

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 16 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2011～2013

課題番号：23360176

研究課題名(和文) チャネルド偏光計の新原理と特性の改善

研究課題名(英文) Channeled polarimetry: development of new principle and improvement of its performance

研究代表者

岡 和彦(Oka, Kazuhiko)

北海道大学・工学(系)研究科(研究院)・准教授

研究者番号：00194324

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 14,200,000円、(間接経費) 4,260,000円

研究成果の概要(和文)：チャネルド偏光計測法は、偏光状態の波長ないし空間分布を、機械的ないし能動的な偏光制御素子を用いずに、かつスナップショットで測定できる方法である。我々はこのチャネルド偏光計の性能と機能の向上を目的として研究を行った。チャネルド分光偏光計測に関しては、サバル板と2次元CCD付き分光器を使った新しい原理を開発し、偏光計測の波長分解能を飛躍的に向上させた。さらに、この原理にチャネルド分光偏光変調器(CSPSG)を組み合わせることにより、分光ミューラー行列をスナップショットで測定できる偏光計を開発した。また、チャネルド撮像偏光計測については、その精度の向上と特異偏光を持つ光への応用を行った。

研究成果の概要(英文)：Channeled polarimetry is a snapshot method for the measurement of the spectrally- or spatially-resolved polarization-distribution without using neither mechanical nor active elements for polarization modulation. The project aimed to enhance the performances and functions of the channeled polarimetry. For the spectroscopic channeled polarimetry, a novel principle using Savart plates and a spectrometer with a two-dimensional CCD was developed to drastically enhance the spectral resolution for the polarization measurement. Furthermore, this principle was combined with a channeled spectroscopic polarization state generator (CSPSG) to develop a snapshot spectroscopic Mueller-matrix polarimeter. For the imaging channeled polarimeter, we improved its precision and applied it to lights with singular polarizations.

研究分野：光波センシング・応用光学

科研費の分科・細目：電気電子工学・計測光学

キーワード：チャネルド偏光計測 分光偏光計測 撮像偏光計測 高速偏光計測 高精度偏光計測 サバル板

1. 研究開始当初の背景

近年、液晶ディスプレイ・太陽電池や半導体の製造・バイオテクノロジー・ナノテクノロジー・リモートセンシング・ロボットビジョンなどの様々な分野において、偏光計測の利用が急速に拡大している。これは偏光が、測定対象における物質の異方性、ナノ構造、表面の微細な秩序などに敏感に応答できる性質をもっているためである。しかしながら現用の偏光計測技術は、これら新しい用途からの様々な要求を十分に満足出来るだけの柔軟性・多様性を持ってはいなかった。その主な理由の一つは、現用法では機械的ないし能動的な偏光変調素子が必要不可欠なことにある。偏光変調素子の動作には、動作時間の考慮が必要、高精度な駆動回路が必要、熱や振動が発生する、体積・重量が減らしにくい、消費電力がかかるなどといった多くの難点がある。ゆえに従来の偏光計測では、偏光変調素子の性質による様々な制約を受けてきた。

この様な背景の下に 1998 年に我々は、偏光変調素子が一切不要な「チャンネルド偏光計測法」を発明した。この方法は、分光偏光計測（偏光状態の波長分布測定）および撮像偏光計測（偏光状態の 2 次元空間分布、即ち偏光画像の測定）に利用可能であり、一回のスペクトル取得ないし画像取得のみで、高速に偏光分布を測定できるという特徴を持つ。このうち分光偏光計測のためのチャンネルド偏光計では、従来法における偏光変調素子の代わりに、2 つの高次移相子を用いる。高次移相子の性質は波長に強く依存するため、分光器での波長走査と同時に移相子の特性の（等価的な）変調も行われる。このため偏光変調素子を陽に用いなくても分光偏光計測が可能となり、結果として偏光変調素子に起因する様々な制約を排除することができる。また、光の偏光状態についてのすべてのパラメータの波長分布が同時かつ独立に決定できる。すなわち偏光の波長分布のスナップショット（ワンショット）計測が可能となる。なお、本法を撮像偏光計測へ適用する場合には、複屈折プリズムやサバール板を用いて、分光偏光計測と同様の原理を 2 次元空間（画像）で実現する。

