

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 15 日現在

機関番号：56203

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2012～2014

課題番号：24560432

研究課題名(和文)電磁波動現象の撮像と実時間三次元映像化手法の研究

研究課題名(英文) Study on Visualization of Electromagnetic Waves and Its Real Time Three Dimensional Display

研究代表者

塩沢 隆広 (SHIOZAWA, Takahiro)

香川高等専門学校・通信ネットワーク工学科・教授

研究者番号：20455166

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,200,000円

研究成果の概要(和文)：通信などに用いる高い周波数の電波などを即時に観察できる装置(電界カメラ)やコンピュータを用いて得られたデータを基に、電波の伝わる様子を3次元映像表示する研究です。

電波の伝わる素(電界ベクトル)を3次元モニタの空間の中に表示したり、電波の波の面(波面)を表示したりすることができるようになりました。例として、高周波数信号を伝える線路近傍の電界ベクトルを矢印表示したり、アンテナから放射される電波の波面を表示したりすることで、有効性を示しました。また、MICROWAVE WORKSHOPS & EXHIBITION (MWE) 2014において動態展示することで、研究成果を広く一般に公開しました。

研究成果の概要(英文)：The purpose of this research is to show three dimensional (3D) images of high frequency electromagnetic wave propagations, which are used in radio communications, etc., using the data acquired by the live electrooptic imaging (LEI) camera and/or computer simulations.

The electric vectors (the origin of the electromagnetic waves) and the electromagnetic wavefronts are successfully visualized by arrows and surface models in 3D space on a 3D display. For practical examples, the electric vectors near the strip line, propagating high frequency signals, are shown as 3D arrows and the electromagnetic wavefronts, emitted from the antenna, are shown by the surface models. These results were demonstrated at the MICROWAVE WORKSHOPS & EXHIBITION (MWE) 2014 university exhibition that was open to the general public. These demonstrations show the effectiveness of this 3D imaging approach for electromagnetic waves.

研究分野：電気・電子工学

キーワード：電波伝搬 電磁波 3次元映像 電気光学効果 3次元モニタ 電界 映像

1. 研究開始当初の背景

電波伝搬などの電磁波動現象の様子を直観的に把握するには、映像観察が有効である。このような手法は、マイクロ波コンポーネントの設計、解析、故障診断を著しく効率化すると期待される。また、専門家とは限らない一般人が電磁波動現象の理解を深める一助となる。

数値シミュレーション技術は、電磁波動現象の解析に多くの実績を持つ有効な手法であり、電磁波動現象を映像化する一手法でもある。しかし、複雑な回路、事象に対してはモデルの構築、検証に時間を要する場合がある。他方、光技術を用いた低侵襲な電波伝搬の計測手法として、電気光学 (Electrooptic (EO)) 効果を応用した電界プローブ[1]、また、磁気光学 (Magneto optic (MO)) 効果を応用した磁界プローブ[2]が実用化されているが、これらの方法で電磁波動現象の映像を得るためにはプローブの2次元走査が必要となり、映像化には長時間の測定が必要となる。

これに対して、研究代表者らは電磁波動現象を実時間で映像観察する装置および手法を独自に開拓した[3]-[4] (図1)。この装置を電界カメラと称している。電界の強度分布だけでなく位相情報も含めた撮像が実時間で可能である。

他方、劇場映画においては3次元 (Three Dimensional (3D)) 映画が定着しつつある。3Dテレビについては、衛星放送での定期的な放映があり、ゲーム機への普及も著しい。平面ディスプレイ技術の進歩に支えられた3Dモニタの入手は容易である。この状況は、電界映像に対して3D表示を導入する背景として好都合である。

電磁波動現象においては、3次元の要素を持つ電界ベクトルが3次元空間に分布し時間変化する。この多次元に渡る情報を効果的に表示する手法への要請は大きい。研究代表者の知る限り3D表示技術の適用例[5]は僅かである。実験的に撮像した結果への適用については皆無と思われる。

