

令和 4 年 5 月 30 日現在

機関番号：13903
研究種目：基盤研究(B) (一般)
研究期間：2019～2021
課題番号：19H02138
研究課題名(和文) 無線通信系におけるデータ駆動アルゴリズムデザインの新展開

研究課題名(英文) Data-driven Algorithm Design for Wireless Communications

研究代表者
和田山 正 (Wadayama, Tadashi)

名古屋工業大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：20275374
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究計画においては、無線通信系アルゴリズムに対するデータ駆動アルゴリズム設計について研究を行ってきた。その成果として、現在、「深層展開」と呼ばれるアルゴリズム構築のための方法論の確立に一定の貢献ができたものと考えている。研究成果は大きく分けて、1) 信号処理アルゴリズムにおける深層展開の適用に関する研究、2) 学習された結果に関する理論的解釈に関する研究に類別できる。1)については、スパース信号推定アルゴリズムTISTAの開発、深層展開に基づくMIMO信号検出アルゴリズムの開発などが代表的な研究である。2)については、チェビシェフステップに関する理論的研究などがある。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究の目的は、無線通信系アルゴリズムに対するデータ駆動アルゴリズムデザインの原理を確立し、その原理に基づいて従前のアルゴリズムより優れた特性を持つアルゴリズムを創出することである。最適推定原理から演繹的に導出された反復推定アルゴリズムに対して、適切に学習可能パラメータを組み込み、さらに訓練データに基づいてそれらのパラメータを調整する手法をデータ駆動アルゴリズムデザインと呼ぶ。通常反復推定アルゴリズムを展開表現することで多層ニューラルネットワークと見立て、与えられた訓練データに基づき深層学習に基づくパラメータの調整を行うことにより、従来法では達成が困難であった性能が実現できる。

研究成果の概要(英文)：A data-driven approach for developing signal processing algorithms for wireless communications has been the primal target of this project. We have established the methodology called "deep unfolding" for constructing a new signal processing algorithms. The outputs of this project can be classified into two categories: 1) applications of deep unfolding for signal processing algorithms, 2) theoretical studies regarding the trained results. The first category includes our sparse signal reconstruction algorithm TISTA and trainable signal detection algorithms for MIMO wireless communications. The second category contains the works regarding Chebyshev steps, which can explain the trained results of deep unfolded gradient descent.

研究分野：情報通信工学

キーワード：深層学習 機械学習 無線通信 信号処理 深層展開

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

将来的に 5G を超える高速大容量・高信頼・低遅延・大規模接続を可能とする無線ネットワーク技術の構築が目標とされている。その実現のために、無線信号の伝達を担う無線物理層においては無線通信系アルゴリズム(MIMO(Multiple-Input Multiple-Output)信号検出、プリコーディング、送信電力制御、無線資源配分最適化、通信路推定、誤り訂正符号の復号)の高性能化が強く求められている。通信系アルゴリズムを構成するために人工知能(AI)/機械学習の活用が世界的に検討されている。特に深層学習のアイデアに基づく通信系アルゴリズムの利活用は有望な方向性として認識されており、研究の発展が求められている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、無線通信系アルゴリズムに対するデータ駆動アルゴリズムデザインの原理を確立し、その原理に基づいて従前のアルゴリズムより優れた特性を持つアルゴリズムを創出することである。最適推定原理から演繹的に導出された反復推定アルゴリズムに対して、適切に学習可能パラメータを組み込み、さらに訓練データに基づいてそれらのパラメータを調整する手法をデータ駆動アルゴリズムデザインと呼ぶ。通常反復推定アルゴリズムを展開表現することで多層ニューラルネットワークと見立て、与えられた訓練データに基づき深層学習に基づくパラメータの調整を行うことにより、従来法では達成が困難であった性能が実現できる。