この原理により、従来法では不可能であったような様々な新しいタイプの偏光計が実現できるようになった。これまでに我々は、上記の特長を生かして、応答時間 20ms の高速分光エリプソメトリ、鉛筆サイズの超小型分光偏光計、眼底観測のための撮像偏光計などを開発してきた。さらに、特に分光偏光計測に関しては、様々な誤差要因の解明とそれらの低減により、高い精度（偏光の方位角や楕円率角にして 0.1° 以下）を得ている。

ただし、このチャンネルド偏光計測法には、
(1) 分光偏光計測については、波長分解能などに制約がある。
(2) 撮像偏光計測については、精度が未だ不

十分である。

という問題が残っており、本法の応用可能分野を制限する主要因となってきた。

2. 研究の目的

本研究では、前節で述べたチャンネルド偏光計測法の利点はできるだけ保ったまま、応用展開の障害となっているいくつかの問題点や制約の解消を目的とした。そして、近年の偏光計測に対する多様かつ高度な要求に答えうる、高性能なチャンネルド偏光計測の実現を目指した。さらに、撮像偏光計測に関しては、単に計測原理の改良のみならず、その応用・発展についても基礎検討を行った。

3. 研究の方法

本研究の具体的な方法は以下のとおりである。

(1) 分光偏光計測について：波長分解能などの制約を取り除くため、新計測原理を提案する。

サバール板を用いたチャンネルド分光偏光計測法の開発
波長キャリアと空間キャリアの併用による分光ミューラー行列測定法の開発

(2) 撮像偏光計測について：基本性能を向上し、さらに応用の開拓を図る。

撮像偏光計測用チャンネルド偏光計の基本性能向上
応用開拓：特異点を有する偏光分布の測定およびその特性解明

4. 研究成果

(1) 分光偏光計測用チャンネルド偏光計の新原理の開発

サバール板を用いた分光偏光計測用チャンネルド偏光計の開発

これまでの分光偏光計測用チャンネルド偏光計では、波長キャリアを利用するという原理ゆえ、分光器に高い波長分解能を持たせることが必須であった。我々はこの制約なしにスナップショットでの分光偏光計測を実現するために、2 枚のサバール板と 2 次元分光器を組み合わせた新しい分光偏光計測法を発明した。

本法の光学系の基本構成を図 1 に示す。被測定光は、波長に依存した偏光特性を持つ細い光ビームである。この被測定光を、ビームエキスパンダー（BE）およびレンズ L_1 によって、集光する光に変換する。次にこの光を、第 1 のサバール板 SP_1 、広帯域半波長板 AHWP、第 2 のサバール板 SP_2 、および検光子 A を順に透過させる。そしてこの光を、レンズ L_2 を透過させた後、2 次元 CCD 付きマルチチャンネル並列分光器のスリットに入射させる。ここで 2 次元分光器の入射スリットは、レンズ L_2 の後焦点面上に配置しておく。この分光器は、スリット上の各点のスペクトルを一度

