

令和 5 年 6 月 16 日現在

機関番号：11401

研究種目：基盤研究(C)（一般）

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04497

研究課題名（和文）ループ電流モデルを用いた実装回路素子間の誘導結合推定システムの開発

研究課題名（英文）Inductive Coupling Estimation System Using Loop Current Model of Mounted Circuit Components

研究代表者

室賀 翔（Muroga, Sho）

秋田大学・理工学研究科・准教授

研究者番号：60633378

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,300,000円

研究成果の概要（和文）：近傍磁界情報を利用して、プリント基板上の配線および素子間の磁気結合係数を簡易に推定する方法について検討した。初めに、配線および素子の等価磁界源モデルとして、均一な電流分布をもつ単純なループ電流モデルを提案した。次に、近傍磁界情報の機械学習を利用して、配線や素子を等価ループ電流モデル化する手法を提案した。さらに、複数の配線をそれぞれ等価ループ電流モデル化し、モデル間の磁界結合を算出することにより、配線間の磁気結合係数を推定する手法を提案した。推定した磁気結合係数は、電磁界シミュレーションの結果と10%以内で一致し、提案手法による誘導結合推定手法の有用性が示された。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本提案手法を利用すれば、高周波回路基板内の予期しない電磁結合を定量的に把握することが可能になる。さらに、配線や素子から漏洩する近傍磁界に関する情報を、等価磁界源モデル情報として保存し、情報を集めてデータベース化することが可能となる。今後の機器の小型化・高速化に伴い、配線・素子間の電磁結合を考慮した設計の必要性は大きくなると予想されている。本研究の成果は、次世代小型、高周波機器の試作のため活用することが可能であり、産業界に広く貢献できると思われる。

研究成果の概要（英文）：A novel estimation method of magnetic coupling coefficients between printed-circuit-board-level traces and components using a near field information was investigated and proposed. First, a simple one-turn loop current model with uniform current distribution was proposed as the equivalent magnetic source of the traces. The measured magnetic near-field distributions above the traces at 1 GHz were input to the trained classifier or regressor to estimate the geometry of the loop current models. Next, the magnetic coupling coefficient between two traces was estimated through calculating the coupled magnetic flux between the estimated loop current models. The magnetic coupling coefficients between the loop current models estimated by measured magnetic near-field distribution agreed with the coupling coefficients calculated by the full-wave simulation within 10%, which indicates the feasibility of estimating the magnetic field coupling by the proposed method.

研究分野：計測工学，電子デバイス・電子機器

キーワード：磁気結合係数 磁界結合 近傍磁界計測 等価磁界源モデル 機械学習 EMC

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。

### 1. 研究開始当初の背景

電子機器の高密度実装化、高速化に伴い、高周波回路基板内の配線や素子は電磁的に結合しやすくなり、意図しない経路が各所で形成されうる。それらは誤作動や感度抑圧の原因となる。この対策のため、近傍磁界測定によって回路基板上の磁界強度分布を取得し、電磁ノイズの発生源や伝搬経路を推定する手法が利用される。ただし、近傍磁界測定では、配線や素子間の電磁結合に関する定量的な情報は得られない。回路基板の再設計の方針を定めるためには、電磁結合を考慮した設計(EMC 設計)に関するノウハウや大規模な電磁界シミュレーション等も必要となる。

電磁結合の要因は、容量結合と誘導結合である。容量結合については、既に系統的に検討されており、レイアウト情報から浮遊容量を算出するためのソフトウェアも市販されている。一方で、基板、空間の比透磁率は通常 1 であるため、配線や素子から生じる磁束は空間に広く複雑に分布する。また、磁束の発生源である、素子を流れる電流とリターン電流で形成されるループ電流の位置や形状は、周波数によって変化すると考えられる。よって、機器内の磁束の発生源や結合経路を把握することは難しく、誘導結合の統一的な推定手法は示されていない。

以上により、電子機器内の高周波回路を、正確に必要な性能で動作させるための電磁ノイズ対策のために、基板上の配線および素子間の誘導結合の大きさを定量的に推定する手法の開発が急務である。

