

Copyright ©2025 by the Magnetics Society of Japan. This article is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0) http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

T. Magn. Soc. Jpn. (Special Issues)., 9, 29-33 (2025)

<Paper>

# 近傍磁界情報の機械学習によるオブジェクト検出を用いた プリント配線板上の磁界源推定

# Estimation of magnetic field sources on printed circuit boards using object detection by machine learning of magnetic near-field information

佐藤雄亮<sup>a)</sup>・室賀翔<sup>b)</sup>・鴨澤秀郁<sup>a)</sup>・田中元志<sup>a)†</sup> <sup>a)</sup>秋田大学大学院理工学研究科,秋田市手形学園町1-1(〒010-8502) <sup>b)</sup>東北大学大学院工学研究科,仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05(〒980-8579)

Y. Sato  $^{\rm a)},$  S. Muroga  $^{\rm b)},$  H. Kamozawa  $^{\rm a)},$  and M. Tanaka  $^{\rm a)\,\dagger}$ 

<sup>a)</sup> Graduate School of Engineering Science, Akita University, 1-1 Tegata Gakuen-machi, Akita, 010-8502, Japan

<sup>b)</sup> Graduate School of Engineering, Tohoku University, 6-6-05 Aramaki-aza-aoba, Aoba-ku, Sendai, 980-8579, Japan

To estimate electromagnetic (EM) noise sources and coupling paths on a printed circuit boards (PCBs) in electronic devices, information on the EM coupling between signal traces and components is required. In this paper, we propose a method for estimating the length, position, and number of magnetic field sources from near-field distribution on PCBs, using an object detector with machine learning. The target is a unidirectional magnetic field  $H_x$  because of a fundamental study. For training data, two-dimensional (2D) magnetic field maps of a loop current model were obtained by theoretical calculation. To evaluate the object detector, 2D magnetic field maps on traces with different lengths were prepared by measurement and EM field simulation. Then, using the detected information for the magnetic field source, the geometry of its equivalent loop-current model was estimated by a parameter estimator with a convolutional neural network. As a result, the position of the magnetic field source could be estimated with high accuracy, which indicated the feasibility of modeling it appropriately.

Key words: magnetic near-field distribution, magnetic field source, printed circuit board, equivalent loop-current model, object detection

#### 1. はじめに

電子機器の高密度実装化,薄型化,動作周波数の高周波化により, プリント配線板 (Printed circuit board, PCB) では信号配線や素 子が密集し、電磁気的に結合しやすくなっている. それにより、意 図しない経路が形成され、それが電磁ノイズ源となって誤動作な どを引き起こす要因になりうる[1]. そのような電磁結合の要因は, 電界結合と磁界結合である. 電界結合については, 電束が誘電率の 高い材料内に主に分布することから, 導体の位置, 寸法や基板誘電 率等のレイアウト情報から浮遊容量を推定する方法等[2]が提案さ れ,利用されている.磁界結合については,空間や基板の非透磁率 が1であることから、磁束は広く分布し、定量的な推定は難しい. 磁界結合の要因となる磁束の発生源は、配線や素子を流れる信号 電流に加え、回路情報にない(グラウンドのどこかを流れる) リタ ーン電流により形成されるループ電流である[3]. そのようなノイ ズ源を特定するため、特定周波数における近傍磁界分布の測定が 行われている[4-6]. そして,磁界強度が大きい位置にノイズ抑制シ ートを配置する等の対策が行われる場合が多い[7-8]. これは対症 療法的であり、電磁気的なメカニズムの把握や回路設計を含めた 根本的な対策にはなっていない. つまり, 電磁結合問題を考慮して PCB を設計するためには、実装状態の素子・配線間の磁界結合量 を推定できるシステムが求められる.

これまで、基板内の磁界源間の相互インダクタンスを推定する 方法が検討されており[9]、磁界源を等価電磁界モデルには双極子 モーメントが用いられる場合が多い[10-11]. しかし、これらは大

Corresponding author: M. Tanaka (e-mail: tanaka@gipc.akita-u.ac.jp).

規模な測定や複雑な計算が必要な場合が多い.また,波源が複数ある場合,測定ばらつきがある場合等,測定条件によって精度が低下することが課題となっている.