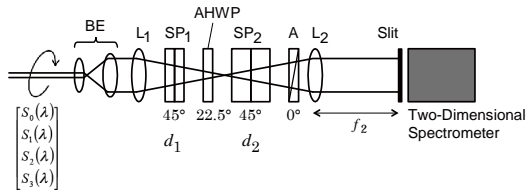


図 1 サバル板を用いた分光偏光計測用チャンネル偏光計

に求めることができるものであり、CCD からは空間 1 次元および波長 1 次元の 2 次元スペクトル分布が得られる。

今、光軸に沿って z 軸を取り、それに垂直な面内に x, y 直交座標を取る。ただし、 y 軸は分光器のスリットに沿って取るものとする。2つのサバル板 SP_1 と SP_2 の偏光軸を両者とも x 軸に対して $\pm 45^\circ$ 方向とし、各々の空間シフトの方向を y 軸に一致させる。そして両者の間の HWP の速軸方位を 22.5° とする。こうすると、サバル板を 2 回通った光には、 y 軸に沿った 4 通りの異なる空間シフトが与えられる。この 4 つの光を透過軸方位が 0° の検光子 A に透過させ、レンズ L_2 の後焦点面上で互いに干渉させる。この光を 2 次元分光器で分光すると、 y 軸方向に振動する縞状の強度分布が形成される。このスペクトルに、 y 軸に沿って各波長毎に空間周波数フィルタリングを施すと、1つの低周波成分と3つの正弦波成分に分離することができ、各々からその波長での4つのストークスパラメータそれぞれを分離復調できる。

この計測原理では、オリジナルのチャンネル分光偏光計で使われていた波長キャリアの代わりに、空間キャリアを利用している。これによりストークスパラメータの復調が 2 次元分光器の波長毎に独立に行われるので、偏光計測の波長分解能や波長範囲は分光器のそれと一致する。すなわち、これまでのチャンネル分光偏光計に比べて偏光計測の波長分解能を飛躍的に向上できる。さらにこの方法では、チャンネル偏光計の他の特徴、たとえば回転移相子などの機械的ないし能動的な偏光変調素子が不要である、また全ての波長分布をスナップショットで測定することができるといった利点もすべて兼ね備えている。

本法の有効性は、Xe ランプを光源とした白色光での基礎実験により確認された。

波長キャリアと空間キャリアの併用による分光ミューラー行列測定

一般に「多色光の偏光状態」は4つの分光ストークスパラメータで記述されるが、多色光が透過ないし反射する「媒質の入出力偏光特性」は、媒質が線形の場合分光ミューラー行列によってあらわされる。この行列は互いに独立な波長の関数を $4 \times 4 = 16$ 要素含む。このため、2重回転移相子法などの代表的な

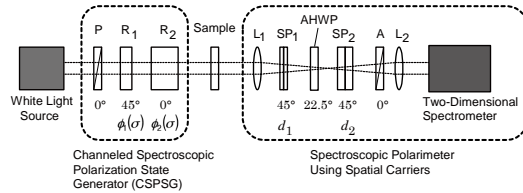


図 2 波長キャリアと空間キャリアの併用による分光ミューラー行列測定

分光ミューラー行列測定法では、一回の測定に 16 回以上のスペクトル取得が必要である。本研究では、この成果を下にして、一回のスペクトル取得のみで分光ミューラー行列の 16 要素全てを一度にかつ独立に求める事ができる新たな方法を考案した。

分光ミューラー行列偏光計の基本構成を図 2 に示す。白色光源から発せられた連続スペクトルを持つ光は、まず 1 枚の偏光子 P および 2 枚の高次移相子 R_1 と R_2 からなるチャンネル分光偏光変調器 (CSPSG) を透過し、次に試料に入射する。試料入射光の偏光状態は、高次移相子の強い波長分散により、波長軸に対して細かく変調されている。一方、試料の後には、図 1 の空間キャリア生成偏光素子を含む光学系が置かれている。結果として 2 次元分光器の CCD から得られるスペクトルには、波長方向と空間方向それぞれに多重に振動する複数のキャリア成分が含まれることとなる。このスペクトルに、両方向の周波数フィルタリングを施すと、16 要素の波長の関数からなる試料の分光ミューラー行列を求めることができる。

この方法では、一回のスペクトル測定のみで、分光ミューラー行列のすべての要素を一度に求めることができるという特徴がある。また、機械的ないし能動的な偏光制御素子も不要である。

