

令和 3 年 5 月 27 日現在

機関番号：10101

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2018～2020

課題番号：18K18840

研究課題名（和文）トポロジー最適化と深層学習の共進化による回転機の高速最適設計の実現

研究課題名（英文）Fast optimization of rotating machines realized by coevolution of topology optimization and deep learning

研究代表者

五十嵐 一（Igarashi, Hajime）

北海道大学・情報科学研究院・教授

研究者番号：90212737

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 4,800,000円

研究成果の概要（和文）：電気自動車の駆動モータを始めとする電気機器の開発では、制約条件を満たし、かつ優れた性能を持つ構造を見出す必要がある。穴の生成消滅を含めて機器形状を自由に变形して最適構造を探索するトポロジー最適化は、このような複雑な最適設計問題に有効である。しかし電気機器のトポロジー最適化では、膨大な回数の電磁界有限要素解析を伴うため、実行に長い計算時間を必要としており、これが実利用の大きな障害となっていた。本研究では深層学習により機器特性を予測することで、トポロジー最適化の計算時間を大幅に短縮できることを初めて示した。開発した高速最適化法は、電気機器のみならず広い対象の設計に有効である。

研究成果の学術的意義や社会的意義

深層学習は画像認識や音声認識など様々な分野に応用されている。しかし最適設計など設計・開発への応用は多くなかった。本研究では、深層学習によりトポロジー最適化が高速化できることを初めて示した。高速化により、製品の性能が向上できるのみならず、深層学習に与える学習データも豊富に取得できる。さらに得られたデータにより深層学習機の推定精度が向上する。このように、両者が共進化できることを明らかにした。

研究成果の概要（英文）： In the design of electric apparatus such as traction electric motors for EVs, we need to find the optimal machine structure that gives excellent performance satisfying the constraints. The topology optimization, which searches for the optimal structure by freely deformation allowing generation and annihilation of holes, is fairly suitable for such complicated design problems. This method, however, has difficulties for real uses due to large number of electromagnetic field computations during the optimization process. In this study, I have shown that the computing time can drastically be reduced by the deep learning which predicts the machine characteristics. This method can be applied not only to the design of electric apparatus but also to that of other devices and systems.

研究分野：最適設計

キーワード：トポロジー最適化 深層学習 遺伝的アルゴリズム 電磁界解析 モータ

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

電気自動車の駆動モータを始めとする回転機的设计では、複雑な相関を持つ多数の特性量に関する仕様を満足しつつ、限られた時間内で性能を最大化しなければならない。トポロジー最適化は寸法等を変数とする従来法とは異なり、穴の生成消滅を含めて機器形状を自由に変形し、目的の仕様を満たす機器構造を探索する。トポロジー最適化により、性能要求を満たす新しい回転機構造を発見できるため、研究者のみならず、講習会が開催されるなど産業界から注目が集まっている。しかし電気機器のトポロジー最適化には膨大な回数の電磁界有限要素解析を伴うため、実行に数日～数週間を必要としており、これが実利用の大きな障害となっていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、本研究は回転機を始めとする電気機器のトポロジー最適化の計算時間を大幅に短縮する方法を開発することにある。また高速化したトポロジー最適化により、回転機の新しい構造の見出すことを目指す。

3. 研究の方法

本研究ではトポロジー最適化の高速化のため、深層学習(Deep Learning)を活用する。図1に本手法の概要を示す。深層学習は、画像・音声認識において従来の機械学習を大きく凌駕する性能を示している。

回転機のトポロジー最適化では、遺伝的アルゴリズムに基づき多数の異なる形状の回転機(個体)を生成し、特性量(トルク、損失等)を有限要素法により解析する。評価値が低い個体は淘汰され、高い個体は次世代に生き残る。この世代交代を繰り返すと、最終的に最適形状が得られる。本研究では、この過程で生成された多様な機器形状-特性データを深層ニューラルネットワーク(NN: neural network)に教示し、未知の入力形状に対して機器特性を高速かつ精度よく予測する深層 NN を得る。本研究では、トポロジー最適化においてほとんどの時間を要していた有限要素法による回転機特性の評価を、有限要素法より格段に高速な深層 NN に代替させることで計算時間を短縮する。開発した方法では、深層 NN により上位クラスと判定された個体のみ、有限要素法により評価を行う。進化を左右する優良個体のみ精密評価を行うことで、最適解への進化に影響を与えずに計算時間を短縮する。