筆者らは、PCB 上の近傍磁界分布を用いて、より簡便に磁界源 を電磁界モデル化し、測定条件の変化に対してロバスト性をもつ 磁界結合の定量化方法について検討してきた[12-14]. 具体的には、 PCB 内の磁界源である信号あるいはノイズ電流とそのリターン電 流を、1 ターンのループ電流としてモデル化することを提案した. ループ電流の長さ、高さ、傾き(本論文では信号線の直下にリター ン電流がある場合を0°と定義する)等を変化させることにより, 様々な磁界源をループ電流モデル化し、そのループ電流間の相互 インダクタンスを算出すれば、磁界結合を定量化できる可能性が ある. 先行研究では、単線のマイクロストリップ線路 (Microstrip line, MSL)や平行2線路を対象とした基礎検討を行った[13].ル ープ電流から生じる近傍磁界分布の理論値を、畳み込みニューラ ルネットワーク (Convolutional neural network, CNN) に学習し, ループ電流モデルの寸法情報を回帰分析するパラメータ推定器を 作製した. このパラメータ推定器には、近傍磁界測定における測定 ばらつきなどを考慮した. その結果, 磁界源の中心付近の近傍磁界 分布から、等価ループ電流モデルのループ高さや傾きを推定でき ることを示した[14].

近傍磁界測定から、PCB内の磁界源を電磁界モデル化するシス テムを構築するためには、磁界源の全体の大きさ、位置、および個 数を特定する方法が必要である.これを実現するための技術とし て、代表的なオブジェクト検出方法の一つである、You only look once (YOLO) [15]の利用が考えられる.YOLO は、計算量が比較



Utilization for EMC design

Fig. 1 Procedure of estimating magnetic field sources.

的に少なく,コンシューマ向け GPU を用いて比較的高速に物体検 出が行える.これに2次元磁界分布を学習させることで,磁界源 の位置と大きさの推定が期待できる.

本稿では、MSLを磁界源として、その近傍磁界分布の機械学習 から、磁界源の位置と長さを検出し、ループ電流モデル化する方法 を提案する. Fig. 1 はその磁界源推定システムの概要を示してお り、磁界源の検出とループ電流モデル化の 2 段構成である. ここ で、本研究は原理を確認するための基礎検討であることから、単一 方向の磁界 (H<sub>x</sub>)を対象に議論する. なお、H<sub>y</sub>についても応用で き、2 次元化が可能である. はじめに、ループ電流モデルから理論 的に計算された 2 次元磁界マップを機械学習させ、磁界源の中心 座標と長さを抽出するオブジェクト検出器を作製した. 検出器の 評価には、長さが異なる MSL について、近傍磁界測定と有限要素 法による電磁界シミュレーションの結果を用いた. そして、検出結 果から得られた位置情報から、磁界源の等価ループ電流モデル化 を行い、評価した.

# 2. 磁界源をもつ PCB とその近傍磁界

推定対象となる磁界源をもつ PCB と測定系の構成を Fig. 2 に 示す.本研究では、単一方向磁界 ( $H_x$ )を対象とし、磁界源は PCB 上の配線 (MSL) をy 方向に流れる電流とそのリターン電流で形 成されるループ電流モデルで表現できるものとした.

# 2.1 近傍磁界測定方法

磁界源の位置と寸法の検出を調べるために、比誘電率3.1、厚さ 1.5 mm,縦横がそれぞれ70 mmの変性ポリフェニレンエーテル 基板に、線幅0.8 mmを設計目標として、基板加工機(KitMill SR200, ORIGINALMIND)を用いてコの字型のMSLを試作した。MSLの形状と寸法をFig. 3(a)に示す。基板の中心に、y方向 に長さk = 30.0 mmの信号線を設計した。ここでは、表皮効果の 影響による信号線内の電流の偏りを小さくするために、特性イン ピーダンスの整合条件より信号線幅を狭くした。なお、試作した線 路はすべての区間で幅 $w_s = 0.74$  mmとなり、設計値より狭い値 であったが、第2.2 節で述べる電磁界シミュレーションの結果から、この影響は小さいと考えられる。線路の特性インピーダンスは 約100 Q であり、基板の裏面は全面グラウンドとした。



Fig. 2 Measurement setup using a coil-type magnetic near-field probe.



(b) Measurement result. (c) FEM simulation result.Fig. 3 Fabricated PCB and its magnetic field map.