本法の有効性を確認するために、Xe ランプを白色光源に、そして水晶波長板を試料に用いて実証実験を行い、有効な結果を得た。

(2) サバル板を撮像偏光計測の性の向上と応用開拓

撮像偏光計測用チャンネル偏光計の基本性能向上

チャンネル偏光計測法は、これまで述べた分光偏光計測の他に、撮像偏光計測、即ち偏光状態の 2 次元空間分布の計測に用いる事ができる。本法ではスナップショットでの撮像偏光計測を可能とするために、オリジナルのチャンネル分光偏光計における波長キャリアの代わりに、空間キャリアを用いる。これまでに我々は、この空間キャリアの生成にサバル板を用いる方法を対象として、いくつかの基本性能向上を目指した研究を行ってきた。しかしながら、高い感度での偏光測定に利用するには未だ精度が不十分であった。そ

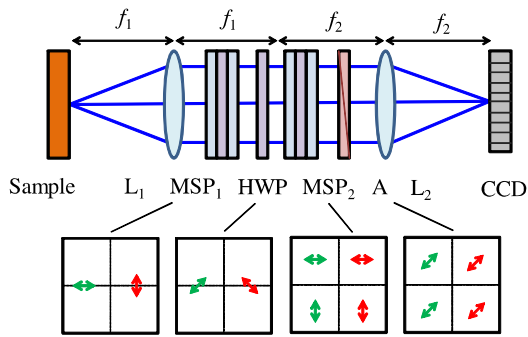


図 3 サバール板を用いた撮像偏光計

ここで本研究では、サバール板を用いる偏光計測法について、誤差要因の解明とその除去を研究した。

サバール板を用いた撮像偏光計の構成例を図3に示す。なお本図では、偏光計の誤差低減のため通常のサバール板の代わりに後述する変形サバール板を用いている。この系は2組のレンズ L_1 、 L_2 を用いた2重回折結像系に基づいており、そのレンズの間に変形サバール板(MSP₁)、半波長板(HWP)、変形サバール板(MSP₂)、検光子(A)の順に4つの偏光素子が挿入されている。ここで変形サバール板は、2枚の一軸性結晶の平行平板の間に半波長板を挟んだ構造を持つ素子であり、入射した光を互いに直交した2つの偏光成分に分離して異なる横シフトを与える機能を持つ。図3の光学系では、測定試料から発せられた光が2枚の変形サバール板によって4つの成分に分離され、それらがCCDカメラ上で互いに干渉する。この結果、方向が異なる複数の干渉縞が重畳された画像が得られる。各々の縞には異なるストークスパラメータの空間分布の情報が変調されているため、フーリエ変換法を用いて各々を分離復調すれば試料射出光の4つのストークスパラメータの空間分布が一度に求められる。なお、前節で述べた図1の分光偏光計測用のサバール板を用いる系は、図3の撮像偏光計測用の光学系を下に発展させたものである。

本研究では、この偏光計の誤差要因を実験と理論の両面から精査した。その結果、扱った種々の誤差要因の中で、特に、サバール板の固有偏光の入射角度依存性の影響が大きいことを見出した。本偏光計は2重回折結像系に基づいているため、試料上のある1点から発せられたすべての光線は、 L_1 通過後に平行な光線束に変換される。そしてこの各光線が光軸となす角は、試料上の座標と一対一の関係がある。これゆえ、変形サバール板MSP₁への入射角も、試料上のどの点から発せられた光線であるかによって変わることとなる。ここで変形サバール板は一軸性結晶によって構成されているため、その固有偏光は光線の入射角によって若干変わる。本偏光計における偏光計測の座標軸は第1の変形サバール

