

令和 5 年 6 月 13 日現在

機関番号：13801

研究種目：若手研究

研究期間：2019～2022

課題番号：19K14961

研究課題名（和文）アイソジオメトリック解析と機械学習による多導体ケーブルの特性解明と形状最適化

研究課題名（英文）Characteristic Elucidation and Shape Optimization of Multiconductor Transmission Lines by Using Isogeometric Analysis and Machine Learning

研究代表者

關根 惟敏（Sekine, Tadatoshi）

静岡大学・工学部・助教

研究者番号：00765993

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、信号線、電源線、グラウンド線といった複数の導体線が束になった多導体ケーブルの伝送特性と放射特性の解明、及び伝送特性が良好で不要放射の少ないケーブルを設計するための形状最適化技術の創出を行った。具体的には、まず「アイソジオメトリック解析に基づく電磁界シミュレーション」によって多導体ケーブルの伝送特性と放射特性を効率的かつ高精度に算出した。そして、算出された特性と「機械学習」を組み合わせたクラスタリングと回帰モデル生成によって、ケーブルの形状が伝送/放射特性に及ぼす影響を検証・解明すると共に、最適なケーブル形状を導き出す設計技術を創出した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

多導体ケーブルをに関するこれまでの手法では、多導体ケーブルの滑らかな曲線形状を精度良く再現できているとは言えない。そのため、アイソジオメトリック解析におけるNURBS曲線・曲面を多導体ケーブルのモデル化に用いるような研究は本研究を除いて存在しない。また、多導体ケーブルの根本的な特性の解明を試みたものはほとんどなく、理論的な解明はまだなされていない。加えて、特にEMCの分野において機械学習を応用した研究はほとんどないため、機械学習に基づく検証方法や最適化手法を創出したことによって、学術的にも社会的にも国内外に大きなインパクトを与えることが期待できる。

研究成果の概要（英文）：In this research, the transmission and radiation characteristics of multiconductor cables consisting of multiple conductors such as signal lines, power lines, and ground lines were clarified, and a shape optimization technique was developed to design cables with good transmission characteristics and low unwanted radiation. Specifically, the transmission and radiation characteristics of multiconductor cables were first calculated efficiently and accurately by "electromagnetic field simulation based on isogeometric analysis. Then, by combining the calculated characteristics with "machine learning" to generate clustering and regression models, we verified and clarified the effects of cable shape on transmission/radiation characteristics, and created a design technique to derive the optimal cable shape.

研究分野：数値シミュレーション

キーワード：多導体ケーブル アイソジオメトリック解析 特性解明 形状最適化 重回帰分析 最適化アルゴリズム 機械学習 深層学習

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属します。

様式 C-19、F-19-1、Z-19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

私達の身の回りにはスマートフォンやノートパソコンといった電子機器が浸透しており、近年ではIoT (Internet of Things) 技術によって身近な工業製品の電子化も飛躍的に進んでいる。このような電子製品が多数存在する環境では、製品自身の正常な動作を保証するだけでなく、製品と周囲環境が電磁氣的に干渉し合わず、それぞれが両立して機能することを目的とする電磁環境両立性 (EMC: Electromagnetic Compatibility) を考慮した設計 (EMC 設計) が不可欠となる。

電気自動車や自動運転の実用化に向けて電子機器の搭載数が増大しつつある自動車の設計はその顕著な例であり、車載電子機器と周囲環境の相互作用の影響を、設計の初期段階から検証することが重要となってきた。このとき、車載電子機器に誤動作を生じさせる要因の一つとされているのが、「車載ワイヤーハーネス」である。車載ワイヤーハーネスは、電子機器間の信号伝送や、電源装置から電子機器への電力伝送を行う導体線が数十本束ねられた「多導体ケーブル」の一種であり、多数の電子機器同士を相互接続するために自動車全体に張り巡らされている。そのため、高度に電子化された現代・次世代の自動車にとっては必要不可欠な構成要素となる。しかし、多導体ケーブルの導体線はねじれたり絡み合ったりしており、測定や数値的なモデル化が困難な複雑な構造となっているため、多導体ケーブルの特性を解明し、最適な形状を求めることが必要とされている。

2. 研究の目的

本研究の目的は、アイソジオメトリック解析と機械学習を用いて、多導体ケーブルの伝送特性と放射特性を解明すること、及び伝送特性が良好かつ不要放射の少ないケーブルを設計するための形状最適化技術を創出することである。

3. 研究の方法

本研究の概略図を図1に示す。本研究では、【(1)多導体ケーブルの特性解明】と【(2)多導体ケーブルの形状最適化】について、以下の方法で取り組んだ。

【(1)多導体ケーブルの特性解明】まず、多導体ケーブルの伝送特性としてクロストーク電圧を、放射特性としてコモンモード電流をアイソジオメトリック解析を用いて算出する。次に、算出された特性とケーブル形状との相関関係を機械学習手法である重回帰分析を用いて基づいて分析することで、どの形状パラメータが特性に大きく影響するのかを解明する。