4. 研究成果

図2(a)に研究対象の磁石埋め込み型(IPM: inner permanent magnet)モータと、トポロジー最適化の設計領域および形状を表すためのガウス基底の配置を示す。図2(b)は基準とした従来型 IPM モータである。図2(a)のモデルに対してトポロジー最適化を適用し、その過程で得た個体により、畳み込み NN(CNN: convolutional NN)を構成した。この事前最適化では、平均トルクを最大化した。CNN にはモータ断面画像を入力し、平均トルク T_{ave} とトルクリプル T_{rip} のクラスを予測させた。予測結果を表1, 2に示す。いずれの場合も、高い精度でクラスを予測できることがわかった。つぎに構成した CNN を用いて、最適化問題

$$F_2 = 1.3 \frac{T_{\text{ave}}}{T_{\text{ave}}^0} - 0.3 \frac{T_{\text{rip}}}{T_{\text{rip}}^0} \rightarrow \max. \quad (1)$$

を解いた。ここで添え字 0 がある量は、基準モデル図2(b)の量を示す。最適化では、CNN のトルク特性予測結果に基づき、表3に示す確率で有限要素解析を実施した。図3に P4, P5 の場合の最適化結果を示す。P4 の場合、基準モデルに比平均トルク、トルクリプル(トルク変動)ともに改善されていることわかる。この最適化では、通常のトポロジー最適化に比約 10% の計算量で最適化ができた。一方、P5 は全く有限要素解析を行わず、CNN のみの評価に基づいて最適化した結果である。この場合、最適化は極めて高速であるが、トルクリプルの改善率が低い。

図4は CNN によるトルク性能予測を用いて、損失が基準以下になるように最適化した結果を示す。CNN により図4(a)の領域に入ると予測された優良個体のみ、損失解析を行う。これにより有限要素法の解析回数を減らし、最適化時間を短縮する。CNN は個体数を減らした事前最適化により構築した。図4(b)に示すように CNN を用いた主最適化で、事前最適化を上回る結果が得られている。図4(c), (d)に典型的な最適形状を示す。

CNN を用いることにより、トルク性能に関する分類のみならず、回帰も行うことができる。図5に平均トルクとトルクリプルの回帰結果を示す。いずれも良好な回帰ができています。

CNN をモータ断面画像から平均トルクを予測させるように学習させた後、CNN が画像のどこに注目しているのかを Grad-CAM により可視化できる。この注目領域は平均トルクへの寄与が大きいと考えられるため、この領域を除外してトルクリプルを最適化する方法を開発した(図6)。図7に結果を示す。本手法により、従来の方法で得られたパレート解よりも良好な解が得られることがわかった。