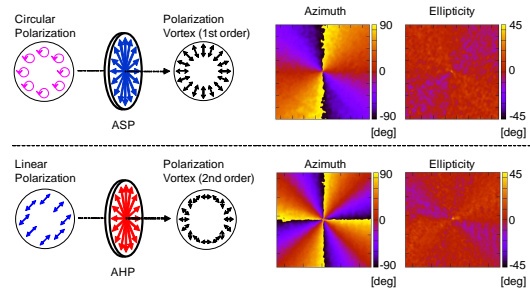


図 4 特異点を有する偏光の撮像測定

板MSP₁の中の前面の結晶の固有偏光によって決められるため、偏光計測の座標軸も、試料上の位置によって少し変わることとなる。この効果は、方位角の測定値に、y座標に対してほぼ線形に依存する測定誤差を生じる。ここで注意すべきは、この方位角の誤差が、試料上の位置によって大きさが一意に決まることである。このためこの誤差は、較正によって取り除くことができる。

その他に、サバール板によるキャリア画像歪や光学系の収差の影響なども精査した。例えば、キャリア画像歪の除去に変形サバール板の利用が有効であることを数値計算と実験の両面から証明した。

応用開拓: 特異点を有する偏光分布の測定およびその特性解明

これまで述べてきたように、チャンネル撮像偏光計測法には、偏光状態の2次元空間分布をスナップショットで測定できるという特徴がある。本研究では、この計測法そのものの改良のみならず、その応用の開拓についての検討も行った。その中で特に、特異点を有する偏光の利用が、本計測法の応用の開拓に有効であることが分かった。

特異点を有する偏光とは、光波の進行方向に垂直な断面内において、偏光状態の2次元空間分布に何らかの特異的な性質を持つ光のことである。代表例としては、径偏光や軸偏光など、偏光の方位角分布が特異点をもつ光が挙げられる。このような光を物質と相互作用させると、通常の光とは異なる様々な性質を生ずることが、近年の研究で明らかになってきた。本研究で対象としているチャンネル撮像偏光計測法は偏光状態の2次元空間分布を効率よく測定できるという特徴があるため、このような特異点を有する偏光そのもの、あるいはその物質との相互作用を計測するのに適している。

本研究ではまず、チャンネル撮像偏光計測法を利用して、特異点を有する偏光を測定した(図4)。そしてこの方法および回転相子法を併用して、特異点を有する偏光の空間伝播の特性について詳細に調べた。その結果、回折の際に偏光状態の特異な変化が生ずることを見出し、さらにその理由を理論的に解明した。さらに、この偏光特異点を利用して、

リング状光格子の新たな生成法を開発した。さらに光渦の分散低減もできることを見出した。これらの研究の成果をチャネルド撮像偏光計測法と組み合わせることにより、これまでになかったような撮像偏光計測の応用を開拓できる。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文](計19件)

M. Sakamoto, K. Oka, R. Morita, and N. Murakami, "Generation of the ring-shaped optical lattice using axially-symmetric polarization elements," *Frontiers in Optics, OSA Technical Digest (CD)*, 査読無, (2013), FW4F.6, DOI: 10.1364/FIO.2013.FW4F.6

M. W. Kudenov, S. Mallik, M. J. Escuti, N. Hagen, K. Oka, and E. L. Dereniak, "Snapshot imaging Mueller Matrix instrument," *Proc. SPIE*, 査読有, Vol. 8897 (2013) 88970S, DOI: 10.1117/12.2028546

M. Sakamoto, K. Oka, R. Morita, and N. Murakami, "Stable and flexible ring-shaped optical-lattice generation by use of axially symmetric polarization elements," *Opt. Lett.*, 査読有, Vol. 38 (2013) 3661-3664, DOI: 10.1364/OL.38.003661

K. Oka, Y. Haga, and Y. Komaki, "Spectroscopic full polarimeters using spatial carriers," *Proc. SPIE*, 査読有, Vol. 8873 (2013) 88730R, DOI: 10.1117/12.2025571