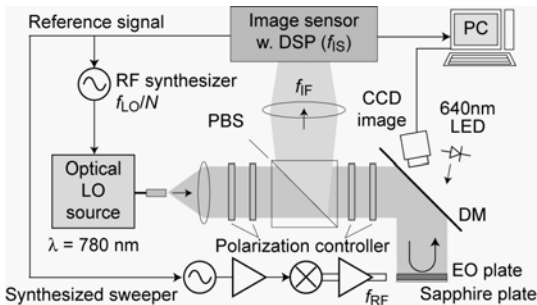


図1 電界カメラの構成

2. 研究の目的

本研究は、電気光学効果を応用して高周波電界を実時間で観察する装置である電界カメラや電磁界シミュレーションにより得られたデータを基に、高周波電磁波動現象を効

率良く3D映像表示する手法の開発を目標とした。

3. 研究の方法

図2に電磁波動現象の3D映像作成手順を示す。電界カメラで取得した電界映像データまたはシミュレーションデータから3次元コンピュータグラフィック (3DCG: Three Dimensional Computer Graphics) 技術を活用して左右視差画像 (映像) を作成する。ここで、3Dモニタの入力フォーマットに整合させる変換が必要な場合もある。

入手可能な3Dモニタ、およびグラフィックソフトウェアを活用して本研究を進めることを検討した結果、オープンソースのグラフィックソフトウェア OpenGL を用いて偏光メガネ方式の3Dモニタに表示する方法とマイクロソフト社の DirectX を用いて NVIDIA 社のグラフィックボードを搭載する液晶シャッターメガネ方式の3Dモニタに表示する方法の二つの方法が有望であることが分かった。両者を比較検討し、開発量、開発の容易性の観点から前者を選択した。

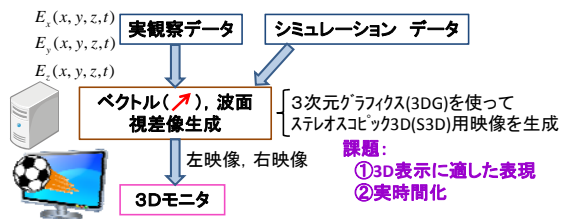


図2 3D映像の作成

4. 研究成果

ここでは電磁波動現象の新たな表示手法として、3D映像表示を適用した結果について、具体的表示例により報告する。

(1) アレイアンテナからの電波放射

(波面表示)

図3は4パッチアレイアンテナからの電波放射の例である。同図(a)に対象としたパッチアレイアンテナの写真を示す。アンテナ全

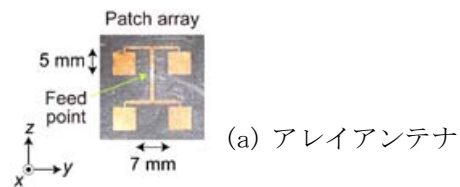


図3 アレイアンテナからの電波放射の視差像(波面表示)

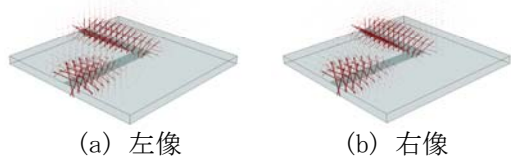
体の寸法は $17 \times 17 \text{mm}^2$ 、個々のパッチの寸法は $5 \times 5 \text{mm}^2$ 、信号周波数は 18GHz である。同図 (b) は、シミュレーションの位相データから波面（等位相面）を再構成することで作成した 3D 映像 1 フレームの左右視差像である。これにより波動伝搬の認識に立体感、現実感が与えられた。

本来、本研究の成果は、3D モニタ上に 3D 映像として表示されるものを観察することにより、立体感、現実感に付随する従来に無い情報を得るものであるが、紙面を用いる報告の制限上、後述の研究成果も含めて視差像や、ストロボ像（位相展開像）を用いて結果を報告する。

(2) マイクロストリップ線路の信号伝搬

による近傍電界ベクトル（矢印表示）

電磁波動現象における電界ベクトルを端的に表現する方法として 3D 矢印に着目し、この表現方法の適用を試みた。L 字マイクロストリップ線路の信号伝搬を対象とした 3D 矢印表現映像 1 フレームの左右視差像を図 4 に示す。矢印の長さは電界強度に比例する。図 5 には、左視差像のストロボ像を示す。屈曲部付近での電界ベクトルの 3 次元的な変化の様子がより容易に把握される。



