

令和 6 年 6 月 7 日現在

機関番号：32682

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2023

課題番号：20K04425

研究課題名（和文）進化的スタックトオートエンコーダを用いた多層ニューラルネットによる電力価格予測法

研究課題名（英文）Electricity Price Forecasting with Evolutionary Stacked Auto-Encode of Multi-Layered Artificial Neural Network

研究代表者

森 啓之 (Hiroyuki, Mori)

明治大学・総合数理学部・専任教授

研究者番号：70174381

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では、事前学習法のオートエンコーダーの改良法と浅層ニューラルネットの一般化ラジアル基底関数ニューラルネットワークから構成される深層ニューラルネットワークを用いた電力価格予測法を提案した。オートエンコーダーの改善法として、深層オートエンコーダーと学習データにノイズを加えて精度向上したノイズイングオートエンコーダを合成したオートエンコーダを用いた。一般化ラジアル基底関数ニューラルネットワークを改善するため、ニューロン間の重みとラジアル基底関数のガウス関数のパラメータを進化的計算Brain Storm Optimizationで学習する手法を開発した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

電力市場取引が活発化につれて、電力市場の多くのプレーヤーが正確な電力価格予測値を得ることで、電力市場のプレーヤーの電力取引が利益を最大化することや電力市場のプレーヤーの電力取引がリスクを最小化することに関心がある。よって、複雑な電力価格変動をより正確に予測することは電力市場において優位な立場をとることが可能であるため、電力市場のプレーヤーから高精度な電力価格予測モデル開発の必要性が高い。その結果、本研究は非常に社会的意義がある研究成果である。

研究成果の概要（英文）：This research proposed a deep neural network for electricity price forecasting that consists of modified Autoencoder of pretraining and Generalized Radial Basis Function Network to generalize Radial Basis Function Network. This research makes use of staged denoising Autoencoder as the modified Autoencoder, and a learning method for Generalized Radial Basis Function Network with Brain Storm Optimization to determine weights between hidden and output units and parameters of the Gaussian function.

研究分野：電力工学

キーワード：電力価格予測 電力市場 深層学習 深層ニューラルネットワーク オートエンコーダー 進化的計算

1. 研究開始当初の背景

1990年にイギリスで電力自由化が開始された後、欧米などの先進国では、電力市場が開設され、電力取引が活発に実施されている。他方、わが国では、2004年にJPEX(日本卸電力取引所)が卸電力取引を開始したが、その当時は電力取引量は10%前後であるため、欧米に比べて電力自由化は遅れを取っている。2015年に開始した電力システム改革により発送電分離で電力取引の活発化が期待されている。電力市場において電力市場プレーヤーは電力売買を効率的に行うために正確な電力価格情報が必要である。電力市場における電力価格時系列はネットワークの運用状態、気象条件、国民の関心があるイベント開催、災害などの影響により、複雑な振舞いをするため、その動特性を把握することは容易でない。競争環境下の電力系統運用・計画における電力価格予測は利益最大化/リスク最小化の観点から種々の電力市場プレーヤーにとって、重要な課題である。電力自由化前の電力系統の予測問題では電力負荷予測が主な課題であり、電力負荷予測を通じて様々な手法が開発されてきた。電力負荷予測と電力価格予測を比較すると、次のような相違点がある。

1) 電力価格時系列の時系列分散 (Volatility) は電力負荷時系列の時系列分散 (Volatility) よりも高い特徴を持つ。換言すれば、電力価格時系列は、高い非線形性や不確定性を持つ。

2) 上記の1)に関連して、送電系統の送電線における混雑等の影響によって送電系統に電力不足が生じることで、突発的に電力価格が高騰するスパイク(突発的に出現する非常に高価な電力価格)が発生し、その取り扱いが容易でない。

これまでに開発された電力価格予測法を分類すると、次のように分類できる。

a) 統計的モデル

b) ニューラルネット

上記のa)は、ARIMA(自己回帰差分移動平均)モデルやARCH(分散自己回帰)モデルなどを用いた手法であり、パラメータが定数であるため適用性に欠ける難点がある。また、上記のb)は非線形近似に有効なニューラルネットを用いた手法であるが、従来の手法は、電力価格におけるスパイクの存在の取り扱いが困難なため、予測誤差が多い手法であった。