N. Saito, S. Odate, K. Otaki, M. Kubota, R. Kitahara, and K. Oka, "Wide field snapshot imaging polarimeter using modified Savart plates," *Proc. SPIE*, 査読有, Vol. 8873 (2013) p. 88730M, DOI: 10.1117/12.2022829

N. Murakami, S. Hamaguchi, M. Sakamoto, R. Fukumoto, A. Ise, K. Oka, N. Baba, and M. Tamura, "Design and laboratory demonstration of an achromatic vector vortex coronagraph," *Opt. Express*, 査読有, Vol. 21 (2013) 7400-7410, DOI: 10.1364/OE.21.007400

K. Oka and T. Kinoshita, "Wavelength-scanning polarimetric interferometry using channeled spectroscopic polarization state generator," *Proc. SPIE*, 査読有, Vol. 8493 (2012) 849309, DOI: 10.1117/12.929724

M. Kudenov, M. Escuti, N. Hagen, E. L. Dereniak, and K. Oka, "Snapshot imaging Mueller matrix polarimeter using polarization gratings," *Opt.*

Lett., 査読有, Vol. 37 (2012) 1367-1369, DOI: 10.1364/OL.37.001367

M. Sakamoto, K. Oka, and R. Morita, "Diffraction characteristics of optical and polarization vortices generated by an axially-symmetric polarizer," *Proc. SPIE*, 査読有, Vol. 8274 (2012) 827414, DOI: 10.1117/12.910108

K. Oka, "Channeled Spectropolarimetry: A Snapshot and Static Technique for Performing Spectroscopic Polarimetry (INVITED)," ISOT2011 International Symposium on Optomechatronic Technologies, 査読無, (2011)

T. Somekawa, K. Oka, and M. Fujita, "Development of white light polarization lidar system," *Proc. SPIE*, 査読有, Vol. 8182 (2011) 81820X, DOI: 10.1117/12.897786

M. W. Kudenov, M. J. Escuti, E. L. Dereniak, and K. Oka, "Spectrally broadband channeled imaging polarimeter using polarization gratings," *Proc. SPIE*, 査読有, Vol. 8160 (2011) 81600V, DOI: 10.1117/12.893771

K. Oka, T. Kinoshita, and A. Ise, "Channeled spectropolarimeter using a wavelength-scanning laser and a channeled spectroscopic polarization state generator," *Proc. SPIE*, 査読有, Vol. 8160 (2011) 81600S, DOI: 10.1117/12.894517

M. W. Kudenov, M. J. Escuti, E. L. Dereniak, and K. Oka, "White-light channeled imaging polarimeter using broadband polarization gratings," *Appl. Opt.*, 査読有, Vol. 50 (2011) 2283-2293, DOI: 10.1364/AO.50.002283

[学会発表](計39件)

羽賀 悠人, 岡 和彦, "波長キャリアと空間キャリアを利用したスナップショット分光ミューラー行列偏光計," 第61回応用物理学会春季学術講演会, 2014年3月17日, 青山学院大学, 神奈川県相模原市

窪田 雅弘, 岡 和彦, 齋藤 直洋, 大館 暁, 大滝 桂, "変形サバーン板を用いた撮像偏光計の誤差解析," *Optics & Photonics Japan*, 2013年11月14日, 奈良県新公会堂, 奈良県奈良市

M. W. Kudenov, S. Mallik, M. J. Escuti, N. Hagen, K. Oka, and E. L. Dereniak, "Snapshot imaging Mueller matrix polarimeter (招待講演)," ISOT2013 International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2013

