

スイッチ付きダイポールリフレクトアレーによる 散乱電界多様性を用いたマイクロ波イメージング

河田なな穂^{†,††} 陳 強^{††}

[†] アンテナ技研株式会社 〒337-0011 埼玉県さいたま市見沼区宮ヶ谷塔 4-72

^{††} 東北大学大学院工学研究科 通信工学専攻 〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-05

E-mail: [†]kawata@antenna-giken.co.jp, ^{††}qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

あらまし 散乱電界の多様性と深層学習を活用した、マイクロ波による金属物体のイメージング手法について検討する。提案するスイッチ付き無給電ダイポールリフレクトアレー (Randomly-Switched Dipole Reflectarray, RSDR) は各ダイポール素子に開放/短絡切替スイッチを持ち、開放/短絡するエレメント配置をランダムに切り替えることで単一周波数でも多様な散乱電界を生成することができる。ニューラルネットワークは弱散乱物体を前提とする電磁波散乱逆問題を含まないため、弱散乱物体を仮定した従来法の適用が難しい高コントラスト物体の形状推定を精度よく行うことが可能である。本報告では、散乱電界の多様性を実現する RSDR とニューラルネットワークの設計結果を述べ、金属物体の形状推定における提案手法の有用性について議論する。

キーワード マイクロ波イメージング, リフレクトアレー, ニューラルネットワーク

Microwave Imaging with a Switched Dipole Reflectarray

Nanaho KAWATA^{†,††} and Qiang CHEN^{††}

[†] Antenna Giken Co., Ltd. 4-72 Miyagayato, Minuma-ku, Saitama-shi, Saitama, 337-0011 Japan

^{††} Graduate School of Engineering, Tohoku University Aoba 6-6-05, Aramaki, Aoba-ku, Sendai, Miyagi, 980-8579 Japan

E-mail: [†]kawata@antenna-giken.co.jp, ^{††}qiang.chen.a5@tohoku.ac.jp

Abstract In this paper, a microwave imaging framework based on scattered field diversity using deep learning technique is studied. Each element in the proposed randomly-switched dipole reflectarray (RSDR) is equipped with an open/short switch, and the switching configurations are randomly selected to generate diverse electromagnetic field patterns even at a single frequency. Without solving the inverse scattering problem with the assumption of weak scatters, the proposed neural network can achieve accurate shape estimation of high-contrast targets. This report describes the design of the RSDR and the neural network, and discusses the shape estimation performance of the proposed method on a metallic object.

Key words microwave imaging, reflectarray, neural network

1. ま え が き

電磁波イメージングは、光学的に不透明な材料を透過でき気象条件や照明条件によらず利用できることから、幅広い分野で関心を集めている [1]。特に、マイクロ波の周波数帯域での電磁波イメージングは、セキュリティスクリーニング [2], [3] や医療診断 [4], [5] などの分野で活用されている。従来、これらの技術は合成開口レーダやフェーズドアレイレーダのような機械的/電子的スキャンを用いることが多く、ハードウェアが複雑化し、データ取得時間が長くなる懸念がある。

計算マイクロ波イメージング (CMI) は、画像再構成の負担を

ハードウェアからソフトウェアに移行させ従来技術の課題を克服する手段として注目されている [6]。従来の CMI は、放射場の事前知識を利用して、対象シーンの反射率等の推定値を再構成する逆問題として表されることが一般的である [7]。鮮明な画像生成のためには、プローブで得られる受信電界の情報を多重化する必要があるため、測定モードの多様性が必要である。電界多様性を実現する方法として、キャビティ構造やスロットを素子とするメタサーフェスを含む様々な周波数ダイバーシティ方式が提案されている [8]~[11]。しかしながら、周波数ダイバーシティ方式では広い周波数帯域幅が必要であり、利用可能なスペクトル資源不足により制約を受ける場合がある [6], [12], [13]。

アルゴリズムの観点では、電磁波散乱問題は一般的に非線形であり不良設定問題である (ill-posed). 代表的な計算手法であるコントラスト源反転法 (contrast source inversion, CSI) や部分空間最適化法 (subspace optimization method, SOM) では、解が収束するまで多数の計算を繰り返す必要があり、計算コストが非常に高い [14]~[16]. さらに、正確な画像構成のためには精密な順方向モデリングとセンシング行列の校正に依存する [8], [10].

