

平成22年3月15日現在

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2006～2008

課題番号：18360034

研究課題名(和文) コヒーレンスホログラフィー:コヒーレンス場の新ホログラフィー技術の基礎と応用

研究課題名(英文) Coherence holography: Fundamentals and applications of an unconventional holographic technique for synthesis and control of coherence fields

研究代表者

武田 光夫 (TAKEDA MITSUO)

電気通信大学・電気通信学部・教授

研究者番号：00114926

研究成果の概要：

3次元物体をランダムな光波動場の空間コヒーレンス関数として再生するコヒーレンスホログラフィーの新原理を提案し、実験によりその有効性を実証した。コヒーレンスホログラムを計算機合成することにより、3次元空間コヒーレンス関数を自由に制御・シンセシスする技術を実現した。この新機能を用いた新しい工学的応用として波長分散のない3次元形状計測の可能性を実証した。また、基礎科学面ではコヒーレンス関数に位相特異点をもつコヒーレンス渦場を生成し、コヒーレンス場の運動量や角運動量などコヒーレンス場の力学的性質を解明した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	5,400,000	1,620,000	7,020,000
2007年度	5,100,000	1,530,000	6,630,000
2008年度	3,800,000	1,140,000	4,940,000
年度			
年度			
総計	14,300,000	4,290,000	18,590,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎 応用光学・量子光工学

キーワード：コヒーレンス，ホログラフィー，位相特異点，Vortex

1. 研究開始当初の背景

コヒーレンス関数を自由に生成・制御する技術は光トモグラフィやコヒーレンスゲート形状計測などの光計測や、高分解能顕微鏡や超LSI焼付け装置の部分コヒーレント照明系の実現など、光応用計測や極限結像系などの基盤技術として極めて重要である。にもかかわらず、3次元的にコヒーレンス関数を生成制御するための一般性のある基本原理は

いまだ知られていない。また、超短パルスや白色干渉や波長走査などの広帯域光源の時間コヒーレンスを用いた計測は、被計測物体や伝搬媒質の波長分散の影響を原理的にさけることができない。時間コヒーレンスに変わるものとして準単色光源の空間コヒーレンスを制御して分散の影響のない計測システムを実現できないか？本研究はこのような背景と問題認識に基づいて計画され、次に掲げる目的をもって実施された。

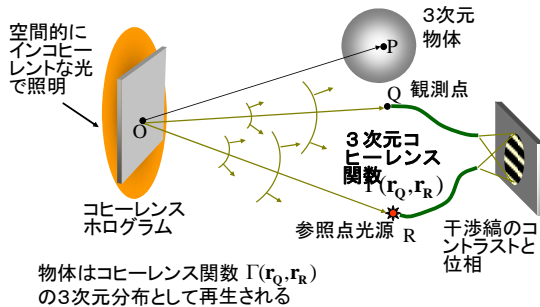
2. 研究の目的

本研究は空間コヒーレンス関数を自由に生成・制御するための新技術として「コヒーレンスホログラフイー」と呼ばれる全く新しい原理に基づく新ホログラフイー技術を提案し、その基礎を確立することを目的とする。「コヒーレンスホログラフイー」とは、ホログラムに記録した3次元物体を（従来のホログラムのように直接的な波動場として再生するのではなく）複素空間コヒーレンス関数の3次元分布として再生するという特殊な機能を持つ新しいホログラフイー技術に対して我々が与えた名称である。

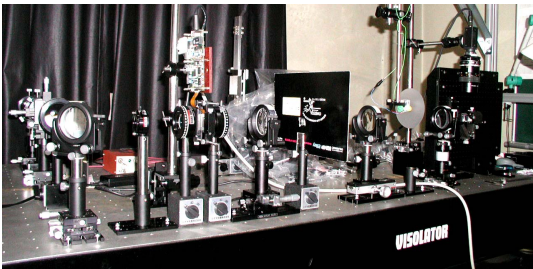
3. 研究の方法

(1) 基本原理の確立

光源と3次元コヒーレンス関数との関係を与える van Cittert-Zernike の定理の数学的形式が有限開口と3次元回折場の関係を与える Rayleigh-Sommerfeld の回折積分と完全に同形式であることに着目し、回折場のホログラフイー理論をコヒーレンス場のホログラフイー理論に発展させた。