そこで、「予測精度向上の視点から、従来のニューラルネット手法を超えた手法としてどのような手法があるか」という問いがある。電力市場では、高精度の電力予測モデルを入手することができれば、配電系統運用者は事前に価格高騰のリスクを回避することができる。他方、発電業者は、事前に価格高騰を予知できれば、ビジネスチャンスとして利益を得ることができる。その有力な解の候補として深層ニューラルネット(Deep Neural Network, 以後、DNNと略記)がある。ここで、DNNとは、4層以上からなるニューラルネットを構築しているモデルである。本来、多層パーセプトロン(Multi-layer Perceptron, 以後、MLPと略記)などのMLPを4層以上に形成すると、学習データの強い依存から起きる過学習、層が深くなるにつれて浅層の重みの勾配が問題となる勾配消失問題が発生し、結果が悪化することがある。ニューラルネットにおいて、層を増加させることは学習をより効果的に行えることもあり、高精度なモデルを作るため、これらの問題を解決する必要があった。その対策として挙げられることが事前学習手法を導入したニューラルネットである

2. 研究の目的

本研究の目的は電力市場の電価価格予測のためのオートエンコーダに基づくDNNの基本的モデルの予測精度を向上させることである。「予測精度向上の視点から、従来のニューラルネット手法を超えた手法としてどのような手法があるか」という問いに対して、本研究では、従来のニューラルネットよりも高精度で予測値を予測できるDNNを提案する。時系列予測に特化した事前学習手法として図1で示すオートエンコーダに着目する。オートエンコーダとは2006年にHintonらによって提案されたニューラルネットワークの事前学習法の一つであり、DNNを構築する手法の一つである。オートエンコーダの原理は3層のMLPを考え、入力層に n 次元のベクトル X を入力したとき、出力層にベクトル X が出るニューラルネットワークを考える。但し、隠れ層のユニットの次元 m は n より小さいことを仮定する。入力層を隠れ層で次元圧縮することで、データの特徴を抽出することが可能である。前述のとおりオートエンコーダの最大の特徴は入力と出力が同じであり、次元圧縮後に出力データに入力データを復元していることである。図2に示すオ

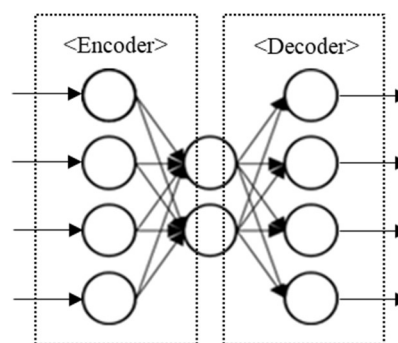


図1 オートエンコーダの構造

オートエンコーダと多層パーセプトロン (MLP) を融合した基本的な DNN を基本モデルと見なす。ここで、オートエンコーダと MLP は、それぞれ特徴抽出法と予測手法として機能する。

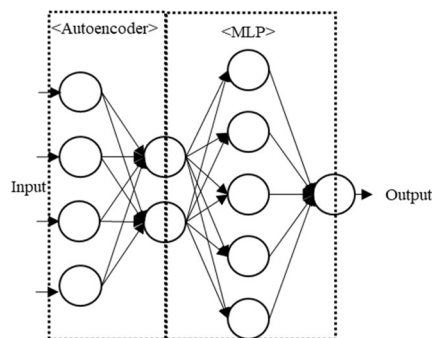


図2 深層ニューラルネット (DNN)

3. 研究の方法

具体的な研究の方法として次のことを行った。

(1) 図2のオートエンコーダの精度向上のため、次の手法を検討する。

- ① データの類似性により、学習データにクラスタリングを使用し、各クラスター毎にDNNの基本的モデルを構築する。
- ② オートエンコーダの改良法としてデノイズング・オートエンコーダを使用する。
- ③ 3層以上のオートエンコーダを意味するスタックド・オートエンコーダを使用する。
- ④ デノイズング・オートエンコーダとスタックド・オートエンコーダを融合したモデルを開発する。

(2) オートエンコーダのニューロンの結合状態の

重みと接続状態の有無を高性能進化的計算 Brain Storm Optimization (BSO) で大域的に最適化する。

(3) DNNの基本モデルのMLPの部分をもっとMLPより、非線形近似能力が高いラジアル基底関数ネットワーク (Radial Basis Function Network, 以後、RBFNと略記) や一般化ラジアル基底関数ネットワーク (Generalized Radial Basis Function Network, 以後、GRBFNと略記) に置き替えることによって、予測モデルの精度向上を図る。