これらの課題を解決するため、深層学習の CMI への導入が進み、散乱場と対象シーンの複雑な関係のデータ駆動型モデリングおよび高速推論が可能となった [15], [16], [18]~[20]. 代表的手法の一つに畳み込みニューラルネットワーク (convolutional neural network, CNN) があり、この手法では 2 次元の電磁コントラストがネットワーク入力として用いられる [14], [21]~[23]. これらの手法は通常、弱い散乱と低コントラスト物体を想定したボルン近似のもとで導出され、線形化モデルに基づき電磁コントラストまたは誘導電流を散乱源として再構成することを目的とする。しかしながら、金属物体などの高コントラストな対象では、非線形性の増大や多重散乱効果によりこのような近似を適用することが難しい [15], [17].

本報告では、導体反射板とスイッチ付き無給電ダイポールリフレクトアレー (Randomly-Switched Dipole Reflectarray, RSDR) からなる測定系に深層学習を組み合わせたマイクロ波イメージング手法を提案し、そのハードウェア設計とネットワークについて述べる。RSDR による散乱電界の多様性と深層学習を組み合わせることにより、少数の測定点を用いた正確な形状推定が可能となる。構造的共振への依存や広帯域動作を必要とする従来の動的メタサーフェス方式 [12], [13] と異なり、RSDR は複雑な給電ネットワークやスキャン機構によらず単一周波数でも多様な電磁界を生成する。これによりハードウェアの複雑さとデータ取得時間が大幅に削減される。また、ボルン近似に基づく電磁波逆散乱問題を解く代わりに、RSDR による電界多様性を活用し、測定された散乱場から直接物体形状を推定する。本手法は弱散乱物体を仮定しないため、多重散乱と非線形性が顕著な金属物体などの高コントラスト物体に適用可能である。

