

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 6 月 7 日現在

機関番号：12201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2016

課題番号：25390090

研究課題名(和文)「空間統計光学」の創成のための基礎研究

研究課題名(英文)Basic research for the creation of "Spatial Statistical Optics"

研究代表者

武田 光夫 (Takeda, Mitsuo)

宇都宮大学・オプティクス教育研究センター・特任教授

研究者番号：00114926

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：波動方程式の持つ「時間」と「空間」対称性に着目し、「アンサンブル平均」を「時間平均」ではなく「空間平均」で置き換えることにより、現在の「時間平均統計光学」と異なる「空間平均統計光学」の新体系を創成することを目指し、以下の研究を実施した。

(1)アンサンブル平均を空間平均に置き換える際の要となる空間統計の定常性の成立するための光源と光学系の条件の解明。(2)ベクトル光波の散乱場の偏光状態の空間統計の理論と実験解析法の提案。(3)複屈折リターデーション拡散板による偏光スペckル場の生成法と偏光スペckル場の空間統計の理論解析法の提案。(4)空間統計光学を応用した新しいイメージング技術の提案。

研究成果の概要(英文)：Noting the symmetry between space and time variables in the wave equation, a new realm of statistical optics, called spatial statistical optics, has been created in which the ensemble average is replaced by the spatial average, rather than by the time average in conventional statistical optics.

The following results have been achieved. (1) The conditions on a source and an optical system have been clarified for the statistical field to have wide-sense spatial stationarity. (2) The theory and the method of experiment have been proposed for spatial statistical analysis of vectorial optical fields. (3) The methods for generation of polarization speckle fields with a birefringent scatter plate and their spatial statistical analysis have been proposed. (4) New imaging techniques have been proposed that are based on spatial statistical optics.

研究分野：光学

キーワード：統計光学 コヒーレンス 偏光状態 スペckル 相関関数 イメージング ホログラフィ 光散乱

1. 研究開始当初の背景

現在の統計光学の理論体系は「確率過程」と「アンサンブル平均」という統計数学の概念を基礎に構築されており、「アンサンブル平均」を「時間平均」で置き換えることにより実験光学との接続をはかっている。しかし、レーザー光の光散乱場解析に対して「時間(平均)統計光学」は万能ではない。例えば、静止したすりガラスによるレーザー光の散乱場のスペックルは空間的にランダムな波動場であるが時間揺らぎがないので「時間平均統計光学」の定義ではコヒーレンス度が常に1の完全にコヒーレントな波動場となり、空間的にランダム分布する波動場の統計的性質を解析することができない。空間情報を解析するための新しい空間統計光学の構築が必要である。

2. 研究の目的

本研究は、波動方程式の持つ「時間」と「空間」対称性に着目し、「アンサンブル平均」を「空間平均」で置き換えることにより、現在と異なる統計光学の新体系、すなわち「空間統計光学」を創成することを目的とする。「空間統計光学」は時間の凍結を許す統計光学である。時間平均の概念が成立しない極短光パルスの瞬時散乱場や、逆に周波数超安定化CWレーザー光が形成する時間揺らぎのない光散乱場のように、現在の「時間統計光学」で扱うことのできない波動場の空間的揺らぎを解析するための基礎理論を構築し応用を開拓する。

3. 研究の方法

空間統計の定常性はアンサンブル平均を空間平均に置き換える際の要となる。極短光パルスなどの例外を除き、連続光波の時間揺らぎについては検出器の積分時間内で定常性がほぼ成立しているとみてよい。それに対して、空間揺らぎについては、光源自体の不均一空間分布や光学系の収差、回折の非等方性などで定常性が強く制約され、このことが空間統計光学を構築する上で最も難しい問題となると予想される。光源と光学系のどのような物理条件がどのように空間統計の定常性に関係するのかは全く知られていない。まずはそれを理論的に解明する。そして、空間定常性が成立する光学系と空間平均を用いた空間統計光学の応用分野を開拓する。