図のように参照光に発散球面波を用いて記録したホログラムを空間的にインコヒーレントな光で再生すれば、記録した3次元物体の空間分布を参照光の位置 R と観測点 Q の間の3次元相互強度分布として再生することができる。



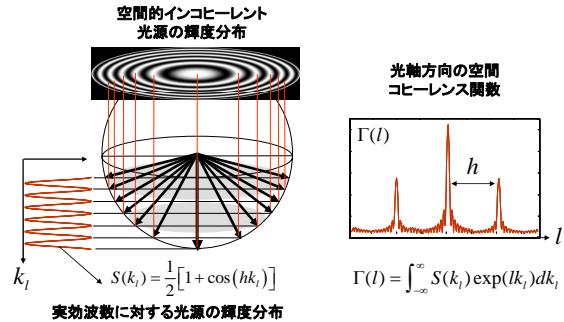
(2) コヒーレンス計算機ホログラム

計算機ホログラム (CGH) を用いて任意の波動場を生成・制御することができるように、コヒーレンス計算機ホログラム (CGCH) により任意の3次元コヒーレンス空間分布が実現できることができる。これを実証するために Gabor 型のコヒーレンス計算機ホログラム

ムを作成するとともに、コヒーレンス関数を可視化する干渉計の構成方法を提案した。

(3) 空間コヒーレンス関数の生成制御による断層映像（空間コヒーレンストモグラフィ）

広がりを持つ空間的にインコヒーレントな準単色光源の形状と輝度分布を適切に設計して光源分布を空間光変調器で表示して電子的に制御することにより（機械的な可動部なしで）所望の奥行き方向の空間的コヒーレンス関数分布を自由に生成し特定の断面



だけに高い空間コヒーレンスを持たせることができる。空間的にインコヒーレントな単色光源として図のような2次元ゾーンプレート状の輝度分布をもつ光源をもちいると波数ベクトル k は左図のように分布して、光軸方向の実効波数 k_i に対する光源の（空間周波数の）分光輝度分布 $S(k_i)$ は正弦波状の分布となる。光軸方向のコヒーレンス関数 $\Gamma(l)$ は $S(k_i)$ のフーリエ変換で与えられるので、右図のように物体の奥行きが $l=h$ に一致した点に高いコヒーレンスを持つので準単色光源の空間コヒーレンス関数を用いて無分散の断層映像を取得できる。

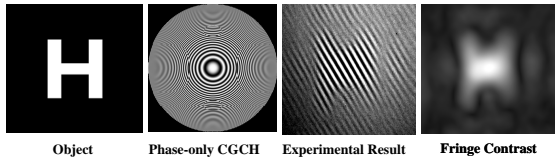
(4) コヒーレンス渦場の生成とコヒーレンス関数の位相特異点の性質

コヒーレンス関数は通常の光波と同じ波動方程式にしたがうので、光波の渦場や位相特異点と同様な物理現象をコヒーレンス関数に対しても生成することができるはずである。このことを実証するために、コヒーレンス計算機ホログラムを用いてコヒーレンス関数に位相特異点をもつコヒーレンス渦場の生成実験をおこなった。また、生成したコヒーレンス関数を干渉計を用いて定量的に検出評価することによりコヒーレンス渦場のもつ性質を解明した。