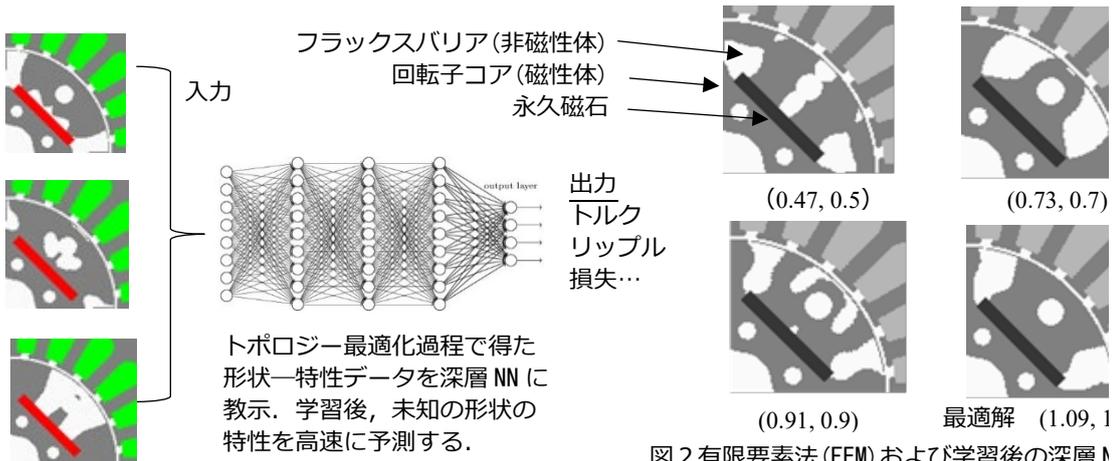


図 1 回転機特性の深層 NN への教示

図 2 有限要素法 (FEM) および学習後の深層 NN による平均トルク (T_{FEM} , T_{NN}) の評価結果

図 1 深層学習による回転機断面画像からのトルク特性推定

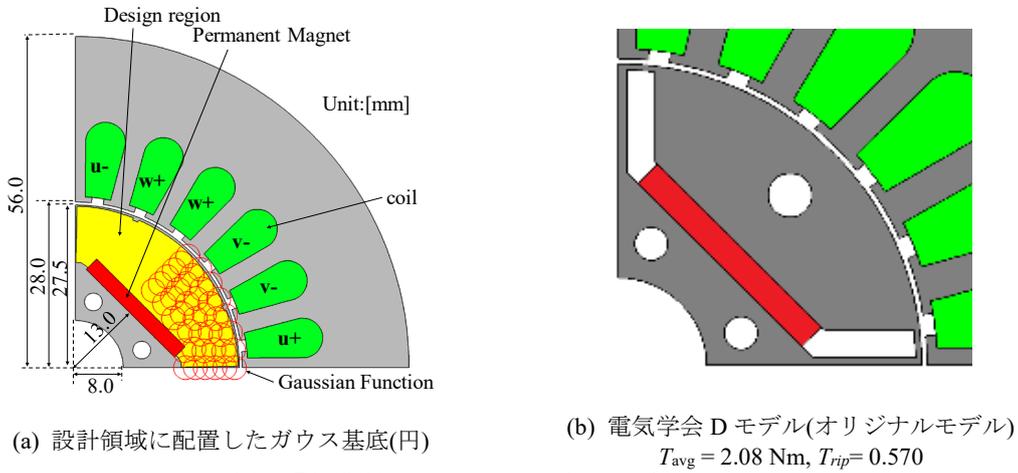


図 2 最適化対象の IPM モータとオリジナルモデル

表 1 CNN による平均トルクのカテゴリ分類結果
 行は有限要素法の解析に基づく分類結果, 列は CNN による分類結果

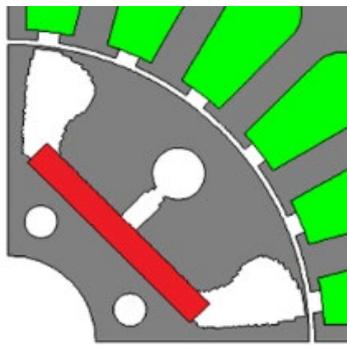
		Label by CNN								TOTAL
		0	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	
Label by FEM	0	520	29	4	3	2	1	0	0	559
	0.5	15	452	47	1	0	0	0	0	515
	0.6	0	38	482	49	0	0	0	0	569
	0.7	0	1	38	518	23	0	0	0	580
	0.8	0	0	0	18	390	12	0	0	420
	0.9	0	0	0	3	18	473	15	0	509
	1	0	0	0	0	0	10	396	16	422
	1.1	0	0	0	0	0	0	8	418	426
TOTAL	535	520	571	592	433	496	419	434	4000	