(a) 左像 (b) 右像
図 4 L 字マイクロストリップ線路の信号伝搬による近傍電界ベクトルの視差像（矢印表示）

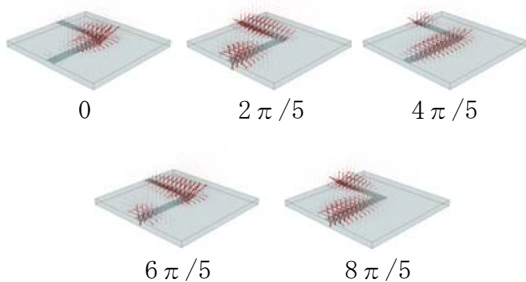
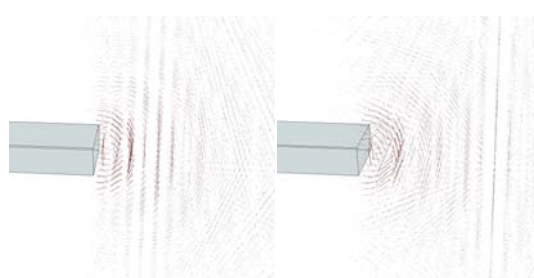


図 5 L 字マイクロストリップ線路の信号伝搬による近傍電界ベクトルの左像（位相展開）

(3) 導波管端面から放射される球面波の伝搬（矢印表示／波面表示）

空間伝搬波を 3D 矢印表示した例も作成した。図 6 は WR-10 導波管フランジ端面開口から放射される 100GHz 波の電界ベクトルを 3D 矢印表現することで作成した映像 1 フレームの左右視差像である。前例と同様に矢印の長さは電界強度に比例する。幾つかの改善必要点を含むものの、電界ベクトルの方向とその 3 次元的な変化の把握について効果が確



(a) 左像 (b) 右像

図 6 導波管端面から放射される球面波の電界ベクトルの視差像（矢印表示）



(a) 左像 (b) 右像

図 7 導波管端面から放射される球面波の視差像（波面表示）

認された。また、図 7 には対応する波面表示を示した。同表示方法は、3D 矢印表示を補完する 3 次元的情報を提示している。

(4) 検討

波面表示と矢印表示という二つの手法で 3D 表示を試みた。波面表示では電界の位相情報のみを用いたが、電界強度を色で表現する方法も考えられる。電界の絶対値を色表示した場合でも、電界ベクトル（各成分の大きさ）の情報は失われている。他方、矢印の方向で電界ベクトルの向きを、矢印の長さで電界強度を表す手法は、電界ベクトルの情報の全てを含むが、表示密度に制約が生じる。ここで示した例では、等間隔グリッド上の点における電界ベクトルを矢印で描いたが、グリッド間隔は目的に応じて調整されるべきである。また、不等間隔とする表示手法も考えられる。更に、設計、解析、故障診断、教育的な利用などの局面毎に表示すべき情報が異なると考えられる。ここで示した例は、いくつかの試みに留まる。今後は目的適合型の表示方法を更に開拓する。

<引用文献>

- [1] K. Yang, G. David, J.-G. Yook, I. Papapolymerou, L. P. B. Katehi, and J. F. Whitaker, "Electrooptic mapping and Finite-Element Modeling of the Near-Filed Pattern of a Microstrip Patch Antenna," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, 48, 2, pp.288-293, Feb. 2000.
- [2] E. Yamazaki, S. Wakana, H. Park, M. Kishi, and M. Tsuchiya, "High-Frequency Magneto-Optic Probe Based on BiRIG Rotation

Magnetization," IEICE Trans. Electron., E86-C, 7, pp.1338-1344, Jul. 2003.

- [3] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Photonics Makes Microwaves Visible," Research Highlights, IEEE Photonics Society Newsletter, 26, 6, pp.9-17, Dec. 2012.
- [4] M. Tsuchiya, K. Sasagawa, A. Kanno, and T. Shiozawa, "Live Electro-Optic Imaging of W-Band Waves," IEEE Trans. Microw. Theory Tech., 58, 11, pp.3011-3021, Nov. 2010.
- [5] 前川耕一郎, 白井宏, "電磁界の可視化表現," 信学総合大会, エレクトロニクス講演論文集 1, pp.S-23-S-24, Mar. 2008.