4. 研究成果

- (1) 光散乱場の空間的定常性のための物理条件の解明

図1に示すような光拡散板からの散乱光を扱う一般的な光学系を考え、散乱光源(光拡

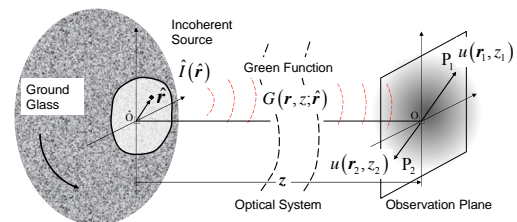


図1 空間定常性を調べるための光学配置

散板)から距離 z 隔てた観察面への光波伝搬をグリーン関数 $G(r, z, r')$ で表わし、コヒーレンス関数の空間定常性を論じた。その結果、空間定常性に関する以下の各項を明らかにした。

光源が広義の空間定常性を持ち、光学系がシフト不変性を持つ場合には観測面上の波動場も広義の空間定常性を持つ。空間定常性を持たないインコヒーレント光源からのフレネル回折場は、コヒーレンス関数の(位相因子を除いた)絶対値が移動不変性をもつという意味において広義の準定常性を持つ。

インコヒーレント光源であれば、光源自体が空間的に定常性を持たなくても、そのフーリエ回折場(フラウンホーファー回折場)は位相を含めて広義の完全な空間定常性を持つ。

- (2) 偏光散乱場に対する空間平均に基づく van Cittert-Zernike の定理を導き、その有効性を実験により実証した。
- (3) 散乱場の空間的定常性を利用した新しい応用として以下の原理の提案と実証実験に成功した。
拡散板の背後に隠された物体の3次元映像化
インコヒーレントな自己発光3次元物体のスペクトル映像の再生
- (4) ベクトル光波の散乱場の偏光状態の空間統計の理論と実験解析法の提案

空間統計光学の枠組みのなかでコヒーレンス理論と偏光理論を統一するための基礎となる以下の事項を実現した。

ベクトル光波の散乱場の偏光状態の空間分布を検出するための偏光干渉計の構成法の提案

偏光状態の空間的相関を定量的に評価するための合理的な指標として、空間の2点における偏光状態を2つのポアンカレベクトルの内積相関関数を用いる方法の提案。

所望の一般化ストークスパラメータをもつ波動場を生成する方法の提案

以上の提案の有効性を実験により実証した。

- (5) 光散乱場の空間統計光学の研究の位置づけと意義の明確化と応用例の提示
超短光パルスや超安定化レーザー光などの

時間領域または周波数スペクトル領域で局在した極限光波の解析に対する空間統計光学の重要性を示した。また、空間統計光学の具体的な応用例として空間相関コヒーレンスホログラフィーや空間的光子相関ホログラフィーの例を提示するとともに、フーリエ変換光学系において空間統計の広義定常性が成立することを実験例により明らかにした。

- (6) 複屈折リターデーション拡散板による偏光スペckル場の生成法と偏光スペckル場の空間統計の理論解析法の提案

拡散表面をもつ複屈折媒質のランダムなリターデーションをもちいた空間的ディポラライザーによる空間的非偏光場の生成原理を提案した。

空間的ディポラライザーから散乱されたベクトル光波が複素 ABCD 行列で記述される近軸光学系の任意の空間に生成する偏光スペckル場の偏光状態を求めるためのコヒーレンス行列の計算式を与えた。

上記に基づき、光波の伝搬にともなう偏光状態の変化の数値例を示し、その有用性を実証した。

- (7) Riesz 変換で生成された複素スペckル場の空間統計解析と擬似ストークスベクトル相関法の微小変位計測への応用

スペckル強度分布を Riesz 変換して得られる複素スペckル場の空間勾配と偏光のストークスパラメータの数学的な構造の類似性に着目した擬似ストークスベクトル相関法を提案した。