### 2. 研究の目的

実装状態の素子や配線間の意図しない誘導結合(磁界結合)を測定により把握するシステムの開発を目的として、(1)近傍磁界情報の機械学習を利用した配線や素子の等価磁界源モデル化と(2)素子間の誘導結合の推定手法に関する検討を行った。等価磁界源モデルとして、均一な電流分布をもつループ電流モデルを提案した。図 1 に、システムの概要と検討内容の関係を示す。

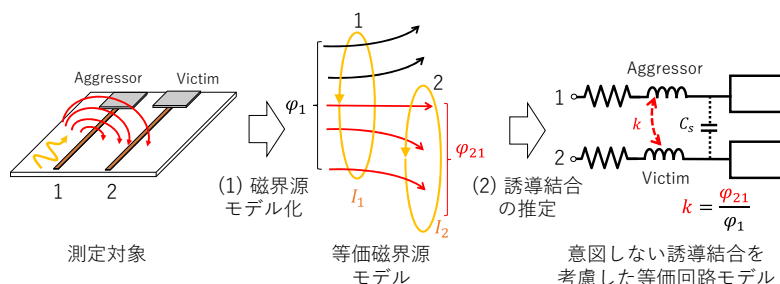


図 1 回路基板上の意図しない誘導結合の推定システムの概要、(1)および(2)が検討内容

### 3. 研究の方法

(1) 配線や素子から生じる磁界の発生源は、信号電流とリターン電流で形成される 1 ターンのループ電流であると考えて、配線や素子の等価磁界源モデルとしてループ電流モデルを提案した<sup>1-2)</sup>。単純な 1 本のマイクロストリップ線路(Microstrip line, MSL)や平行配線、平行 2 導体 MSL を評価対象として、近傍磁界情報の機械学習により測定対象を等価磁界源モデル化する方法について検討した。初めに、寸法や形状の異なる電流モデルから生じる近傍磁界の理論値を学習して分類器<sup>3-7)</sup>および回帰器<sup>8)</sup>を作成した。次に、近傍磁界スキャナを試作し、近傍磁界測定を実施した。近傍磁界情報を分類器および回帰器に入力し、配線を等価ループ電流モデル化した。図 2 に研究の方法の概要を示す。

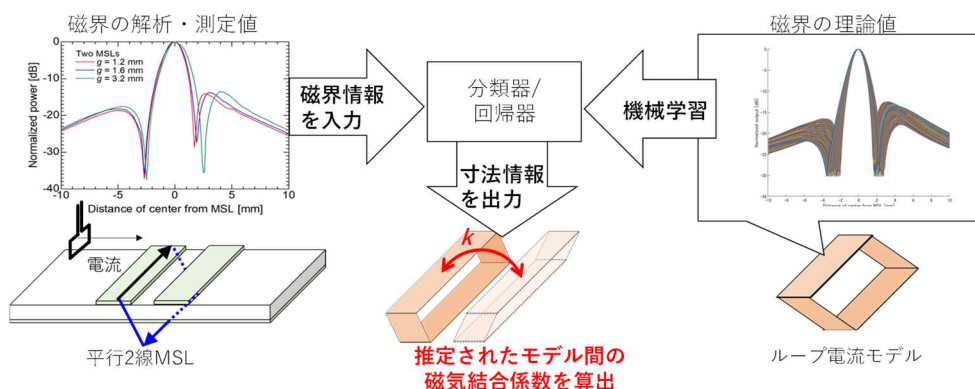


図 2 研究方法の概要<sup>5)</sup>

(2) 平行2導体MSLを評価対象として、近傍磁界情報の機械学習により2本の信号線をそれぞれ等価磁界源モデル化した<sup>7,8)</sup>。等価磁界源モデルから生じる磁束を解析的な手法で算出し、2つの磁界源間の磁気結合係数を推定した。一方で、電磁界シミュレーションを実施し、推定結果と比較した。