Fig.2に示す測定系を構成し、MSL上のx方向の磁界 $H_x$ を測定 した.ネットワークアナライザ (Agilent, N5244A)を用い、ポー ト1から信号 (1GHz, -5 dBm)を印加した. MSL上面から1.5 mmの高さに磁界プローブ (NEC, CP-2S)を配置し、x,y方向に 中央から±25 mmの範囲でそれぞれ走査し、スペクトルアナライ ザ (Agilent, E4402B)を用いて磁界 $H_x$ を測定した. Fig. 3(b)に、 試作した PCBの近傍磁界測定の結果 (2 次元の磁界強度分布)を 示す.ここでは、最大値正規化を行い、 $-25\sim0$  dBの範囲でグレ ースケール化し、テスト用2次元磁界マップを作製した.

# 2.2 電磁界シミュレーション

Fig. 3(a) に示したような PCB を多数試作し、測定することは

容易ではない.そこで,提案システムの評価用に,有限要素法 (Finite element method, FEM) による電磁界シミュレーション (HFSS, Ansys Inc.) から $H_x$ の2次元磁界分布 (マップ)を求め た.このとき,線路の両端のポートで反射を生じないように設定し た.Fig. 3(c)は,Fig. 3(a)の測定範囲におけるシミュレーション結 果であり,測定値(Fig. 3(b))とほぼ同じ結果が得られている.Fig. 2に示すMSLの線路長を $l_s$ =5,10,...,50 mm と変化させて,合 計10枚のテスト用2次元磁界マップを用意した.なお,シミュレ ーションでは信号線幅を $w_s$ =0.80 mm とし,その他のパラメ ータは全て測定系と同一に設定した.

### 3. PCB 上磁界源の検出

計測された 2 次元の近傍磁界マップから磁界源を検出する方法 について述べる.

# 3.1 磁界源を検出するオブジェクト検出器

2 次元磁界マップから磁界源を検出するオブジェクト検出器を 構成した.オブジェクト検出に利用する YOLO は、入力画像を複 数個のグリッドセルに分割し、セル毎にランダムに生成した矩形 領域 (バウンディングボックス)の中から、検出対象と背景を判別 する信頼度と、各セルに写ったオブジェクトがどのクラスに属す るかの確率から、適切なバウンディングボックスを選択して出力 するアルゴリズムである.本検出器では、2次元磁界マップを入力 画像、検出対象をx方向磁界源とし、バウンディングボックスの寸 法と中心座標を出力させた.なお、検出器の作製にはMATLABを 利用しており、その環境で利用できる YOLO v4[15]を用いた.

# 3.2 学習データの作製

検出対象となる磁界源の等価ループ電流モデルを Fig.4 に示す. 本研究では、基板上のノイズ源となるすべてのコモンモード電流 を複数の等価ループ電流の重ね合わせで表すことを想定している. そこで、測定ばらつきなどの影響を考慮し、計算負荷を小さく、 様々な学習用パターンを用意するため、このループ電流モデルか ら発生する磁界 H<sub>4</sub> をビオ・サバールの法則に基づいて算出した. 最大値で正規化し、-25~0 dBの範囲をグレースケール化した 2 次元磁界マップを求めた.

近傍磁界算出における概略図 を Fig.5 に示す. マップの中心が モデルの中心となるように磁界観測面を設定した.また,様々な磁 界源の寸法に適用できるように、モデルの幅を  $w_{\rm m} = 0.8, 1.6, 2.4,$ ..., 8.0 mm,長さを  $l_{\rm m} = 4, 8, 12, ..., 100$  mm と変えた.ループの 高さは、本検討にて使用する配線基板厚の 2 倍の  $h_{\rm m} = 3.0$  mm, 磁界観測面の高さを  $h_{\rm p} = 1.5$  mm とした.さらに、近傍磁界測定に おいて生じるノイズフロアのばらつきを考慮し、-30, -25, -20dBの各ノイズフロアを、算出した磁界にそれぞれ与えた.これに より、合計 750 枚の 2 次元磁界マップを用意した.

# 3.3 オブジェクト検出器の学習

前節で作製した各磁界マップについて、中心から横方向±15 mm,縦方向±1/2 の範囲をバウンディングボックス(検出対象) とし、アノテーションを行った. Fig.6 にその例を示す. 合計 750 セットのデータの内、9 割を学習用、1 割を検証用としてランダム に分割し、オブジェクト検出器を学習した. 10 回の学習による平 均適合率は約 98.7%であった. ここで、平均適合率はオブジェク



Fig. 4 Loop current model.



Fig. 5 Calculation model for magnetic field distribution of loop current model.



Fig. 6 Examples of calculated 2D magnetic field sources for training and their annotation.