4. 研究成果

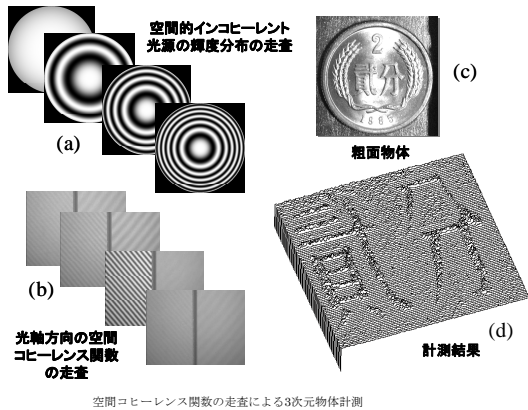
(1) コヒーレンス計算機ホログラムによる基礎原理の実証実験

図に示すような物体「H」を再生像とする Gabor 型のコヒーレンス計算機ホログラム (CGCH) を作成した。それを空間光変調器



(SLM)に表示し、回転すりガラスで生成した空間的にインコヒーレントな光で読み出した。コヒーレンスホログラムから再生された光波をマイケルソン干渉計に導いて干渉縞を形成した。3番目の図のようにホログラムに記録した物体「H」の部分に高い縞コントラストが観測された。フーリエ縞解析によりその縞コントラストをもとめ、空間コヒーレンス関数の空間分布を明るさで表示したものが4番目の図である。記録物体がコヒーレンス関数として再生できることが確認された。

(2) 空間コヒーレンス関数の生成制御による3次元形状計測

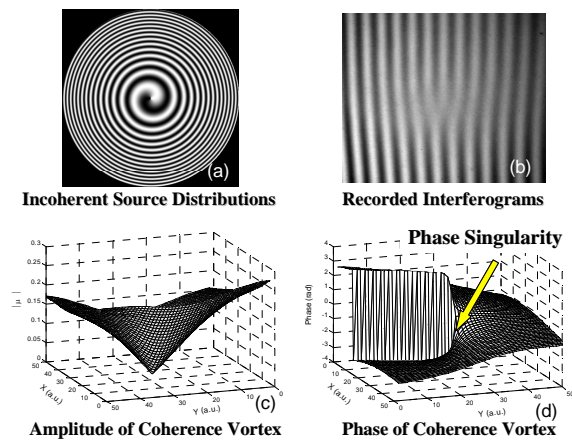


図(a)のようなゾンプレート状のコヒーレンスホログラムを空間光変調器に逐次表示して空間的にインコヒーレントな光源の形状を変化させることにより奥行き方向の空間コヒーレンス関数を走査した。図(b)はコヒーレンス関数の走査ともなう100ミクロン段差のあるゲージブロック上の干渉縞のコントラストの変化を表しており、最大縞コントラストの位置を検出することによりブロックゲージの段差を求めることができた。この方法が図(c)のような非研磨状態の粗面物体にも適用可能であることを示すためにコインを物体としてもちいた。粗面であるので干渉縞の代わりにスペックルパターンがあらわれる。空間コヒーレンス関数を奥行き方向に走査するとスペックルのコントラストが変化してその最大位置から図(d)のように3次元物体の形状の計測が可能であることが示された。

(3) コヒーレンス関数に位相特異点をもつコヒーレンス渦場の生成実験

図(a)螺旋状の位相をもつコヒーレンス計算

機ホログラムを作成し、それを空間的にインコヒーレントな光で再生した。図(b)は再生された光波を干渉計に導き干渉縞を形成させたものである。この干渉縞のコントラストと位相がコヒーレンスホログラムで生成された空間コヒーレンス関数の振幅と位相をあらわしている。中心部で干渉縞が2分岐しているところに位相特異点が存在し、そこでは干渉縞のコントラストがゼロになっている。この干渉縞を解析して得られた振幅と位相をそれぞれ図(c)と図(d)に示す。位相特異点ではコヒーレンス関数に対応する振幅がゼロになっていて、その周辺のコヒーレンス関数の位相は螺旋構造をしておりコヒーレンス渦場が形成されていることが確認できた。