空間平均に基づく擬似ストークス相関を用いたスペckル相関変位計測法の分解能が従来の方法より優れていることを数字実験により示した。

- (8) 空間統計光学を応用した新しいイメージング技術の提案

光拡散板からの散乱光のスペckル空間平均による相関関数から光拡散板の背後に隠された物体の像を再生するホログラフィ相関映像法 (Holographic Correloscope) という新技術の提案し実験により原理の有効性を実証した。

散乱光の空間相関関数を求めるホログラフィ相関映像法が拡散板上に形成されるホログラムを直接撮影して得られるデジタルホログラムを数値再生することと等価であることを示し、この方法により拡散板の背後に隠された3次元物体像を再生できることを実験により示した (図2)。

偏光スペckルのテンソル場を測定できる干渉計を提案し、それを用いた実験により定理の有効性を実証した。

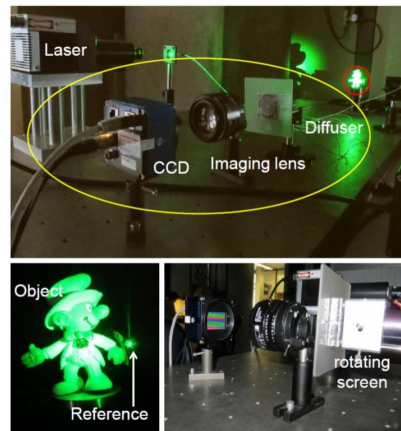


図2 拡散板の背後の物体のイメージングの実験

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 10 件)

M. Takeda, A. K. Singh, D. N. Naik, G. Pedrini, W. Osten, “Holographic correloscopy - unconventional holographic techniques for imaging a three-dimensional object through an opaque diffuser or via a scattering wall: A review,” IEEE Transactions on Industrial Informatics, Vol. 12, No.4 (8, 2016) pp. 1631-1640. 査読有

DOI: 10.1109/TII.2015.2503641

N. Ma, S. G. Hanson, M. Takeda, and W. Wang, “Coherence and polarization of polarization speckle generated by a rough-surfaced retardation plate depolarizer,” J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 32, No.12 (11, 2015) pp.2346-2352. DOI:10.1364/JOSAA.32.002346 査読有

S. Zhang, Y. Yang, S. G. Hanson, M. Takeda, and W. Wang, “Statistics of the derivatives of complex signal derived from Riesz transform and its application to pseudo-Stokes vector correlation for speckle displacement measurement,” Appl. Opt. Vol. 54, No. 28 (10, 2015) pp.8561-8565. DOI:10.1364/AO.54.008561 査読有

R. K. Singh, D. N. Naik, H. Itou, Y. Miyamoto, and M. Takeda, “Characterization of spatial polarization fluctuations in scattered field,” Journal of Optics Vol. 16 (2014) 105010-105021. 査読有

DOI:10.1088/2040-8978/16/10/105010

M. Takeda, W. Wang, D. N. Naik, and R. K. Singh, “Spatial statistical optics and spatial correlation holography: A review,” Optical Review, Vol. 21, No. 6, pp.849-861 (2014). 査読有

DOI: 10.1007/s10043-014-0138-2

W. Osten, A. Faridian, P. Gao, K. Körner, D. N. Naik, G. Pedrini, A. K. Singh, M. Takeda, and M. Wilke, "Recent advances in digital holography [Invited]," *Appl. Opt.*, Vol. 53, No. 27 (2014) pp. G44-G63. 査読有 DOI: 10.1364/AO.53.000G44

A. K. Singh, D. N. Naik, G. Pedrini, M. Takeda, and W. Osten, "Looking through a diffuser and around an opaque surface: A holographic approach," *Opt. Express*, Vol. 22, No 7, pp.7694-7701 (2014,3). 査読有 DOI: 10.1364/OE.22.007694