ト検出において、各再現率値における適合率値をプロットしたと きの下部面積であり、過剰な検出と、見逃しのバランスを表す指標 である.本結果から、作製したオブジェクト検出器は、検出対象を 精度よく検出できることが確認できた.

Parameters[mm]	Truth	Detected
l'm	30.0	30.6
Center coordinates of magnetic source $(x'_{m}, y'_{m})$	(25.0, 25.0)	(25.2, 25.3)

Table 1 Detection result in the case of Fig. 3(b).





# 3.4 PCB 上の磁界源の検出

作製したオブジェクト検出器に、第2.1,2.2節で用意した 11 枚のテスト用磁界マップを入力した. その結果, すべて の磁界マップに対し、磁界源を囲う1つのバウンディング ボックスが出力された. 出力されたバウンディングボック スから磁界源の長さ  $l'_m$ と中心座標  $(x'_m, y'_m)$ を抽出した. Table.1に, 試作 PCB で測定した磁界マップ (Fig. 3(b)) を入力した結果を示す. 誤差はあるものの, 検出できてい る. すべてのマップから求めた l'm と (x'm, y'm) について, 設定値との平均誤差を算出した結果,長さ l'm において約 2.2 mm, 中心座標 (x'm, y'm) においてはそれぞれ約 0.3 mm, 約 0.4 mm であり、おおむね正しく抽出できた. また、磁 界源が複数個ある場合について, FEM シミュレーションで 求めた磁界マップを用いて検出を行った. Fig. 7 は、磁界 源が2個の場合の例であり、2か所とも検出できている. 配線内で定在波を生じる場合については、定在波の節を境界にし て,腹の部分を異なる電流モデルとして,それぞれ検出できること を確認した.このように、磁界源が複数個ある場合について も同様に検出でき、本方法の有効性が確認された.

# 4. ループ電流モデル化

磁界源の検出結果(長さと中心座標)から、磁界源のループ電流 モデル化を行い、結果を評価する.

### 4.1 ループ電流モデルのパラメータ推定器

ループ電流モデルのパラメータ推定器は、先行研究 [14]と同様の CNN を持つ構成とした.畳み込み層 3層、プーリング層 3層、 全結合層 2層の構成をもつ 1D CNN を用いて、パラメータを回帰 分析する.入力は磁界源直上から x 方向に±10 mm の範囲の 1 次 元近傍磁界分布とし、出力するパラメータはモデルの高さ hm およ び幅 wm とした.なお、モデルの傾きは、モデル化の対象とする MSL が単線であることから、リターン電流が信号線の直下に流れると



Fig. 8 Measurement variability of probe position.

**Table 2** Estimated parameters of loop current model inthe case of Fig. 3(b).

Parameters[mm]	Truth	Estimated
$h'_{ m m}$		3.3
$w'_{ m m}$	0.74	1.2

# 考え, $\theta_{\rm m}=0^\circ$ とした.

# 4.2 パラメータ推定器の学習

パラメータ推定器用の学習データは、先行研究と同様に、Fig.5 に示すループ電流モデル上の磁界観測面の中心から、x 方向に±10 mmにおける磁界分布を学習データとした.モデルの幅を $w_m$ =0.5, 1.0, 1.5, ..., 3.0 mm, 高さを $h_m$ =1.5, 2.5, 3.5 mm と変え、合計18 個の1次元近傍磁界分布を算出した.各磁界分布に対し、測定にお けるコイル型磁界プローブのばらつきを考慮し、Fig.8に示すプロ ーブのPitch角のばらつきを $\Delta \varphi$ =±0, 0.2, 0.4, ..., 1°の11通り, 磁界観測面の高さのばらつきを $\Delta h_p$ =±0, 0.02, 0.04, ..., 0.1 mm の11通り、合計11×11=121枚の磁界分布を求めた.以上より 取得した合計 2,304 個の近傍磁界分布を用いて、パラメータ推定 器を学習させた.