表 2 CNN によるトルクリップルのカテゴリ分類結果

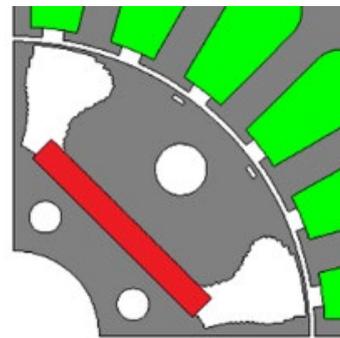
		Label by CNN							TOTAL	
		0.6	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2		1.3
Label by FEM	0.6	627	411	53	51	7	28	17	25	1219
	0.7	182	644	186	72	12	14	12	23	1145
	0.8	50	267	589	187	33	38	23	15	1202
	0.9	25	92	223	689	175	96	44	16	1360
	1	12	59	93	259	425	301	72	27	1248
	1.1	10	38	62	105	172	680	240	34	1341
	1.2	24	51	56	55	154	295	520	103	1258
	1.3	18	42	55	58	16	160	291	587	1227
TOTAL	948	1604	1317	1476	994	1612	1219	830	10000	

表3 最適化過程での有限要素解析の実行確率
 目的関数値を CNN で評価し、その結果に基づいて有限要素法による精密評価の実行確率を決める。

Labels of F_2	probabilities [%]				
	P_1	P_2	P_3	P_4	P_5
1.3	100	100	100	100	0
1.2	100	100	50	25	0
1.1	100	100	25	13	0
1	100	50	13	7	0
0.9	100	25	7	4	0
0.8	100	13	4	2	0
0.7	100	7	2	1	0
0	100	0	0	0	0

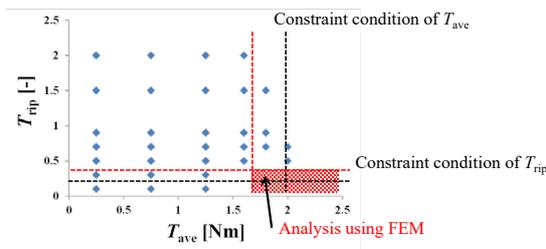


(a) P4 の場合 $T_{avg} = 2.22 \text{ Nm}$, $T_{rip} = 0.126$

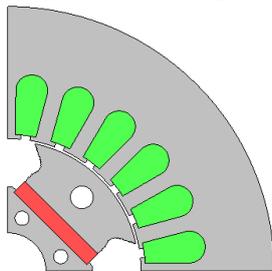


(b) P5 の場合 $T_{avg} = 2.21 \text{ Nm}$, $T_{rip} = 0.210$

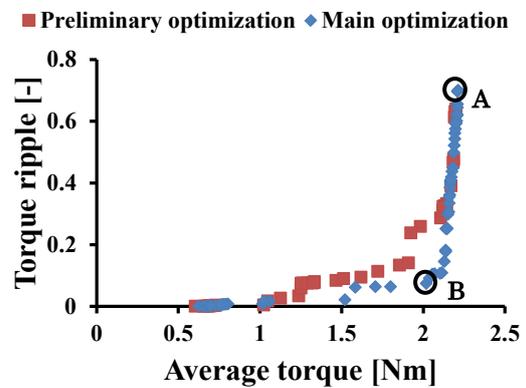
図3 最適化結果. P4 の場合, 約 10% の計算コストで良好な結果が得られた。