(4) DNNと信号処理分野のスパースモデリングの融合手法として Least Absolute Shrinkage and Selection Operator (以後、Lassoと略記)-GRBFN や Extrema Learning Machine (以後、ELMと略記) 型 RBFN についてモデル開発する。

(5) 開発された予測モデルを米国 ISO-New England の実データに適用し、その

4. 研究成果

(1) 研究の主な成果

① 雑誌論文 (査読付き)

[1] 三輪陸人, 森啓之: 「BSOを用いた Lasso-GRBFNによる電力価格予測」、電気学会論文誌 C, Vol. 143, No.2, pp.125-132(2023-2)

② 学会発表

a) 国際会議 (査読付き)

[2] Kodai Yamada and Hiroyuki Mori, "A Deep Learning Technique for Electricity Price Forecasting in Consideration of Spikes," Proc. of IEEE TENCON2021(Virtual Meeting), 6 pages (2021-12).

[3] Kotaro Watanabe and Hiroyuki Mori, "A New Forecasting Method for Wind Power Generation Output with Wavelet ELM-Type Radial Basis Function Network," Proc. of IEEE PES ISGT2023-Asia, 5 pages, Auckland, New Zealand (2023-11).

[4] Kodai Yamada and Hiroyuki Mori, "Practical Application of Deep Modified Autoencoder Technique to Electricity Price Forecasting," Proc. of IEEE IAS/PES ETFG2023, 6 pages, Wollongong, Australia (2023-12).

b) 国際 Workshop の口頭発表 (査読付き)

[5] Kodai Yamada and Hiroyuki Mori, "Modified Denoising Autoencoder for Electricity Price Forecasting," The Third International Workshop on Smart Power and Energy (SPE2020) (Virtual Meeting), Tokyo (2020-11).

[6] Kodai Yamada and Hiroyuki Mori, "An Efficient Denoising Autoencoder for Electricity Price Forecasting," The Fourth International Workshop on Smart Power and Energy (SPE2021) (Virtual Meeting), Tokyo (2021-11).

c) 国内研究会、全国大会等の口頭発表 (査読なし)

[7] 山田航大, 森 啓之: 「デノイズイング・オートエンコーダを用いた米国電力市場の LMP 予測」、令和二年電気学会 B 部門大会、論文 II、論文番号 153、オンライン開催(2020-9)

[8] 山田航大, 森啓之: 「スパイクを考慮した深層ニューラルネットワークによる LMP 予測」、令和二年電気学会電力技術/電力系統技術合同研究会、PE-2020-103/PSE-20-108、オンライン開催(2020-9)

[9] 山田航大, 森啓之: 「改良型デノイズイング・オートエンコーダを用いた深層ニューラルネットワークによる電力価格予測」、令和3年電気学会全国大会、論文番号 6-130、オンライン開催(2021-3)

[10] 山田航大, 森啓之: 「スタックド・デノイズイング・オートエンコーダを用いた電力価格予

測」、令和三年電気学会電力技術/電力系統技術合同研究会、PE-2021-130/PSE-21-143、オンライン開催(2021-9)

[11] 三輪陸人、森啓之:「スパースオートエンコーダーを用いた深層ニューラルネットワークによる電力価格予測」、令和4年電気学会電力・エネルギー部門大会、論文II 論文番号 128、福井大学(2022-9)

[12] 渡辺航太郎、森啓之:「レベル4のウェーブレット変換を用いたELM型RBFNによる電力価格予測」、令和5年電気学会電力技術/電力系統技術合同研究会、PE-23-195/PSE-23-187、熊本大学(2023-9)

[13] 渡辺航太郎、森啓之:「ELM型RBFNを用いた深層ニューラルネットワークによる電力価格予測」、令和6年電気学会全国大会、論文番号 6-094、徳島大学(2024-3)

(2) 得られた成果の国内外における位置づけとインパクト

電力市場の電価価格予測において国内外で改良型オートエンコーダとニューラルネットワークから構成されるDNNを使用した研究は皆無であったため、2023年12月にIEEE IASとPESの共催の国際会議ETFG2023では高評価を得た。