【(2)多導体ケーブルの形状最適化】(1)の分析結果により、所望の特性を得る際に変更すべき重要な形状パラメータが何か決定できるため、それらのみを考慮して多導体ケーブルの形状を最適化する。いくつかの最適化手法を検討し、最も効率的な最適化手法を採用する。

4. 研究成果

まず1年目は、アイソジオメトリック解析を電磁界解析へ汎用的に応用するための、ベクトル基底関数を用いた新手法を提案した。加えて、「重回帰分析を用いた特性解析」と「最適化アルゴリズムを用いた形状最適化」を、3本の導体ケーブルに適用し、今後の基盤となる知見や方法論を創出した。まず、アイソジオメトリック解析に基づく新手法では、電磁界解析の汎用化と高速化を実現した。また、「特性解析」では、最小二乗法に基づく重回帰により、ケーブルを構成する導体線 (ワイヤ) の半径と位置を形状パラメータとし、どの形状パラメータが信号ノイズへ強く影響するのかという分析を行った。結果として、「グラウンド線の半径」と「グラウンド線と他のワイヤとの距離」、及び「グラウンド線以外のワイヤ同士の距離」が重要であることが分かった。また、「形状最適化」では、重回帰分析によって重要だと分かった形状パラメータのみを用いて、信号ノイズを最小化するようなワイヤの半径や配置を、最適化アルゴリズムによって導いた。最適化

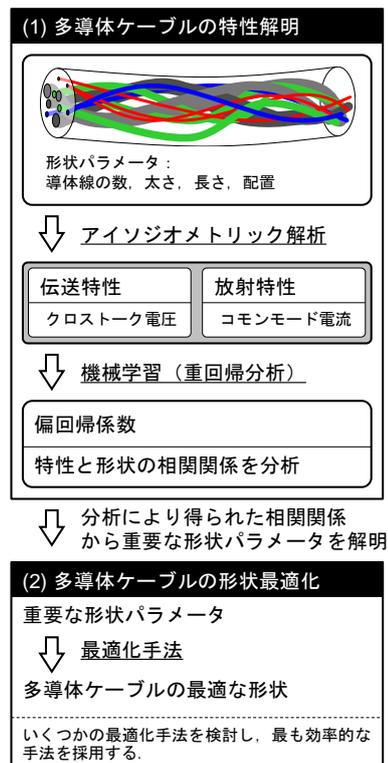


図1 本研究の概略図

アルゴリズムとして、遺伝的アルゴリズムを用いた。結果として、「グラウンド線の半径が他のワイヤよりも大きく」かつ「他の2つのワイヤがグラウンド線を挟む」ような形状が導かれた。「半径の大きなグラウンド線を、他のワイヤで挟むような構造」が、なぜ信号ノイズを減らせるのかは、理論的に説明可能である。しかし、このような配置が信号ノイズを減らせるということは、当該分野ではこれまで知られていなかったため、新たな知見が得られたという意味で大きな意義がある。また、この新たな知見が、人間が一から考えたものではなく、重回帰分析と最適化アルゴリズムによって自動的に得られたということも、該当分野における有用な手法が創出できたと考える。

2年目は、「特性解析」と「形状最適化」の改善と「深層学習モデルの生成」を行った。まず「特性解析」と「形状最適化」では、扱えるワイヤの本数に制限がないようにプログラムを拡張した。さらに「形状最適化」では、図2(a)に示すような蜂の巣状のグリッドを用いた粗い最適化を遺伝的アルゴリズムに基づいて実行した後、ブレン

トの方法を用いて詳細な最適化を行う段階的な手法に変更した。結果として、図2(b)に示すような「グラウンド線の半径を他のワイヤよりも大きくする」、「中心に配置したグラウンド線の周りに他のワイヤを均等に配置する」という条件を満たし、グラウンド線と他のワイヤとの距離 d が約4mmのときにクロストーク電圧とコモンモード電流が最も小さくなることを確認した。これは、最適化前のワイヤ配置における大きさの10分の1以下となっており、非常に効果的に最適化が達成できたとと言える。一方、「深層学習モデルの生成」では、深層学習モデルの一つである畳み込みニューラルネットワークを用いて、多導体ケーブルの断面画像を入力とする、回帰、二項分類、多クラス分類のモデルをそれぞれ生成した。このとき、回帰モデルではコモンモード電流の値を出力とし、二項分類ではコモンモード電流の値が閾値よりも大きいかわりか小さいかで分類した。また、多クラス分類ではコモンモード電流をその大きさに応じて区分し、区分ごとにクラスを設定して分類を行った。結果として、多導体ケーブルの断面画像からコモンモード電流の推定やクラス分類が精度良くできることが確認できた。