#### 4. 研究成果

(1) 配線や素子間の誘導結合推定のための等価磁界源モデルとして、単純なループ電流モデルを提案し、その有用性を示した<sup>1-8)</sup>。ループ電流モデルは、配線や素子を流れる信号電流と、グラウンドを流れるリターン電流で形成される<sup>1,2)</sup>。ループ電流の寸法パラメータの一部として、配線や素子のレイアウト情報を用いた。一方で、リターン電流の位置や寸法は、周波数や信号線とグラウンド線等の位置関係により異なると考えられ、近傍磁界情報の機械学習を利用して推定した。なお、ループ電流内の電流分布は、周波数によらず一様と仮定した。評価対象として、信号線とグラウンド線の位置関係の異なる複数の平行配線、単線のMSL、平行2線MSLをプリント回路基板上に試作した。近傍磁界測定のために、3次元近傍磁界スキャナを試作した<sup>2)</sup>。初めに、寸法や形状の異なるループ電流モデルから生じる近傍磁界分布の理論値を1次元CNN(Convolutional neural network)で学習し、分類器<sup>3-7)</sup>および回帰器<sup>8)</sup>を作製した。次に、試作した配線の近傍磁界測定を実施した。周波数は1GHzとした。磁界分布の測定値を分類器および回帰器に入力することにより、ループ電流モデルの寸法および形状情報を出力した。得られた情報を用いてループ電流モデルを構築し、磁界強度分布の理論値を算出した。図3に、理論値を規格化して測定値と比較した結果を示す。-20 dB以上の範囲では測定値と3 dB以内で一致し、提案する等価ループ電流モデルおよび提案手法を用いたモデル化手法の有用性を示した。

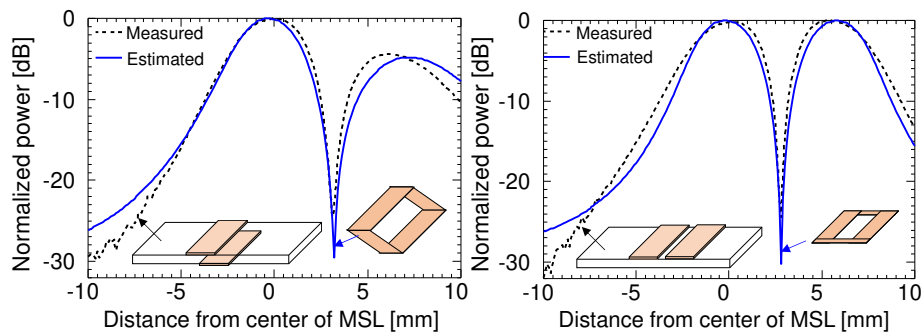


図3 平行配線から生じる近傍磁界分布の測定値(磁界プローブの出力値)と等価磁界源モデルから生じる磁界分布の理論値の比較<sup>4)</sup>

(2) 試作した近傍磁界スキャナと(1)で検討した磁界源モデル化手法を組み合わせた誘導結合推定システムの実現可能性について検討した<sup>7,8)</sup>。評価対象は、線路間距離の異なる平行2線MSLとした。試作した平行2線MSLの近傍磁界分布を、近傍磁界スキャナを用いて測定し、測定値を利用して、2本のMSLをそれぞれ磁界源モデル化した。1つのモデルから生じる磁束を解析的な手法で算出し、2つの磁界源間の磁気結合係数を推定した。一方で、推定結果の妥当性を検討するために、実験を模擬する3次元Full-wave電磁界シミュレーションを実施した。その結果、図4に示す通り、推定値と電磁界シミュレーションの値は10%以内で一致し、提案手法を用いることで高い精度で配線間の誘導結合を推定可能であることを示した<sup>8)</sup>。