(3) 今後の展望

電価価格予測は電力市場において重要な分野であるため、引き続き研究を進めていく必要がある。

以上

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計4件（うち査読付論文 4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 Miwa Rikuto, Mori Hiroyuki | 4. 巻 143 |
| 2. 論文標題 A LASSO-GRBFN-based Method for Electricity Price Forecasting with BSO | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Electronics, Information and Systems | 6. 最初と最後の頁 125 ~ 132 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejieiss.143.125 | 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 Yamada Kodai, Mori Hiroyuki | 4. 巻 None |
| 2. 論文標題 A Deep Learning Technique for Electricity Price Forecasting in Consideration of Spikes | 5. 発行年 2021年 |
| 3. 雑誌名 Proc. of IEEE TENCON2021 | 6. 最初と最後の頁 744-749 |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TENCON54134.2021.9707319 | 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 Watanabe Kohtaro, Mori Hiroyuki | 4. 巻 None |
| 2. 論文標題 A New Forecasting Method for Wind Power Generation Output with Wavelet ELM-Type Radial Basis Function Network | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Proc. of IEEE ISGT Asia 2023 | 6. 最初と最後の頁 6 pages |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/ISGTAsia54891.2023.10372795 | 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 Yamada Kodai, Mori Hiroyuki | 4. 巻 None |
| 2. 論文標題 Practical Application of Deep Modified Autoencoder Technique to Electricity Price Forecasting | 5. 発行年 2023年 |
| 3. 雑誌名 Proc. of EFTG2023 | 6. 最初と最後の頁 6 pages |
| 掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/EFTG55873.2023.10408176 | 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10件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 2件）

| |
|---|
| 1. 発表者名 三輪陸人、森啓之 |
| 2. 発表標題 スパースオートエンコーダを用いた深層ニューラルネットワークによる電力価格予測 |
| 3. 学会等名 令和4年電気学会電力・エネルギー部門大会 |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Rikuto Miwa and Hiroyuki Mori |
| 2. 発表標題 Deep GRBFN for Short-term Load Forecasting |
| 3. 学会等名 The Fifth International Workshop on Smart Power and Energy (SPE2022) (国際学会) |
| 4. 発表年 2022年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田航大 森 啓之 |
| 2. 発表標題 スタックド・デノイズイング・オートエンコーダを用いた電力価格予測 |
| 3. 学会等名 令和3年電気学会電力技術/電力系統技術合同研究会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 Yamada Kodai and Mori Hiroyuki |
| 2. 発表標題 An Efficient Denoising Autoencoder for Electricity Price Forecasting |
| 3. 学会等名 The Fourth International Workshop on Smart Power and Energy (SPE2021) |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田航大、森 啓之 |
| 2. 発表標題 デノイズイング・オートエンコーダを用いた米国電力市場のLMP予測 |
| 3. 学会等名 令和2年電気学会電力・エネルギー部門大会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田航大、森 啓之 |
| 2. 発表標題 スパイクを考慮した深層ニューラルネットワークによるLMP予測 |
| 3. 学会等名 令和2年電気学会電力技術/電力系統技術合同研究会 |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 山田航大、森 啓之 |
| 2. 発表標題 改良型デノイズイング・オートエンコーダを用いた深層ニューラルネットによる電力価格予測 |
| 3. 学会等名 令和3年電気学会全国大会 |
| 4. 発表年 2021年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 Yamada Kodai and Mori Hiroyuki |
| 2. 発表標題 Modified Denoising Autoencoder for Electricity Price Forecasting |
| 3. 学会等名 TheThird International Workshop on Smart Power and Energy (SPE2020) (国際学会) |
| 4. 発表年 2020年 |

| |
|--|
| 1. 発表者名 渡辺航太郎, 森啓之 |
| 2. 発表標題 レベル4のウェーブレット変換を用いたELM型RBFNによる電力価格予測 |
| 3. 学会等名 令和5年電気学会電力技術/電力系統技術合同研究会 |
| 4. 発表年 2023年 |

| |
|---|
| 1. 発表者名 渡辺航太郎, 森啓之 |
| 2. 発表標題 ELM型RBFNを用いた深層ニューラルネットワークによる電力価格予測 |
| 3. 学会等名 令和6年電気学会全国大会 |
| 4. 発表年 2024年 |

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

| |
|--|
| 明治大学総合数理学部インテリジェントシステム研究室 https://hmori2911.wixsite.com/ndis14 |
|--|

| | | |
|---------------------------|-----------------------|----|
| 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 |

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 |
|---------|---------|
|---------|---------|