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計3件)

- [1] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Experimental Visualizations and Wave Vector Characterizations of Bloch Functions in Microwave Metamaterial Structures," Appl. Phys. Express, 6, 072602, pp. 1-4, July 2013. DOI:10.7567/APEX.6.072602 (査読有)
- [2] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Phase-Space Analyses of Electrooptically Visualized 100 GHz Waves Employing Complex Phasor Images," Appl. Phys. Express, 7, 032401, pp. 1-4, Feb. 2014. DOI:10.7567/APEX.7.032401 (査読有)
- [3] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Polarization States Imaging of Electromagnetic Wave," Appl. Phys. Express, 7, 062501, pp. 1-4, May 2014. DOI:10.7567/APEX.7.062501 (査読有)

[学会発表] (計12件)

- [1] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Experimental Visualization and Group Velocity Evaluation of Wave Packet on Left-Handed Transmission Line," Digest of IMS' 12, WEPR-1, June 2012. (査読有)
- [2] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Live Electrooptic Imaging for Visual Observations and Phase Velocity Evaluation of Internal Backward Waves in Two-Dimensional DNG Metamaterial," Proc. 2012 IEEE ISAP and USNC-URSI National Radio Science Meeting,

IF52.12, July 2012. (査読有)

- [3] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Real-Time Video-Accesses to Internal, External and Surface Microwaves in and around a Two-Dimensional Metamaterial Sample by Live Electrooptic Imaging," Proceedings of the Metamaterials 2012 Congress, pp. 218-220, Sep. 2012. (査読有)
- [4] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Live Electrooptic Imaging of K-Band Switching Actions and Parasitic Phenomena in MMIC Module," Proce. of 42nd EuMC, pp. 987-990, Oct. 2012. (査読有)
- [5] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Space-Domain Microwave Reflectometry using Electrooptic Imaging," Asia-Pacific Microwave Conference 2012 (APMC2012), 3C3-04, pp. 685-687, Dec. 2012. (査読有)
- [6] 塩沢隆広, 高田浩生, 土屋昌弘, "電波伝搬を実時間観察する電界映像技術", 映情学技報, BCT2013-34, Vol. 37, No. 6, pp. 23-28, Feb. 2013.
- [7] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Wavevector Mapping for Antenna Emission by Fourier Transform of Complex Electrooptic Images," Proc. 2013 IEEE ISAP and USNC-URSI National Radio Science Meeting, pp. 610-611, July 2013. (査読有)
- [8] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Wave-Vector Analyses for Bloch Waves in Two-Dimensional Metamaterial Sample using Electrooptically Derived Complex Phasor Images," Proceedings of the Metamaterials 2013 Congress, Sep. 2013. (査読有)
- [9] 塩沢隆広, 高田浩生, 土屋昌弘, "電波伝搬の実時間3D映像表示に向けて," 3D映像, Vol. 28, No. 1, pp. 152-158, Mar. 2014.
- [10] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "Electrooptic Imaging of Near-Field Electric Vectors Rotating over Side-Fed Planar Spiral Antenna," Proc. 2014 IEEE ISAP and USNC-URSI National Radio Science Meeting, pp. 299-300, July 2014. (査読有)

- [11] M. Tsuchiya and T. Shiozawa, "High Accuracy Electrooptic Imaging of Aerially Propagating 100-GHz Wave," Proc. 2014 IEEE ISAP and USNC-URSI National Radio Science Meeting, pp. 301-302, July 2014. (査読有)
- [12] 塩沢隆広, 直井翔吾, 土屋昌弘, "電界カメラ映像によるKバンド円偏波スロットアレイの動作解析," 2015年信学総合大会, B-1-51, 通信講演論文集 1, p. 51, Mar. 2015.

[その他]

ホームページ

[1] <http://www.cn.kagawa-nct.ac.jp/~shiozawa/index.html>

[2] <http://lei-camera.nict.go.jp/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

塩沢 隆広 (SHIOZAWA, Takahiro)
香川高等専門学校・
通信ネットワーク工学科・教授
研究者番号：20455166

(2) 連携研究者

研究者番号：
土屋 昌弘 (TSUCHIYA, Masahiro)
独立行政法人情報通信研究機構・
光ネットワーク研究所・上席研究員
研究者番号：50183869

(3) 研究協力者

山田 千彦 (YAMADA, Chihiko)
前日本工業大学, 元凸版印刷株式会社

佐藤 淳 (SATO, Atsushi)
前エアシステムエンジニアリング株式会社・
システム開発部・部長