以上に述べたように、本研究は従来のホログラフィーとは全く異なる機能をもつコヒーレンスホログラフィーという新しいホログラフィーの原理を提案し、実験的に初めて実証したものである。コヒーレンスホログラフィーを用いた3次元空間コヒーレンス関数の制御による3次元計測という工学的応用とコヒーレンス渦場の発生という基礎科学への応用の実証実験に成功した。

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)

- ① S. G. Hanson, W. Wang, M. L. Jakobsen, and M. Takeda, "Coherence and polarization of electromagnetic beams modulated by random phase screens and their changes through complex ABCD optical systems, J. Opt. Soc. Am. A, Vol. 25, No. 9, pp. 2338-2346 (2008, 9). 査読有り
- ② W. Wang, Y. Qiao, R. Ishijima, T. Yokozeki, D. Honda, A. Matsuda, S. G. Hanson, and M. Takeda, "Constellation

- of phase singularities in a specklelike pattern for optical vortex metrology applied to biological kinematic analysis," *Optics Express*, Vol. 16, No. 18, pp.13908-13917 (2008, 9). 査読有り
- ③ 武田光夫, 「光渦応用計測: ランダム光渦場の位相特異点を用いた新センシング技術」 *光技術コンタクト*, Vol. 46, No. 6, 253-257 (2008, 6). 査読なし
- ④ W. Wang and M. Takeda, "Separation of spin and orbital angular coherence momenta in the second-order coherence theory of vector electromagnetic fields," *Opt. Lett.*, Vol. 32, No. 18, pp. 2656-2658 (2007. 9) 査読有り
- ⑤ W. Wang, M. R. Dennis, R. Ishijima, T. Yokozeki, A. Matsuda, S. G. Hanson, and M. Takeda, "Poincaré sphere representation for the anisotropy of phase singularities and its applications to optical vortex metrology for fluid mechanical analysis," *Opt. Express*, Vol. 15, No. 17, pp. 11008-11019 (2007, 8). 査読有り
- ⑥ Z. Duan, Y. Miyamoto, and M. Takeda, "Dispersion-free optical coherence depth sensing with a spatial frequency comb generated by an angular spectrum modulator," *Opt. Express*, Vol. 14, No. 25, 12109-12121 (2006, 12). 査読有り
- ⑦ W. Wang, T. Yokozeki, R. Ishijima, S. G. Hanson, and M. Takeda, "Optical vortex metrology based on the core structures of phase singularities in Laguerre-Gauss transform of a speckle pattern," *Opt. Express*, Vol. 14, No. 22, 10195-10206 (2006, 10). 査読有り
- ⑧ W. Wang, S. G. Hanson, and M. Takeda, "Complex amplitude correlations of dynamic laser speckle in complex ABCD optical systems," *J. Opt. Soc. Am. A*, Vol. 23, No. 9, 2198-2207 (2006, 9). 査読有り