3. 研究の方法

深層学習技術は、深層ニューラルネットワークの学習に利用できるだけでなく、入出力を伴う“微分可能な反復型アルゴリズム”の内部パラメータ最適化に適用可能である。従前から知られている優れた反復型アルゴリズムを基礎として、その内部に学習可能パラメータを埋め込むことで、データに基づく学習可能性をもつ柔軟な派生アルゴリズムを構成できる。このアプローチを深層展開と呼ぶ。本プロジェクトでは、深層展開に関して応用的視点、理論的視点より研究を進めてきた。研究の体制としては、代表者の和田山は、高邊賢史氏(当時、名工大助教、現在東工大准教授)とともに応用的研究(スパース信号推定、MIMO 信号推定、スパース CDMA)とともに理論的研究(チェビシェフステップの理論)の研究を行ってきた。一方、研究分担者の林は、光ファイバ通信における深層展開の可能性を追求してきた。研究の成果として得られた結果については主に IEEE の国際会議、ならびに国際ジャーナルに発表をしてきている。

4. 研究成果

申請代表者らは本基盤 B 課題において、深層展開の信号処理アルゴリズム設計における有用性を示してきた。例えば、スパース信号再現アルゴリズム TISTA に関する論文:

D.Ito, S. Takabe, and T. Wadayama, "Trainable ISTA for sparse signal recovery," IEEE Transactions on Signal Processing, vol.67, pp. 3113 -- 3125, 2019.

は深層展開の有用性を実証した成果として広く認められている。この論文は IEEE Transactions on Signal Processing (IF: 5.028)において論文アクセスの上位 50 論文が入る Popular Items リストに 1 年半以上、継続的にリスト入りするなど世界的にも認知されている。さらに深層展開を MIMO 信号検出問題に適用した成果である

S.Takabe, M. Imanishi, T. Wadayama, R. Hayakawa, and K. Hayashi, "Trainable projected gradient detector for massive overloaded MIMO channels: data-driven tuning approach," IEEE Access, vol.7, pp. 93326 -- 93338, 2019.

において、従来知られていた深層学習技術による信号処理アルゴリズムの改善(例えば LISTA [Gregor2010])とは異なり、ステップサイズ系列など極めて少数のパラメータに限り学習可能とすることが学習コストと性能改善の両面で有益であることを申請者らは世界で初めて明らかにした。

また、分担研究者の林は光ファイバ通信における深層展開の有効性を実証した:

M.Arikawa and K.Hayashi, "Transmitter and receiver impairment monitoring using

adaptive multi-layer linear and widely linear filter coefficients controlled by stochastic gradient descent,' Optics Express, vol.29, pp. 11548 --11561,2021.

M.Arikawa and K.Hayashi, ``Adaptive equalization of transmitter and receiver IQ skew by multi-layer linear and widely linear filters with deep unfolding,' Optics Express, vol.28, pp. 23478 -- 23494, 2020.

これらの研究では、光ファイバにおける非線形ひずみの発生要因ごとに分割した層状の通信路モデルの潜在パラメータを学習データから調整するという新しいアプローチの有効性を実証した研究となっている。一方、深層展開により学習された結果に関して理論的な解釈を与えるというモチベーションから生まれたチェビシェフステップに関する理論的研究は次の論文にその成果がまとめられている：

S. Takabe and T. Wadayama, ``Convergence Acceleration via Chebyshev Step: Plausible Interpretation of Deep-Unfolded Gradient Descent'' IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics, Communications and Computer Sciences, to appear, 2022.

T. Wadayama and S. Takabe, ``Chebyshev Periodical Successive Over-Relaxation for Accelerating Fixed-Point Iterations,' IEEE Signal Processing Letters, vol. 28, pp. 907--911, 2021

これらの研究は、深層展開の研究から派生して生まれた研究であるが、深層展開が単に反復アルゴリズムの性能改善手法にとどまらず、新しい技術的知見を見出すための方法論となっていることを示す成果であると捉えることができる。

さらに、本プロジェクトの研究成果について研究分野を超えて知っていただくためのアウトリーチ活動の一環として、

深層展開に基づく信号処理アルゴリズムの設計 収束加速とその理論的解釈 電子情報通信学会 基礎境界ソサエティ Fundamentals Review

に解説記事を書いており、この記事は本プロジェクトの成果を知るためのまとまった資料となっている。

まとめると本研究プロジェクトにより深層展開というアルゴリズム設計のための新たな方法論の基礎を確立ができたと考えている。本基盤Bプロジェクトを引き継ぐ、研究プロジェクトである基盤Aプロジェクトに関する研究もすでに順調に開始されている状況であり、深層展開に関する重要な研究成果が今後さらに得られることが期待される。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計7件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 4件）