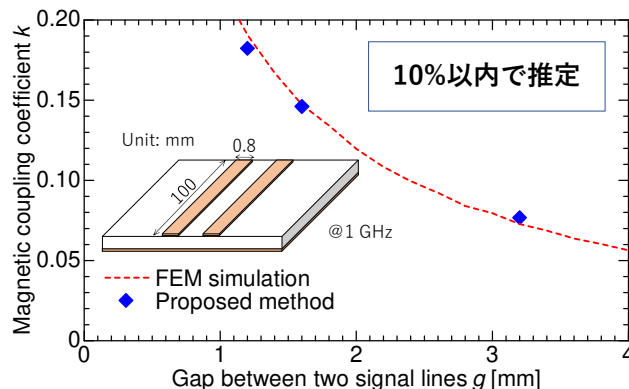


図4 推定した磁気結合係数と電磁界シミュレーション結果の比較<sup>8)</sup>

以上の通り、本研究課題では、実装状態の素子や配線間の意図しない磁気結合を、近傍磁界測定 of 機械学習により定量的に推定するシステムを提案した。初めに、配線・素子を単純なループ電流として等価磁界源モデル化する方法を提案した。次に、複数の配線および素子の等価磁界源モデル間の磁気結合量を算出することにより、配線および素子間の磁気結合係数を簡便に推定する手法を提案した。単純な平行配線を測定対象として、配線間の磁気結合係数を推定した。その結果、推定値と電磁界シミュレーションの値はおおよそ一致し、提案手法の有用性が示された。より複雑な回路への適用が今後の課題である。

参考文献：

- 1) 武井佑允, 室賀 翔, 田中元志, “誘導および伝送特性の同時測定によるマイクロストリップ線路のループ電流モデルの推定”, 2019 年度 電気関係学会東北支部連合大会, 1G10, Aug. 2019.
- 2) 武井佑允, 室賀 翔, 田中元志: “近傍磁界測定を用いた平行 2 導体 MSL 間の誘導結合の推定”, 電子情報通信学会 環境電磁工学研究会, EMCJ2020-68, Jan. 2021.
- 3) 佐々木太地, 室賀 翔, 鴨澤秀郁, 田中元志: “MSL の近傍磁界マップの機械学習によるループ電流モデルの寸法パラメータ抽出に関する一検討”, 第 36 回 エレクトロニクス実装学会春季講演大会, 25A6-01, Mar. 2022.
- 4) 佐々木太地, 室賀 翔, 鴨澤秀郁, 田中元志: “近傍磁界情報の機械学習による平行配線のループ電流モデル化に関する一検討”, 2022 年度 電気関係学会東北支部連合大会, 1E08, Aug. 2022.
- 5) 室賀 翔: “近傍磁界情報の機械学習を利用した平行配線間の磁気結合係数の推定”, エレクトロニクス実装学会 インテリジェント実装技術研究会 2022 年度第 2 回公開研究会, 講演 2, Nov. 2022.
- 6) S. Muroga, T. Sasaki, H. Kamozaawa, Y. Sato, T. Mikami, and M. Tanaka: "Size Parameters Classification of Loop Current Model of PCB Traces by CNN of Magnetic Near-Field Distribution", 2022 Asia-Pacific Microwave Conference, IF-D02, Nov.-Dec. 2022.
- 7) 佐藤雄亮, 室賀 翔, 鴨澤秀郁, 田中元志: “近傍磁界測定と 1 次元 CNN を用いた平行 2 線 MSL 間の磁気結合係数の推定に関する一検討”, IEEE EMCS 仙台チャプタ 学生研究発表会, (3), Feb. 2023.
- 8) Y. Sato, S. Muroga, H. Kamozaawa, and M. Tanaka: "An Estimation Method of Magnetic Coupling Coefficient between Two Microstrip Lines Using Machine Learning of Near Field Information", IEEE International Magnetics Conference, BV-06, May. 2023.

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 5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 Mikami Takahiro, Muroga Sho, Tanaka Motoshi, Endo Yasushi, Hashi Shuichiro, Ishiyama Kazushi	4. 巻 58
2. 論文標題 Estimation of Noise Suppression in MSL With Co-Zr-Nb Film Considering Impedance Matching	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 1~5
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TMAG.2021.3087257	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 Muroga Sho, Tanaka Motoshi	4. 巻 141
2. 論文標題 Inductive Decoupling between Two Parallel MSLs using Co-Zr-Nb Film	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 301~305
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.141.301	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 Mikami Takahiro, Muroga Sho, Tanaka Motoshi	4. 巻 140
2. 論文標題 Estimation of Circuit Parameters of Microstrip Lines Covered by Electromagnetic Noise Suppressors with Different Geometries	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 595~596
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.140.595	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 MUROGA Sho, TANAKA Motoshi, YOSHIKAWA Takefumi, ENDO Yasushi	4. 巻 E103.B
2. 論文標題 Effect of Complex Permeability on Circuit Parameters of CPW with Magnetic Noise Suppression Sheet	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 899~902
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.2019MCP0002	査読の有無 無
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 Masaki Masataka, Muroga Sho, Mikami Takahiro, Tanaka Motoshi	4. 巻 142
2. 論文標題 Evaluation of Transmission Characteristics of Differential and Common Modes of Parallel Two-Conductor Microstrip Lines with a Co-Zr-Nb Film	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 IEEJ Transactions on Fundamentals and Materials	6. 最初と最後の頁 283 ~ 287
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1541/ieejfms.142.283	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 Mikami Takahiro, Muroga Sho, Tanaka Motoshi, Endo Yasushi, Hashi Shuichiro, Ishiyama Kazushi	4. 巻 (Accepted)
2. 論文標題 Estimation of Material Characteristics of Film-Type Noise Suppressor Using Equivalent Circuit Modeling and Genetic Algorithm	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Magnetics	6. 最初と最後の頁 - (5pages)
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12件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 4件)