- ⑨ Wang and M. Takeda, "Linear and angular coherence momenta in the classical second-order coherence theory of vector electromagnetic fields," *Opt. Lett.*, Vol. 31, No. 17, 2520-2522 (2006. 9). 査読有り
- ⑩ W. Wang and M. Takeda, "Coherence Current, Coherence Vortex, and Conservation Law of Coherence," *Physical Review Letters* Vol. 96, 223904-1, 22394-4 (2006. 6). 査読有り
- ① W. Wang and M. Takeda, "Coherence dynamics, coherence topology, and singular optical coherence," *International Topical Meeting on Information Photonics 2008* (Awaji, Japan) 1-p6 (2008, 11, 17). (招待講演) 査読なし
- ② M. Takeda, W. Wang, and S. G. Hansaon, "Optical vortex metrology: Displacement and flow measurements with phase singularities," *Japan Taiwan Bilateral Science and Technology Symposium, Frontiers in Functional Optics* (Utsunomiya, Japan) pp.55-60 (2008, 11, 11) (招待講演) 査読なし
- ③ D. N. Naik, T. Ezawa, Y. Miyamoto, and M. Takeda, "Coherence holography using Sagnac radial shearing interferometer with geometric phase shift," *Japan Taiwan Bilateral Science and Technology Symposium, Frontiers in Functional Optics* (Utsunomiya, Japan) pp.116-117 (2008, 11, 11) 査読有り
- ④ 武田光夫, Wei Wang, Steen G. Hanson, 宮本洋子 「光渦応用計測: ランダム光渦場の位相特異点を用いた新センシング技術」 *日本光学会 Optics and Photonics Japan 2008 講演予稿集* (つくば市, 日本) 6aAS6 (2008, 11, 6). (招待講演) 査読なし
- ⑤ M. Takeda, W. Wang, Z. Duan, and Y. Miyamoto, "Coherence holography and time-space analogy in coherence functions," *Proc. International Symposium to Commemorate the 60th Anniversary of the Invention of Holography* (Springfield, USA), pp. 308-315 (2008, 10, 28). (基調講演) 査読なし
- ⑥ M. Takeda, W. Wang, Z. Duan, Y. Miyamoto, and J. Rosen, "Coherence holography and spatial frequency comb for 3-D coherence imaging and coherence vortex generation," *Best of Topicals in Frontiers in Optics (FiO)/Laser Science XXIV (LS) Conference* (Rochester, USA) SThA1 (2008, 10, 22). (招待講演) 査読なし
- ⑦ M. Takeda, W. Wang, Z. Duan, and Y. Miyamoto, "Coherence holography and 3-D coherence synthesis for dispersion-free spatial frequency tomography and profilometry," *Photon 08* (Edinburgh, UK) pp. 46-48 (2008, 8, 27). (招待講演) 査読なし
- ⑧ W. Wang and M. Takeda, "Birth and evolution of orbital angular coherence momentum associated with coherence vortex," *Photon 08* (Edinburgh, UK) 24-25