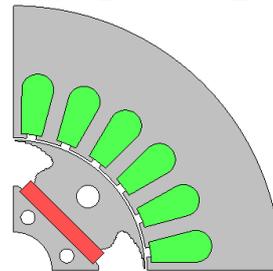
(a) 有限要素解析を実施する領域



(c) A の構造 $T_{avg} = 2.21 \text{ Nm}$, $T_{rip} = 0.700$

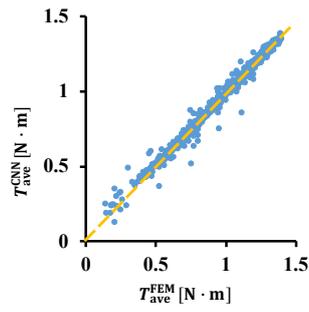


(b) 事前最適化と主最適化結果

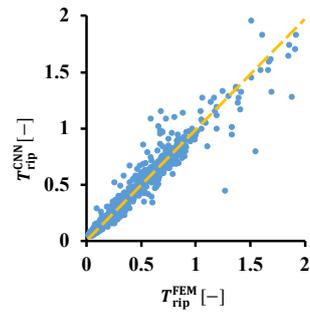


(d) B の構造 $T_{avg} = 2.02 \text{ Nm}$, $T_{rip} = 0.074$

図4 最適な 2次元永久磁石配列と磁界分布. は点 P と設計領域の距離を表す



(a) 平均トルク $\rho = 0.996$



(b) トルクリップル $\rho = 0.959$

図 5 CNN によるトルク性能の回帰

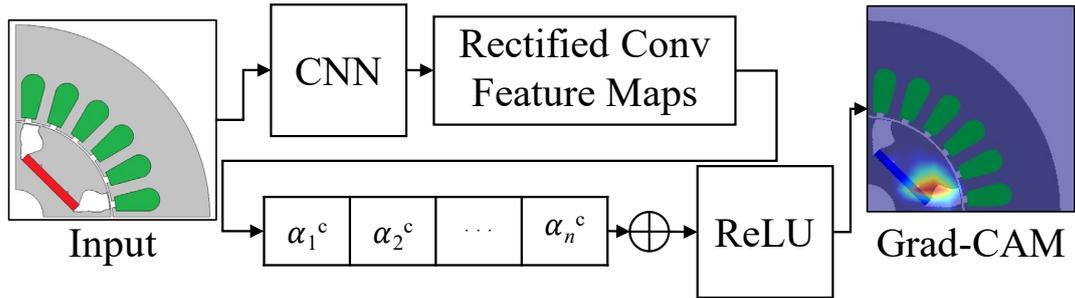
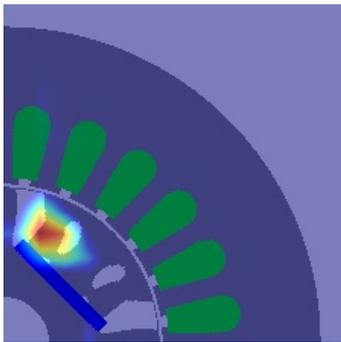
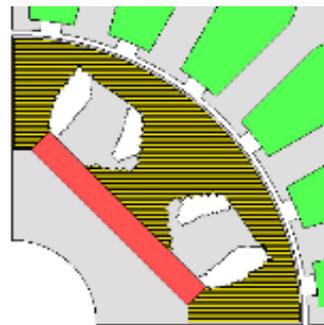


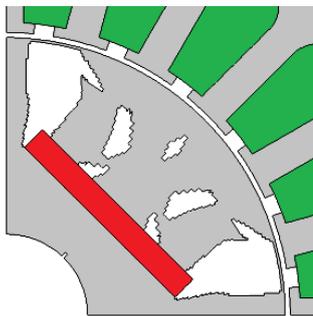
図 6 Grad-CAM による深層 NN の注目領域の抽出



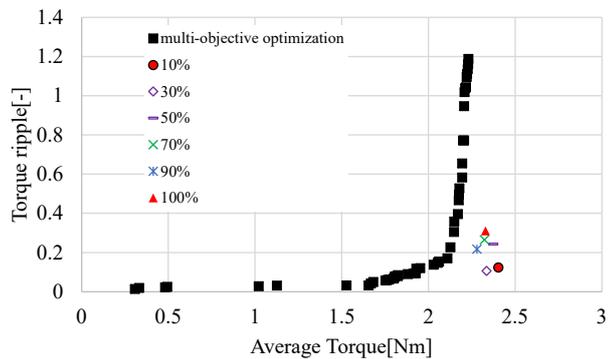
(a) Grad-CAM の出力(注目領域)



(b) トルクリップルの最適化領域
(平均トルクに鈍感な領域)



(c) トルクリップルの最適化結果の例



(d) Grad-CAM に基づく最適化結果と通常のトポロジー最適化により得られたパレート解

図 7 Grad-CAM を用いた設計領域の抽出と最適化結果

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計11件（うち査読付論文 11件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 8件）