年10月29日, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea
K. Oka, "Snapshot Imaging Polarimetry Using Spatial Carriers (招待講演)," ISOT2013 International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2013年10月29日, Ramada Plaza Jeju Hotel, Jeju, Korea
M. Sakamoto, K. Oka, R. Morita, and N. Murakami, "Generation of the ring-shaped optical lattice using axially-symmetric polarization elements," Frontiers in Optics, 2013年10月9日, Hilton Bonnet Creek, Orlando, FL, USA
M. W. Kudenov, S. Mallik, M. J. Escuti, N. Hagen, K. Oka, and E. L. Dereniak, "Snapshot imaging Mueller Matrix instrument," SPIE Security + Defence, 2013年9月24日, Internationales Congress Center, Dresden, Germany
K. Oka, Y. Haga, and Y. Komaki, "Spectroscopic full polarimeters using spatial carriers," SPIE Optics + Photonics, 2013年8月29日, San Diego Convention Center, San Diego, CA, USA
N. Saito, S. Odate, K. Otaki, M. Kubota, R. Kitahara, and K. Oka, "Wide field snapshot imaging polarimeter using modified Savart plates," SPIE Optics + Photonics, 2013年8月29日, San Diego Convention Center, San Diego, CA, USA
岡 和彦, "干渉屋から見た偏光計測 (招待講演)," 第51回光波センシング技術研究会, 2013年6月5日, 東京理科大学 森戸記念館, 東京都新宿区
K. Oka, "Channeled Polarimetry for Snapshot Measurement of Polarization (招待講演)," IUTAM Symposium on Advances of Optical Methods in Experimental Mechanics, 2012年11月6日, The Grand Hotel, Taipei, ROC
岡 和彦, "チャンネルド偏光計測法による偏光イメージング (招待講演)," Optics & Photonics Japan, 2012年10月24日, タワーホール船堀, 東京都江戸川区
羽賀 悠人, 岡 和彦, "サバール板とイメージング分光器を用いたスナップショット分光偏光計測," Optics & Photonics Japan, 2012年10月23日, タワーホール船堀, 東京都江戸川区
K. Oka and T. Kinoshita, "Wavelength-scanning polarimetric interferometry using channeled spectroscopic polarization state generator," SPIE Optics + Photonics, 2012年8月13日, San Diego Convention

Center, San Diego, CA, USA
M. Sakamoto, K. Oka, and R. Morita, "Diffraction characteristics of optical and polarization vortices generated by an axially-symmetric polarizer," SPIE Photonics West, 2012年1月25日, Moscone Center, San Francisco, CA, USA
伊勢 明敏, 菅谷 悠貴, 岡 和彦, "分光ミューラー行列計測のためのチャンネルド偏光計の誤差低減," Optics & Photonics Japan, 2011年11月28日, 大阪大学・吹田キャンパス, 大阪府吹田市
北原 倫太郎, 岡 和彦, 村上 尚史, 馬場 直志, "サバール板を用いた撮像偏光計の誤差解析," Optics & Photonics Japan, 2011年11月28日, 大阪大学・吹田キャンパス, 大阪府吹田市
K. Oka, "Channeled Spectropolarimetry: A Snapshot and Static Technique for Performing Spectroscopic Polarimetry (招待講演)," ISOT2011 International Symposium on Optomechatronic Technologies, 2011年11月2日, The Chinese University of Hong Kong, Shatin, N.T., Hong Kong, P. R. China
T. Somekawa, K. Oka, and M. Fujita, "Development of white light polarization lidar system," SPIE Remote Sensing, 2011年9月21日, Clarion Congress Hotel Prague, Prague, Czech Republic
M. W. Kudenov, M. J. Escuti, E. L. Dereniak, and K. Oka, "Spectrally broadband channeled imaging polarimeter using polarization gratings," SPIE Optics + Photonics, 2011年8月22日, San Diego Convention Center, San Diego, CA, USA
K. Oka, T. Kinoshita, and A. Ise, "Channeled spectropolarimeter using a wavelength-scanning laser and a channeled spectroscopic polarization state generator," SPIE Optics + Photonics, 2011年8月22日, San Diego Convention Center, San Diego, CA, USA"

6. 研究組織

(1) 研究代表者

岡 和彦 (OKA KAZUHIKO)

北海道大学・大学院工学研究院・准教授

研究者番号: 00194324