer and its applications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of The 13th Asian Conference on Machine Learning	6. 最初と最後の頁 1113 ~ 1128
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yaxiong Liu, Xuanke Jiang, Kohei Hatano, Eiji Takimoto	4. 巻 PMLR 157
2. 論文標題 Expert advice problem with noisy low rank loss.	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of The 13th Asian Conference on Machine Learning	6. 最初と最後の頁 97 ~ 1112
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 オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Mohamed Ehab Mahmoud, Hashima Sherief, Hatano Kohei, Aldossari Saud Alhajaj, Zareei Mahdi, Rihan Mohamed	4. 巻 10
2. 論文標題 Two-Hop Relay Probing in WiGig Device-to-Device Networks Using Sleeping Contextual Bandits	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications Letters	6. 最初と最後の頁 1581 ~ 1585
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LWC.2021.3074972	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 Hashima Sherief, Hatano Kohei, Kasban Hany, Mahmoud Mohamed Ehab	4. 巻 21
2. 論文標題 Wi-Fi Assisted Contextual Multi-Armed Bandit for Neighbor Discovery and Selection in Millimeter Wave Device to Device Communications	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 2835 ~ 2835
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/S21082835	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 該当する

1. 著者名 Mohamed Ehab Mahmoud, Hashima Sherief, Hatano Kohei, Fouda Mostafa M., Fadlullah Zubair Md	4. 巻 70
2. 論文標題 Sleeping Contextual/Non-Contextual Thompson Sampling MAB for mmWave D2D Two-Hop Relay Probing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Vehicular Technology	6. 最初と最後の頁 12101 ~ 12112
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TVT.2021.3116223	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 Liu Yaxiong, Hatano Kohei, Takimoto Eiji	4. 巻 LNCS 12607
2. 論文標題 Improved Algorithms for Online Load Balancing	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Proceedings of the 47th International Conference on Current Trends in Theory and Practice of Computer Science(SOFSEM 2021)	6. 最初と最後の頁 203 ~ 217
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-67731-2_15	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 Fujita Takahiro, Hatano Kohei, Takimoto Eiji	4. 巻 806
2. 論文標題 Boosting over non-deterministic ZDDs	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Theoretical Computer Science	6. 最初と最後の頁 81 ~ 89
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.tcs.2018.11.027	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 Suehiro Daiki, Hatano Kohei, Takimoto Eiji, Yamamoto Shuji, Bannai Kenichi, Takeda Akiko	4. 巻 32
2. 論文標題 Theory and Algorithms for Shapelet-Based Multiple-Instance Learning	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Neural Computation	6. 最初と最後の頁 1580 ~ 1613
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1162/neco_a_01297	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 Hashima Sherief, Hatano Kohei, Takimoto Eiji, Mahmoud Mohamed Ehab	4. 巻 24
2. 論文標題 Neighbor Discovery and Selection in Millimeter Wave D2D Networks Using Stochastic MAB	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Communications Letters	6. 最初と最後の頁 1840 ~ 1844
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LCOMM.2020.2991535	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 Mohamed Ehab Mahmoud, Hashima Sherief, Aldosary Abdallah, Hatano Kohei, Abdelghany Mahmoud Ahmed	4. 巻 20
2. 論文標題 Gateway Selection in Millimeter Wave UAV Wireless Networks Using Multi-Player Multi-Armed Bandit	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Sensors	6. 最初と最後の頁 3947 ~ 3947
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/s20143947	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 該当する

1. 著者名 Hashima Sherief, Hatano Kohei, Takimoto Eiji, Mohamed Ehab Mahmoud	4. 巻 -
2. 論文標題 Minimax Optimal Stochastic Strategy (MOSS) For Neighbor Discovery and Selection In Millimeter Wave D2D Networks	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Proceedings of the 23rd International Symposium on Wireless Personal Multimedia Communications (WPMC 2020)	6. 最初と最後の頁 1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/WPMC50192.2020.9309495	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 Mahmoud Mohamed Ehab, Hashima Sherief, Hatano Kohei, Kasban Hani, Rihan Mohamed	4. 巻 65
2. 論文標題 Millimeter-Wave Concurrent Beamforming: A Multi-Player Multi-Armed Bandit Approach	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Computers, Materials & Continua	6. 最初と最後の頁 1987 ~ 2007
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.32604/cmc.2020.011816	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 該当する

1. 著者名 Hashima Sherief、ElHalawany Basem M.、Hatano Kohei、Wu Kaishun、Mohamed Ehab Mahmoud	4. 巻 10
2. 論文標題 Leveraging Machine-Learning for D2D Communications in 5G/Beyond 5G Networks	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Electronics	6. 最初と最後の頁 169 ~ 169
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/electronics10020169	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 該当する

1. 著者名 Miyake Fumito、Takimoto Eiji、Hatano Kohei	4. 巻 LNCS 11638
2. 論文標題 Succinct Representation of Linear Extensions via MDDs and Its Application to Scheduling Under Precedence Constraints	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Proceedings of the 30th International Workshop on Combinatorial Algorithms(IWOCA 2019)	6. 最初と最後の頁 365 ~ 377
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1007/978-3-030-25005-8_30	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6件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 1件)

1. 発表者名 黒河祐太, 三星諒太郎, 浜崎晴輝, 畑埜晃平, 瀧本英二, Horakou Rahmanian
2. 発表標題 決定ダイアグラムに基づく線形制約付き最適化問題の拡張定式化
3. 学会等名 OR学会 春季研究発表会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 畑埜 晃平
2. 発表標題 決定ダイアグラムに基づく最適化問題の拡張定式化
3. 学会等名 フォレストワークショップ2022 (招待講演)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Kohei Hatano
2. 発表標題 Extended formulations via decision diagrams
3. 学会等名 MIRAI 2.0 AI-TEG Workshop Theoretical aspects and foundations of AI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒河 祐太, 三星 諒太郎, 浜崎晴輝, 畑埜 晃平, 瀧本 英二, Holakou Rahmanian
2. 発表標題 決定ダイアグラムに基づく拡張定式化
3. 学会等名 IBIS2022
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 黒河 祐太, 三星 諒太郎, 畑埜 晃平, 瀧本 英二, Holakou Rahmanian
2. 発表標題 データの決定ダイアグラム表現に基づく1ノルム正則化ソフトマージン最適化
3. 学会等名 IBIS2021
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 三星諒太郎; 畑埜晃平; 瀧本英二
2. 発表標題 線形計画法に基づくブースティング手法の収束性解析
3. 学会等名 IBIS2019
4. 発表年 2019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	瀧本 英二 (Takimoto Eiji) (50236395)	九州大学・システム情報科学研究院・教授 (17102)	

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			
米国	Amazon			
サウジアラビア	Prince Sattam Bin Abdulaziz University			
米国	Idaho State University,			
カナダ	Western University			