1. 著者名 佐々木 秀徳, 日高 勇気, 五十嵐 一	4. 巻 140
2. 論文標題 深層学習を用いたトポロジー最適化-同時および追加学習の比較-	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 電気学会論文誌B	6. 最初と最後の頁 858 ~ 865
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejpes.140.858	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 H. Sasaki, Y. Hidaka, H. Igarashi	4. 巻 Early access
2. 論文標題 Explainable Deep Neural Network for Design of Electric Motors	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~4
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3063141	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 Y. Otomo, H. Igarashi	4. 巻 60
2. 論文標題 3-D Topology Optimization of Magnetic Cores for Wireless Power Transfer with Double-Sided Winding Coils	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics	6. 最初と最後の頁 S115, S123
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3233/JAE-191110	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 J. Asanuma, S. Doi, H. Igarashi	4. 巻 56
2. 論文標題 Transfer Learning through Deep Learning: Application to Topology Optimization of Electric Motor	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 7512404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2019.2956849	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 H. Sakamoto, K. Okamoto, H. Igarashi	4. 巻 56
2. 論文標題 Fast Analysis of Rotating Machine Using Simplified Model-Order Reduction Based on POD	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 506104
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2019.2947300	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 Y. Otomo, H. Igarashi, Y. Hidaka, T. Komatsu, M. Yamada	4. 巻 56
2. 論文標題 3-D Topology Optimization of Claw-Pole Alternator Using Gaussian-Basis Function With Global and Local Searches	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 7504604
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2019.2952205,	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 S. Shimokawa, H. Oshima, K. Shimizu, Y. Uehara, J. Fujisaki, A. Furuya, H. Igarashi	4. 巻 vol.54, no.11
2. 論文標題 Fast 3-D Optimization of Magnetic Cores for Loss and Volume Reduction	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 8400904
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2018.2841364	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 K. Itoh, H. Nakajima, H. Matsuda, M. Tanaka, H. Igarashi	4. 巻 vol. E101.C, no.10
2. 論文標題 Development of Small Dielectric Lens for Slot Antenna Using Topology Optimization with Normalized Gaussian Network	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Electronics	6. 最初と最後の頁 784, 790
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transele.E101.C.784	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 H. Sasaki, H. Igarashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Topology Optimization Accelerated by Deep Learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	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) 10.1109/TMAG.2019.2901906	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 S. Doi, H. Sasaki, H. Igarashi	4. 巻 -
2. 論文標題 Multi-Objective Topology Optimization of Rotating Machines Using Deep Learning	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	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) 10.1109/TMAG.2019.2899934	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 Y. Fangzhou, H. Igarashi	4. 巻 vol.6, no.1
2. 論文標題 Topology Optimization of Metamaterial Using Gaussian-Basis Functions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Journal of Advanced Simulation in Science and Engineering	6. 最初と最後の頁 149, 156
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.15748/jasse.6.149	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22件 (うち招待講演 2件 / うち国際学会 11件)