- (2008, 8, 27). 査読有り
- ⑨ W. Wang, A. Matsuda, S. G. Hanson, M. Takeda, "Diagnosis of polarization speckle based on frequency-multiplex Fourier transform method," Photon 08 (Edinburgh, UK) pp. 49-50 (2008, 8, 27). 査読あり
- ⑩ M. Takeda and W. Wang, "Coherence holography and singular optical coherence," Optics and Photonics for Information Processing II (San Diego, USA) Eds. A. A. S. Awwal, K. M. Iftekharrudin, Proc. of SPIE Vol. 7072, 70720A1-A11 (2008, 8, 13) (招待講演) 査読なし
- ⑪ W. Wang and M. Takeda, "Experimental investigation of the singular phenomena in statistical optical fields," The Nature of Light: Light in Nature II, (San Diego, USA) Ed. K. Creath, Proc. of SPIE Vol. 7057, 705704(1-8), (2008, 8, 11) (招待講演) 査読なし
- ⑫ W. Wang, A. Matsuda, S. G. Hanson, and M. Takeda, "The spatial degree of polarization and the first-order statistical properties of polarization speckle," Interferometry XIV: Techniques and Analysis (San Diego, USA) Eds. J. Schmit, K. Creath, C. E. Towers, Proc. of SPIE Vol. 7063, 70630B1-B9, (2008, 8, 11). 査読有り
- ⑬ W. Wang, R. Ishijima, A. Matsuda, S. G. Hanson, and M. Takeda, "Pseudo Stokes vector correlation for micro-displacement measurement," International Conference on Full-field Measurement Techniques and Their Applications in Experimental Solid Mechanics, (Loughborough, UK) (2008, 7, 20) Session 3, Paper 5. 査読有り
- ⑭ W. Wang, S. G. Hanson, and M. Takeda, "Optical vortex metrology for nano and bio measurements," The Rank Prized Fund Mini-symposium on optical aspects of non-destructive testing (Grasmere, UK), (2008, 5, 10). 査読なし
- ⑮ M. Takeda, W. Wang, Z. Duan, Y. Miyamoto, J. Rosen, "Coherence Holography and Spatial Frequency Comb for 3-D Coherence Imaging," OSA Topical Meeting on Digital Holography, (St. Petersburg, USA) (2008, 3, 16). DMA1 (招待講演) 査読なし
- ⑯ W. Wang, K. Chiba, S. G. Hanson, and M. Takeda, "Vortex sheets in optical and coherence fields," Complex Light and Optical Forces II (San Jose, USA), D. L. Andrews, E. J. Galvez, G. Nienhuis, Eds., Proc. SPIE Vol. 6905, 690506-690513 (2008, 1, 20). 査読有り
- ⑰ M. Takeda, W. Wang, S. G. Hanson, and Y. Miyamoto, "Optical vortex metrology: are phase singularities foes or friends in optical metrology?" 8th International Conference on Correlation Optics (Chernivtsi, Ukraine) Proc. SPIE Vol. 7008, pp. 1G1-1G8 (2007. 9, 18) (基調講演) 査読なし
- ⑱ W. Wang and M. Takeda, "Coherence vortex with orbital angular coherence momentum and wave-particle duality in correlation function," The Nature of Light: Light in Nature I, (San Diego, USA); C. Roychoudhuri, A. F. Kracklauer, and K. Creath, Eds., Proc. SPIE, Vol. 6664, pp. 66640M-1-66640M-9 (2007, 8, 5). 査読有り
- ⑲ W. Wang, Y. Qiao, R. Ishijima, T. Yokozeki, D. Honda, A. Matsuda, S. G. Hanson, and M. Takeda, "The spatial structures of pseudophase singularities in the analytic signal representation of a speckle pattern and their application to biological kinematic analysis," International Conference on Experimental Mechanics, ICEM 13 (Alexandroupolis, Greece) (2007. 7, 22). 査読あり
- ⑳ M. Takeda, W. Wang, S. G. Hanson, and Y. Miyamoto, "Optical vortex metrology: Displacement measurements with phase singularities," Sixth Euro-American Workshop on Information Optics (Reykjavik, Iceland), AIP Conference Proceedings, Vol. 949, pp. 185-191 (2007. 7, 20). (招待講演) 査読なし
- ㉑ W. Wang and M. Takeda, "Decomposition of total anugular coherence momentum in vectorial coherence theory of electromagnetic field," 6th Intenational Workshop on Information Optics, WIO '07, (Reykjavick, Iceland), AIP Conference Proceedings, Vol. 949, pp. 293-294 (2007, 7, 20). 査読有り
- ㉒ W. Wang, M. R. Dennis, R. Ishijima, T. Yokozeki, A. Matsuda, S. G. Hanson, and M. Takeda, "Fluid mechanics measurement based on the anisotropic core structure of pseudophase singularities in analytic signal representation of speckle pattern," Optical Measurement Systems for Industrial Inspection V, (Munich, Germany) W. Osten, C. Gorecki, and E. L. Novak Eds., Proc. of SPIE Vol. 6616, 66160W1-6616W8 (2007. 6, 19). 査読