1. 発表者名 Takuma Kobayashi, Takahiro Mikami, Sho Muroga, Motoshi Tanaka
2. 発表標題 A Study on Crosstalk Suppression and Insertion Loss in MSLs with Co-Zr-Nb Film
3. 学会等名 The 9th International Conference on Materials Engineering for Resources 2021 (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 佐々木太地, 室賀 翔, 鴨澤秀郁, 田中元志
2. 発表標題 MSLの近傍磁界マップの機械学習によるループ電流モデルの寸法パラメータ抽出に関する一検討
3. 学会等名 第36回 エレクトロニクス実装学会春季講演大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 小林拓真, 室賀 翔, 田中元志, 遠藤 恭, 杵修一郎, 石山和志, 直江正幸
2. 発表標題 Co-Zr-Nb膜を用いたクロストーク抑制素子の挿入損失の低減に関する検討
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 小林拓真, 室賀 翔, 田中元志, 遠藤 恭, 杵修一郎, 石山和志, 直江正幸
2. 発表標題 Co-Zr-Nb膜の複素透磁率によるマイクロストリップ線路間のクロストークへの影響
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 武井佑允, 室賀 翔, 田中元志
2. 発表標題 平面型の電磁ノイズ抑制体を配置した平行2導体マイクロストリップ線路の伝送特性の測定
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁環境研究会EMCJ
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 正木 信駿, 室賀 翔, 田中 元志
2. 発表標題 平面型の電磁ノイズ抑制体を配置した平行2導体マイクロストリップ線路の伝送特性の測定
3. 学会等名 電子情報通信学会電磁環境研究会EMCJ
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Sato, S. Muroga, H. Kamozaawa, and M. Tanaka
2. 発表標題 An Estimation Method of Magnetic Coupling Coefficient between Two Microstrip Lines Using Machine Learning of Near Field Information
3. 学会等名 IEEE International Magnetics Conference (Intermag2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 T. Mikami, S. Muroga, and M. Tanaka
2. 発表標題 Estimation of Conductive Noise Suppression in Microstrip Line with Two Different Magnetic Films
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 S. Muroga, T. Sasaki, H. Kamozaawa, Y. Sato, T. Mikami, and M. Tanaka
2. 発表標題 Size Parameters Classification of Loop Current Model of PCB Traces by CNN of Magnetic Near-Field Distribution
3. 学会等名 2022 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 室賀 翔, 田中元志
2. 発表標題 平行2線MSL上に配置したCo-Zr-Nb膜のクロストーク抑制効果および挿入損失の形状・導電率依存性
3. 学会等名 電気学会マグネティックス研究会
4. 発表年 2022年



1. 発表者名 佐藤雄亮, 室賀 翔, 鴨澤秀郁, 田中元志
2. 発表標題 近傍磁界情報の機械学習を利用した平行2線MSL間の磁気結合係数の一推定
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 2022年

1. 発表者名 佐々木太地, 室賀 翔, 鴨澤秀郁, 田中元志
2. 発表標題 近傍磁界情報の機械学習による平行配線のループ電流モデル化に関する一検討
3. 学会等名 2022年度 電気関係学会東北支部連合大会
4. 発表年 2022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