1. 発表者名 H. Sato, S. Hiruma, H. Igarashi
2. 発表標題 Multi-material Topology Optimization of Permanent Magnet Motor with Arbitrary Adjacency Relationship of Materials
3. 学会等名 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 S. Hiruma, M. Ohtani, S. Soma, Y. Kubota, H. Igarashi
2. 発表標題 Novel Hybridization of Parameter and Topology Optimizations: Application to Permanent Magnet Motor
3. 学会等名 19th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation (CEFC2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 五十嵐一
2. 発表標題 モーター磁気回路設計へのトポロジー最適化および深層学習の適用
3. 学会等名 第1回 自動車技術会モータ技術部門委員会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青柳泰我, 大友佳嗣, 五十嵐一, 佐々木秀徳, 日高勇氣, 有田秀哲
2. 発表標題 深層学習による永久磁石モータの電流特性推定とトポロジー最適化への適用
3. 学会等名 電気学会静止器回転機合同研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 青柳 泰我, 佐藤 駿輔, 大友 佳嗣, 五十嵐 一
2. 発表標題 多目的トポロジー最適化による多様な永久磁石モータ形状の生成
3. 学会等名 MAGDAコンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 林 翔吾, 五十嵐 一, 比留間 真悟
2. 発表標題 制約条件を考慮した永久磁石モータの多材料多目的最適化
3. 学会等名 MAGDAコンファレンス2020
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 K. Okamoto, H. Sakamoto, H. Igarashi
2. 発表標題 Implementation of Simplified Model Order Reduction Based on POD for Dynamic Simulation of Electric Motors
3. 学会等名 Compumag2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 K. Okamoto, H. Igarashi
2. 発表標題 Topology Optimization of Electric Motor Using Gaussian Basis Functions for Reduction of Mechanical Vibration
3. 学会等名 Compumag2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Doi, H. Igarashi
2. 発表標題 On Efficient Use of Deep Learning for Acceleration of Topology Optimization for Rotating Machine
3. 学会等名 Compumag2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Gong, Y. Otomo, H. Igarashi
2. 発表標題 Multi-Objective Topology Optimization of Circular Magnetic Couplers for Wireless Power Transfer
3. 学会等名 ISEM2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Otomo, H. Igarashi,
2. 発表標題 Topology Optimization of Magnetic Couplers for Wireless Power Transfer Considering Electromagnetic Shields
3. 学会等名 IECON2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土居周平, 浅沼 丈, 五十嵐一
2. 発表標題 回帰型深層ニューラルネットワークを用いた多目的最適化の高速化
3. 学会等名 電気学会静止器回轉機合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 佐々木秀徳, 日高勇氣, 田中敏則, 伊藤一将, 大友佳嗣, 五十嵐一
2. 発表標題 深層学習における追学習手法に関する検討
3. 学会等名 電気学会静止器回轉機合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大友佳嗣, 五十嵐一
2. 発表標題 ガボールフィルタを用いたトポロジー最適化の基礎検討ー同期リラクタンスモータへの適用
3. 学会等名 電気学会静止器回転機合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 土居周平, 浅沼丈, 五十嵐一
2. 発表標題 深層学習を用いた多目的トポロジー最適化 - 分類型と回帰の比較 -
3. 学会等名 第28回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 岡本和也, 五十嵐一
2. 発表標題 IPMモータのトポロジー最適化 機械振動の抑制
3. 学会等名 第28回MAGDAコンファレンス
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 S. Hiruma, H. Igarashi
2. 発表標題 Fast Computation of Copper and Iron Losses Using Model Order Reduction
3. 学会等名 OIPPE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Y. Otomo, Y. Gong, H. Igarashi
2. 発表標題 3-D Topology Optimization of Magnetic Cores for Wireless Power Transfer with Double-Sided Winding Coils
3. 学会等名 OIPE2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 S. Hiruma, H. Igarashi
2. 発表標題 Synthesis of Equivalent Circuit from Homogenized FE Equation via Model Order Reduction
3. 学会等名 CEFC2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Igarashi
2. 発表標題 Topology Optimization Based on Deep Learning and toward Their Coevolution
3. 学会等名 JSST2018 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 土居周平, 五十嵐一
2. 発表標題 深層学習を用いたトポロジー最適化の効率化
3. 学会等名 第31回計算力学講演会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 比留間真悟, 五十嵐一
2. 発表標題 均質化有限要素解析による時間域解析 - 単位セル複素透磁率の連分数表示
3. 学会等名 電気学会静止器回轉機合同研究会
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計2件

1. 著者名 D. A. Torrey, H. Igarashi, Karl Hollaus et al.	4. 発行年 2020年
2. 出版社 World Scientific	5. 総ページ数 448
3. 書名 Compendium on Electromagnetic Analysis: vol.2 The new generation of electric machines	

1. 著者名 Z. Badics, J. Pavo, H. Igarashi et al.	4. 発行年 2020年
2. 出版社 World Scientific	5. 総ページ数 464
3. 書名 Compendium on Electromagnetic Analysis: vol.3 Antennas, antenna arrays and microwave devices	

〔産業財産権〕

〔その他〕

電磁工学研究室 研究紹介 https://hbd.ist.hokudai.ac.jp/research.html

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