3年目は、前年に行った「深層学習モデルの生成」を拡張・改良し、深層学習モデルの一つである畳み込みニューラルネットワーク(CNN: Convolutional Neural Network)を用いて多導体ケーブルの性能判定を行う手法を考案・検証した。この手法では、多導体ケーブルの断面形状の画像と断面形状から計算されるコモンモード電流の組をサンプルとするデータセットを用いて、CNNを訓練する。そして、CNNの入力と出力にいくつかのパターンを考え、どの入出力パターンの組み合わせが性能判定に有用であるかを検討した。まず、多導体ケーブルを構成するワイヤを1本ずつ1つのチャンネルに割り当てた多次元配列を元データとして作成した。次に、入力パターンとして、多次元配列をチャンネル方向に連結して1チャンネルにした画像(入力パターン1)、元データの多次元配列をそのまま用いる場合(入力パターン2)、及び入力パターン1と入力パターン2を連結した場合(入力パターン3)を考えた。一方、出力パターンとして、コモンモード電流の値を出力する回帰(出力パターン1)、コモンモード電流の値が閾値よりも大きいかわりか小さいかを分類する二項分類(出力パターン2)、及びコモンモード電流の値を大きさに応じて区分し、区分ごとにクラスを設定して分類を行う多クラス分類(出力パターン3)を考えた。数値検証により、図3に示すように、提案手法によってどの入力・出力のパターンでも高い精度で性能判定が行えることが示せ、特に入力パターン2と出力パターン1の組み合わせが最も精度が高くなるという知見を得た。また、入力画像におけるワイヤ半径が可変である場合にも提案手法が有効であることを実証した。加えて、性能評価の推定に要する計算時間が従来の数値解析手法よりも大幅に短くなることも確かめられた。

本研究のように、アイソジオメトリック解析における曲線・曲面を多導体ケーブルのモデル化に用いるような研究は国内外に存在しない。また、多導体ケーブルに関する測定や数値シミュレーションを行う研究報告は数多く存在する一方、根本的な特性の解明を試みたものはほとんどなく、理論的な解明はまだなされていない。加えて、特にEMCの分野において機械学習を応用

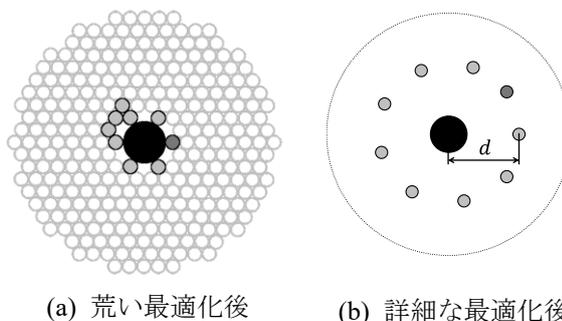


図2 多導体ケーブルの形状最適結果

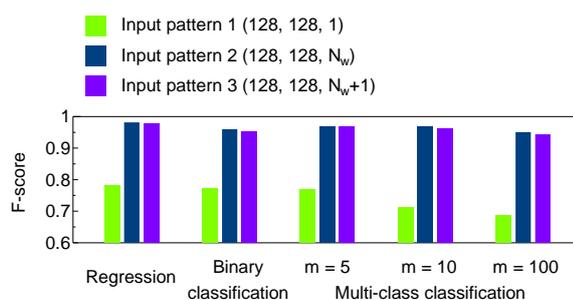


図3 各入出力に対するF値

した研究はほとんどないため、機械学習に基づく検証方法や最適化手法を創出することによって、学術的にも実用的にも国内外に大きなインパクトを与えることが期待できる。また、本研究による形状最適化技術を確立したことで、多導体ケーブルに関わる工業製品のEMC設計を飛躍的に改善できるだけでなく、ケーブル製造の現場へ新たな提言を行えるなど、広い分野への波及が期待できる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Tadatoshi Sekine, Hiromi Itaya, Shin Usuki, Kenjiro T. Miura	4. 巻 10
2. 論文標題 Defective judgment for automotive wire harness using convolutional neural network	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEICE Communications Express	6. 最初と最後の頁 924-929
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1587/comex.2021COL0038	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5件（うち招待講演 0件/うち国際学会 3件）

1. 発表者名 關根惟敏
2. 発表標題 畳み込みニューラルネットワークを用いた車載ワイヤーハーネスの不良判定手法
3. 学会等名 電子情報通信学会環境電磁工学研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadatoshi Sekine
2. 発表標題 Electric Property Analysis and Wire Placement Optimization of Automotive Wire Harness
3. 学会等名 2021 IEEE International Symposium on EMC+SIPI (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Tadatoshi Sekine
2. 発表標題 Capacitance Matrix Estimation of Multiconductor Transmission Lines Using Machine Learning
3. 学会等名 ITC-CSCC 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Tadatoshi Sekine
2. 発表標題 Variability Analysis of a Non-Uniform Transmission Line Using Stochastic Galerkin Method
3. 学会等名 EMC Europe 2020 (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 關根惟敏
2. 発表標題 多項式カオス法を用いた不均一伝送線路の変動解析
3. 学会等名 電子情報通信学会エレクトロニクスシミュレーション研究会
4. 発表年 2020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

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