D. N. Naik, G. Pedrini, M. Takeda, and W. Osten, "Spectrally resolved incoherent holography: 3D spatial and spectral imaging using a Mach-Zehnder radial-shearing interferometer," *Opt. Lett.* Vol. 39, No.7, pp.1857-1860 (2014,3) 査読有 DOI: 10.1364/OL.39.001857

R. K. Singh, D. N. Naik, H. Itou, M. M. Brundabanam, Y. Miyamoto, and M. Takeda, "Vectorial van Cittert-Zernike theorem based on spatial averaging: experimental demonstrations," *Opt. Lett.* Vol. 38, No. 22, pp.4809-4812 (2013, 11). 査読有 DOI: 10.1364/OL.38.004809

M. Takeda, "Spatial stationarity of statistical optical fields for coherence holography and photon correlation holography," *Opt. Lett.* Vol. 38, No. 17, pp.3452-3455 (2013.9). 査読有 DOI: 10.1364/OL.38.003452

[学会発表](計 20件)

M. Takeda, "Marriage between holography and statistical optics for unconventional imaging: Coherence holography and holographic correloscopy (A Tutorial)," *Information Photonics 2017 (Yokohama, Japan) IP-20AM-2-1 (April 20,2017)*. (Invited Paper) 査読なし

J. Zhao, M. Takeda, and W. Wang, "Experimental study on degree of coherence for stochastic electromagnetic fields," *Proc. SPIE 10022, Holography, Diffractive Optics, and Applications VII (Beijing, China), 100222D (October 31, 2016)*; doi:10.1117/12.2247776 査読なし

N. Ma; J. Zhao, S. G. Hanson, M. Takeda, W. Wang, "3D polarisation speckle as a demonstration of tensor version of the van Cittert-Zernike theorem for stochastic electromagnetic beams," *Proc. SPIE 10022, Holography,*

Diffractive Optics, and Applications VII, (Beijing, China),100222F (31 October 2016); 査読なし doi: 10.1117/12.2247856

M. Takeda, A. K. Singh, D. N. Naik, G. Pedrini, and W. Osten, "Holographic correloscopy for imaging a 3-D object hidden behind a diffuser: A review," *Technical Digest, International Symposium on Optical Memory 2016, ISOM'16 (Kyoto, Japan) (10.19.2016)* p.146-147 (Invited Paper). 査読なし

M. Takeda, "Coherence holography and photon-correlation holography for imaging a 3-D object hidden behind a diffuser," *Symposium on super adaptive optics with wave field correction: Toward perfect imaging of the universe and live organisms, National Astronomical Observatory Japan (Tokyo, Japan) (3.23.2016)*. 査読なし

武田光夫:「統計的波動場の偏光とコヒーレンスの制御」(19p-S621-3) 第63回応用物理学会春季学術講演会(東工大,大岡山)(東京都・大田区)(3.19.2016)(招待講演) 査読なし

武田光夫:「Holographic Correloscopy: 光拡散板の背後の物体を透視する3次元イメージング」, 第10回NIBBバイオイメージングフォーラム「新時代のバイオイメージングの開拓」自然科学研究機構基礎生物学研究所(愛知県・岡崎市)(2.16. 2016). 査読なし

M. Takeda, A. K. Singh, D. N. Naik, G. Pedrini, and W. Osten, "Holographic correloscopy for imaging a 3-D object hidden behind a diffuser: A review," *International Workshop on Holography and Related Technologies 2015, IWH 2015 Digest (Okinawa, Japan) Dec.1-3, Tu1-1, pp.22-23 (2015)*. [Plenary Paper] 査読なし

A. K. Singh, D. N. Naik, G. Pedrini, M. Takeda, and W. Osten, "Real-time imaging through thin scattering layer and looking around the opaque surface," *Digital Holography and Three-Dimensional Imaging (Shanghai, China), DTh3A.5, 24-28 (May, 2015), ISBN: 978-1-55752-991-6, doi:10.1364/DH.2015.DTh3A.5* 査読なし