# 4.3 ループ電流モデルの推定結果

オブジェクト検出器で検出した磁界源の結果を用いて、ループ 電流モデルを推定した.検出された磁界源の中心座標から x 方向 に±10mmの範囲の1次元近傍磁界分布を取り出した.それをパ ラメータ推定器に入力し、ループ電流モデルの高さ h'm および幅 w'm を推定した. 試作した MSL 上の磁界分布を入力した結果を Table.2 に示す.幅の推定結果は、実際の線路幅に比べて約0.5mm 広い結果であった.実験では、MSLの導体として銅を利用してい る. その抵抗成分によってリターン電流がグラウンド平板内で広 がりを持つため、磁界分布が大きく広がり、実際のパラメータより も大きく推定されたと考えられる.また、第2.2節で作成した10 枚の2次元磁界マップそれぞれについて推定した結果,幅wmの 平均値は0.85 mm, 高さ h'm の平均値は3.4 mm であった. 実験 値の場合と同様に、実際より大きい値で推定される傾向が見られ た. FEM シミュレーションでは、線路の断面において電流が端部 に集中する表皮効果による偏りがわずかに見られた. これも実際 よりも大きく推定された理由の一つと考えられる. Fig.9は、この



Fig. 9 Magnetic near-field distributions normalized by the maximum value in the cases of measurement, FEM simulation and their estimation results ( $l_s = 30$  mm).

ループ電流モデルから磁界分布を求めた結果の例であり, *l* = 30 mm の場合である実験値と FEM シミュレーションの結果 に対する推定値をそれぞれ示している.実験値(図中のプロット)およびシミュレーション値(破線)とそれぞれの推定値 の分布を比較すると,おおよそ一致しており,試作したパラメータ 推定器は正しく推定できることが確認できた.これらの結果から,本方法により,一方向磁界源をループ電流モデル化できることが示された.

#### 5. まとめ

PCB上の2次元近傍磁界分布から磁界源を検出して、それを等価ループ電流モデル化する方法を提案した.はじめに、ループ電流 モデルから理論的に計算された2次元磁界分布を機械学習させ、 磁界源の中心座標と長さを抽出するオブジェクト検出器を作製した.そして、検出結果から得られた位置情報から、磁界源の等価ル ープ電流モデル化を行った.その結果、磁界源の位置を推定でき、 妥当なモデル化ができることを確認した.本稿では単一方向の磁 界H.を対象に議論したが、Hyについても同様なシステムを構成す

### ることで、2次元化が可能となる.

今後は、素子・配線間や線路間に磁気結合が発生する場合について磁界源検出結果から磁気結合係数を推定する方法、そして多層 基板など実際の PCB への適用について検討する予定である.

#### References

- IEEE Standards Association Industry Connections, "Executive Summary," International Roadmap for Devices and Systems 2021 Edition, http://irds.ieee.org/. (Accessed at June 10, 2022).
- T. Sakurai and K. Tamaru: *IEEE Trans. Electron Devices*, 30, 183 (1983).
- H. Endo, T. Takagi, and Y. Saito: *IEEE Trans. Magn.*, 41, 1748 (2005).
- T. Sudo, H. Sasaki, N. Masuda, and J. L. Drewniak: *IEEE Trans. Adv. Packag.*, 27, 304 (2004).
- S. Muroga, K. Arai, S. Dhungana, R. Okuta, Y. Endo, and M. Yamaguchi: *IEEE Trans. Magn.*, 49, 3886 (2013).
- 6) J. Fan, IEEE Electromagn. Compat. Mag., 4, 67 (2015).
- B. Deutschmann, J. S. Khan, G. Winkler, and J. Victoria: 2021 13th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMC Compo), Bruges, Belgium, 19 (2022).
- A. Alcarria, A. Suarez, P. A. Martinez, J. Victoria, A. Amaro, and J. Torres: 2023 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC Europe), Krakow, Poland, P2(7) (2023).
- J. Pan, X. Gao, and J. Fan: *IEEE Trans. Electromagn.* Compat., 63, 580 (2021).
- H. Shrivastav, T. Enomoto, S. Seto, K. Araki, and C. Hwang: IEEE Trans. Electromagn. Compat., 63, 1035 (2021).
- H. Rezaei, X. Yan, D. J. Pommerenke, and D. G. Beetner: *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, 65, 1519 (2023).
- 12) Y. Takei, S. Muroga, and M. Tanaka: IEICE Technical report, EMCJ2020-68 (2021).
- 13) S. Muroga, T. Sasaki, H. Kamozawa, Y. Sato, T. Mikami, and M. Tanaka: 2022 Asia-Pacific Microwave Conference, Yokohama, Japan, IF-D02 (2022).
- 14) Y. Sato, S. Muroga, H. Kamozawa, and M. Tanaka: *IEEE Trans. Magn.*, **59**, 4000704 (2023).
- A. Bochkovskiy, C.-Y. Wang, and H.-Y. M. Liao: arXiv:2004. 10934 (2020).

#### 2024年10月31日受理 2025年1月31日採録