1. 著者名 Takabe Satoshi, Yamauchi Yuki, Wadayama Tadashi	4. 巻 9
2. 論文標題 Deep-Unfolded Sparse CDMA: Multiuser Detector and Sparse Signature Design	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 40027 ~ 40038
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2021.3064558	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 Takabe Satoshi, Wadayama Tadashi, Hayashi Masahito	4. 巻 68
2. 論文標題 Asymptotic Behavior of Spatial Coupling LDPC Coding for Compute-and-Forward Two-Way Relaying	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 4063 ~ 4072
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TCOMM.2020.2987891	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 Kishida Masako, Ogura Masaki, Yoshida Yuichi, Wadayama Tadashi	4. 巻 8
2. 論文標題 Deep Learning-Based Average Consensus	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 142404 ~ 142412
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2020.3014148	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 Arikawa Manabu, Hayashi Kazunori	4. 巻 29
2. 論文標題 Transmitter and receiver impairment monitoring using adaptive multi-layer linear and widely linear filter coefficients controlled by stochastic gradient descent	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 11548 ~ 11548
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.416992	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 Arikawa Manabu, Hayashi Kazunori	4. 巻 28
2. 論文標題 Adaptive equalization of transmitter and receiver IQ skew by multi-layer linear and widely linear filters with deep unfolding	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Optics Express	6. 最初と最後の頁 23478 ~ 23478
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1364/OE.395361	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 Takabe Satoshi, Imanishi Masayuki, Wadayama Tadashi, Hayakawa Ryo, Hayashi Kazunori	4. 巻 7
2. 論文標題 Trainable Projected Gradient Detector for Massive Overloaded MIMO Channels: Data-Driven Tuning Approach	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Access	6. 最初と最後の頁 93326 ~ 93338
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ACCESS.2019.2927997	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 Daisuke Ito, Satoshi Takabe, and Tadashi Wadayama	4. 巻 67
2. 論文標題 Trainable ISTA for sparse signal recovery	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Signal Processing	6. 最初と最後の頁 3113-3125
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TSP.2019.2912879	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 -

〔学会発表〕 計6件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 6件)

1. 発表者名 S. Takabe and T. Wadayama
2. 発表標題 Deep Unfolded Multicast Beamforming
3. 学会等名 IEEE Globecom 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Takabe, Y. Yamauchi and T. Wadayama
2 . 発表標題 Trainable Projected Gradient Detector for Sparsely Spread Code Division Multiple Access
3 . 学会等名 IEEE International Conference on Communications (ICC 2020) (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 S. Takabe, T. Wadayama, and Y. C. Eldar
2 . 発表標題 Complex Trainable ISTA for Linear and Nonlinear Inverse Problems,
3 . 学会等名 IEEE ICASSP 2020 (国際学会)
4 . 発表年 2020年

1 . 発表者名 T. Wadayama and S. Takabe
2 . 発表標題 Deep Learning-Aided Trainable Projected Gradient Decoding for LDPC Codes
3 . 学会等名 IEEE International Symposium on Information Theory (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1 . 発表者名 T. Wadayama
2 . 発表標題 Data-Driven Tuning of Projected Gradient Algorithms for Signal Recovery Problems
3 . 学会等名 11th Asia-Europe Workshop on Concepts in Information Theory (国際学会)
4 . 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Takabe, M. Imanishi, T. Wadayama and K. Hayashi,
2. 発表標題 Deep Learning-Aided Projected Gradient Detector for Massive Overloaded MIMO Channels
3. 学会等名 IEEE International Conference on Communications (国際学会)
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	林 和則 (Hayashi Kaunori) (50346102)	京都大学・国際高等教育院・教授 (14301)	

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
---------	---------