M. Takeda, "Coherence holography and photon-correlation holography; a step towards synthetic statistical optics," *Gerd Häusler Anniversary Colloquium, Universität Erlangen Nürnberg (Erlangen, Germany) (Feb. 2015) (Invited Paper)* 査読なし

武田光夫：「シンセティック統計光学 - 波動場の揺らぎの制御と統計的秩序の生成 -」日本光学会設立記念シンポジウム予稿集(東京都・板橋区), p.4 (1.16.2015). (招待講演) 査読なし

W. Wang, S. Zhang, N. Ma, S. G. Hanson, and M. Takeda, "Riesz transforms in statistical signal processing and their applications to speckle metrology: a review," The International Conference on Photonics and Optical Engineering (icPOE 2014, Xian, China), Proc. of SPIE Vol. 9449, 944904-1-9 (2015). [Invited Paper] DOI: 10.1117/12.2081318 査読なし

M. Takeda, "Spatial statistical optics for correlation holography," Proc. 2013 Japan-Taiwan Bilateral Symposium in Nano/Bio-Photonics (Hamamatsu, Japan) pp.19-20(2013,11, 24). [Invited Paper] 査読なし

M. Takeda, "Spatial stationarity of statistical optical fields for correlation holography," Fringe 2013, 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology (Nürtingen, Germany) Springer, pp.143-148 (2013,9). 査読有

A. K. Singh, D. N. Naik, G. Pedrini, M. Takeda, and W. Osten, "Holographic imaging of 3D object hidden behind a diffuser or around a corner," Fringe 2013, 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology (Nürtingen, Germany) Springer, pp.377-382 (2013,9). 査読有

D. N. Naik, G. Pedrini, M. Takeda, and W. Osten, "Recording of 3D spatial and spectral information of self-luminous objects using a Mach-Zehnder radial shearing interferometer," Fringe 2013, 7th International Workshop on Advanced Optical Imaging and Metrology (Nürtingen, Germany) Springer, pp.715-718 (2013,9). 査読有

M. Takeda, "Synthetic statistical optics for coherence shaping," VIII Iberoamerican Conference on Optics, XI Latin-american meeting on Optics, Lasers and Applications (Port, Portugal) (2013,7,25). [Invited Paper] 査読なし

W. Wang, J. Zhao, and M. Takeda, "Recent progress in statistical information optics: statistical information processing for optics," Proc. SPIE Vol.9066, Eleventh International Conference on Correlation Optics, (Chernivtsi, Ukraine) 906603 (December 17, 2013)

[Invited Paper] 査読なし

R. K. Singh, D. N. Naik, H. Itou, M. M. Brundavanam, Y. Miyamoto, and M. Takeda, "Relation between vectorial source structure and coherence-polarization of light," Proc. SPIE. Vol.8788, Optical Measurement Systems for Industrial Inspection VIII, (München, Germany) 878800 (May 13, 2013). DOI: 10.1117/12.2020842 査読なし

武田光夫：「空間統計光学：光散乱場の空間定常性とその応用」日本光学会 Optics & Photonics Japan 2013 (奈良公会堂) (奈良県・奈良市)(2013,11) 査読なし

〔図書〕(計 1 件)

武田光夫 (分担執筆)「統計光学」 pp.29-35：黒田和男，荒木敬介，大木裕史，武田光夫，森伸芳，谷田貝豊彦 (編集) 光学技術の辞典，朝倉書店(2014,8)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 光夫 (TAKEDA, Mitsuo)

宇都宮大学・オブティクス教育研究センター・特任教授

研究者番号：00114926

(4) 研究協力者

スティーン ハンソン (HANSON, Steen, G.)

王煒 (WANG, Wei)

ディネシュ ナイク (NAIK, Dinesh, N.)