有り

- ⑳ M. Takeda, W. Wang, Z. Duan, and Y. Miyamoto, "Coherence holography: Principle and applications," Extended Abstract, Workshop on Random Electromagnetic Fields (Orland, USA) p.6 (2007, 5, 23). (招待講演) 査読なし
- ㉑ P. Pavelcek, Z. Duan, and M. Takeda, "Spatial coherence profilometry," 15th Czech-Polish-Slovak Conference on Wave and Quantum Aspects of Contemporary Optics, (Bruno, Czeck) Eds. M. Miler, D. Senderáková, and M. Hrabovský, Proc. of SPIE Vol. 6609, (16-1)-(16-7), (2007, 4, 20). 査読有り
- ㉒ M. Takeda, W. Wang, Z. Duan, and Y. Miyamoto, "Coherence Holography and Spatial Frequency Comb: Control and Synthesis of Spatial Coherence Function for Dispersion-free Photonic Sensing," 8th International Conference on Optoelectronics, Fiber Optics and Photonics, Photonics 2006, (Hyderabad, India) D4-1 (2006, 12, 8). (基調講演) 査読なし
- ㉓ W. Wang and M. Takeda, "Coherence Momentum in Second-Order Vectorial Coherence Theory of Stationary Electromagnetic Fields," Frontiers in Optics 2006, OSA Annual Meeting, (Rochester, USA) JWD43 (2006, 10, 20). 査読有り
- ㉔ W. Wang, Z. Duan, S. G. Hanson, and M. Takeda, "Experimental observation of the evolution of the fractional topological phase for a coherence function," Frontiers in Optics 2006, OSA Annual Meeting, (Rochester, USA) PDP-FB1 (2006, 10, 20). 査読有り
- ㉕ M. Takeda, W. Wang, Z. Duan, and Y. Miyamoto, "Coherence Holography: Principle and Applications," Speckle06: Speckles, From Grains to Flowers (Nimes, France) P. Slangen, C. Cerruti, Eds., Proc. SPIE Vol. 6341, pp. (12-1)-(12-7) (2006, 9, 10). (招待講演) 査読なし
- ㉖ Z. Duan, W. Wang, A. Yamada, Y. Miyamoto, and M. Takeda, "Absolute speckle interferometry with an angular-spectrum-tunable source," Speckle06: Speckles, From Grains to Flowers (Nimes, France) P. Slangen, C. Cerruti, Eds., Proc. SPIE Vol. 6341, pp. (18-1)-(18-5) (2006, 9, 10). 査読有り
- ㉗ W. Wang, T. Yokozeki, R. Ishijima, A. Wada, S. G. Hanson, Y. Miyamoto, and M. Takeda, "Sub-pixel speckle displacement

measurement by using optical vortex metrology," Speckle06: Speckles, From Grains to Flowers (Nimes, France) P. Slangen, C. Cerruti, Eds., Proc. SPIE Vol. 6341, pp. (17-1)-(17-6) (2006, 9, 10). 査読有り

- ㉘ W. Wang, T. Yokozeki, R. Ishijima, S. G. Hanson, and M. Takeda, "Nanometric displacement measurement using phase singularities in Laguerre-Gauss transform of speckle pattern," Interferometry XIII: Techniques and Analysis (San Diego, USA) K. Creath and J. Schmit, Eds., Proc. SPIE Vol. 6292, (2006, 8, 8). 査読有り
- ㉙ W. Wang and M. Takeda, "Coherence current: contrast flow in coherence function," The Nature of Light: Light in Nature (San Diego, USA) K. Creath Ed., Proc. SPIE Vol. 6285 (2006. 8, 8). 査読有り

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

- ① 武田光夫, 王煒, 横関友亮, 石島玲華, チャオユー「変位検出方法, 及び, 変位検出装置, 変位検出プログラム, 並びに, 特徴点マッチング処理方法, 特徴点マッチングプログラム」国際出願番号 PCT/JP2007/51095 出願日 2007/01/24
- ② 武田光夫, 王煒, 横関友亮, 石島玲華, チャオユー「ポイントマッチングアルゴリズムを用いた変位変形検出装置」特願 2006-303238 出願日 2006/11/08
- ③ 武田光夫, 王煒, 横関友亮, 石島玲華「位相特異点検出方法, 及び, 位相特異点検出装置, 並びに, プログラム」特願 2006-117103 出願日 2006/04/20

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

武田 光夫 (TAKEDA MITSUO)
電気通信大学・電気通信学部・教授
研究者番号: 00114926

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者

宮本 洋子 (MIYAMOTO YOKO)
電気通信大学・電気通信学部・助教
研究者番号: 50281655