文 献

- [1] S. S. Ahmed, A. Schiessl, F. Gumbmann, M. Tiebout, S. Methfessel and L. -P. Schmidt, "Advanced Microwave Imaging," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 13, no. 6, pp. 26-43, Sept.-Oct. 2012.
- [2] D. M. Sheen, D. L. McMakin and T. E. Hall, "Three-dimensional millimeter-wave imaging for concealed weapon detection," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 49, no. 9, pp. 1581-1592, Sept. 2001.
- [3] J. N. Gollub, O. Yurduseven, K. P. Trofatter, D. Arnitz, M. F. Imani, T. Sleasman, *et al.*, "Large metasurface aperture for millimeter wave computational imaging at the human-scale," *Sci. Rep.*, vol. 7, no. 1, p. 42650, Feb. 2017.
- [4] N. Nikolova, "Microwave imaging for breast cancer," *IEEE Microw. Mag.*, vol. 12, no. 7, pp. 78-94, Dec. 2011.
- [5] M. T. Bevacqua, S. Di Meo, L. Crocco, T. Isernia, and M. Pasian, "Millimeter-waves breast cancer imaging via inverse scattering techniques," *IEEE J. Electromagn. RF Microw. Med. Biol.*, vol. 5, no. 3, pp. 246-253, Sept. 2021.
- [6] M. F. Imani *et al.*, "Review of Metasurface Antennas for Computational Microwave Imaging," *IEEE Trans. Antenn. Propag.*, vol. 68, no. 3, pp. 1860-1875, March 2020.
- [7] A. Li, M. Zhao, D. P. Lynch, S. Zhu, M. A. B. Abbasi and O. Yurduseven, "Frequency-Diverse Reflection Metasurface Antenna Design for Computational Microwave Imaging," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 5, no. 5, pp. 1240-1248, Oct. 2024.
- [8] T. Zvolensky, V. R. Gowda, J. Gollub, D. L. Marks and D. R. Smith, "W-Band Sparse Imaging System Using Frequency Diverse Cavity-Fed Metasurface Antennas," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 73659-73668, 2018.
- [9] T. V. Hoang, T. Fromenteze, M. A. B. Abbasi, C. Decroze, M. Khalily, V. Fusco, *et al.*, "Spatial diversity improvement in frequency-diverse computational imaging with a multi-port antenna," *Results Phys.*, vol. 22, p. 103906, 2021.
- [10] O. Yurduseven, J. N. Gollub, K. P. Trofatter, D. L. Marks, A. Rose and D. R. Smith, "Software Calibration of a Frequency-Diverse, Multistatic, Computational Imaging System," *IEEE Access*, vol. 4, pp. 2488-2497, 2016.
- [11] Y. Wei, X. Chen, B. Liu, Y. Huang, C. Duan and Q. Zhang, "2-D Single-Port Phase Coding Meta-Antenna Leveraging Frequency Diversity for Microwave Imaging," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 23, no. 11, pp. 3421-3425, Nov. 2024.
- [12] T. Sleasman, M. F. Imani, A. V. Diebold, M. Boyarsky, K. P. Trofatter and D. R. Smith, "Computational Imaging With Dynamic Metasurfaces: A Recipe for Simple and Low-Cost Microwave Imaging," *IEEE Antennas Propag. Mag.*, vol. 64, no. 4, pp. 123-134, Aug. 2022.
- [13] T. V. Hoang, V. Fusco, T. Fromenteze and O. Yurduseven, "Computational Polarimetric Imaging Using Two-Dimensional Dynamic Metasurface Apertures," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 2, pp. 488-497, 2021.
- [14] M. Farook Maricar, A. Zakaria and N. Qaddoumi, "A Contrast-Source Inversion-Assisted Attention-Unet for Microwave Imaging," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 142443-142456, 2025.
- [15] K. Xu, C. Zhang, X. Ye and R. Song, "Fast Full-Wave Electromagnetic Inverse Scattering Based on Scalable Cascaded Convolutional Neural Networks," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 60, pp. 1-11, 2022.
- [16] R. Guo *et al.*, "Physics Embedded Deep Neural Network for Solving Full-Wave Inverse Scattering Problems," *IEEE Trans. Antenn. Propag.*, vol. 70, no. 8, pp. 6148-6159, Aug. 2022.
- [17] K. H. Jin, M. T. McCann, E. Froustey and M. Unser, "Deep Convolutional Neural Network for Inverse Problems in Imaging," *IEEE Trans. Image Process.*, vol. 26, no. 9, pp. 4509-4522, Sept. 2017.
- [18] A. Lucas, M. Iliadis, R. Molina and A. K. Katsaggelos, "Using Deep Neural Networks for Inverse Problems in Imaging: Beyond Analytical Methods," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 35, no. 1, pp. 20-36, Jan. 2018.
- [19] J. Zhang *et al.*, "ClassiGAN: Joint Image Reconstruction and Classification in Computational Microwave Imaging," *IEEE Trans. Radar Syst.*, vol. 3, pp. 441-452, 2025.
- [20] H. M. Yao, L. Jiang and W. E. I. Sha, "Enhanced Deep Learning Approach Based on the Deep Convolutional Encoder-Decoder Architecture for Electromagnetic Inverse Scattering Problems," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 19, no. 7, pp. 1211-1215, July 2020.
- [21] C. Du, J. Pan, D. Yang, J. Hu, Z. Nie and Y. Chen, "A Physics-Assisted Deep-Learning Scheme Based on Globally Perceptive Modules for Electromagnetic Inverse Scattering Problems," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 63, pp. 1-14, 2025.
- [22] G. Esposito, F. Soldovieri and G. Gennarelli, "Quantitative GPR Imaging via U-NET: Radargrams Versus Microwave Tomographic Inputs," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 63, pp. 1-12, 2025.
- [23] Z. Wei and X. Chen, "Deep-Learning Schemes for Full-Wave Nonlinear Inverse Scattering Problems," *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. 57, no. 4, pp. 1849-1860, April 2019.