

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6748648号
(P6748648)

(45) 発行日 令和2年9月2日(2020.9.2)

(24) 登録日 令和2年8月12日(2020.8.12)

(51) Int. Cl.	F I				
GO 1 N 21/21	(2006.01)	GO 1 N	21/21	Z	
GO 1 J 4/04	(2006.01)	GO 1 J	4/04	Z	
GO 2 B 26/08	(2006.01)	GO 2 B	26/08	E	
GO 2 B 26/10	(2006.01)	GO 2 B	26/10	I O I	

請求項の数 55 (全 24 頁)

(21) 出願番号	特願2017-537482 (P2017-537482)	(73) 特許権者	517244456
(86) (22) 出願日	平成28年12月22日 (2016.12.22)		アドバンスド オプティカル テクノロジーズ, インク.
(65) 公表番号	特表2019-509463 (P2019-509463A)		アメリカ合衆国 ニューメキシコ州 87 123, アルバカーキ, スイート 680, イノベーション パークウェイ サウスイースト 1451
(43) 公表日	平成31年4月4日 (2019.4.4)	(74) 代理人	110000659
(86) 国際出願番号	PCT/US2016/068411		特許業務法人広江アソシエイツ特許事務所
(87) 国際公開番号	W02018/118073	(72) 発明者	フーバー, ブライアン, ジー.
(87) 国際公開日	平成30年6月28日 (2018.6.28)		アメリカ合衆国 ニューメキシコ州 87 059, テヘラス, カンボ ロード 43
審査請求日	平成29年8月28日 (2017.8.28)		
早期審査対象出願			

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 複数の独立した調整可能チャンネルを有する偏光計、および、物質および物体を分類および認識する方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

記録チャンネル合波器であって、
制御された電磁放射線源からのビームを独立変調器の組の間に連続的に向けるように位置決めされた走査素子と、

前記組の各部材が、変調されたビームを生成するために一連の独立した状態の間で前記ビームの状態を変調するように構成されたチャンネルを画成する、独立変調器の組と、

前記変調されたビームを、視野に向けられている同時記録された経路に向け直すように構成された反射器の組立品と

を含み、

前記走査素子は、回転軸を含む第1の機械的スキャナに取り付けられたスキャナミラーであり、前記反射器の組立品は、ミラーの組立品であり、

前記スキャナミラーは、前記回転軸に平行な平面ミラーと、該平面ミラーに対してある角度で取り付けられた第2のウェッジミラーとを有する複合ミラーである、記録チャンネル合波器。

【請求項2】

前記第2のウェッジミラーが前記平面ミラーに取り付けられる角度は約45度である、請求項1に記載の記録チャンネル合波器。

【請求項3】

前記ミラーの組立品は、第2の組の機械的スキャナに取り付けられた1つ以上の平面ス

キャナミラーを含む、請求項 1 に記載の記録チャンネル合波器。

【請求項 4】

独立変調器の組は、レンズ、偏波変調器、スペクトルフィルタ、回折アレイ発生器、ホログラム、振幅位相マスク、およびそれらの任意の組み合わせからなる群から選択される、請求項 1 に記載の記録チャンネル合波器。

【請求項 5】

独立変調器の組の 1 つ以上の部材は調整可能である、請求項 1 に記載の記録チャンネル合波器。

【請求項 6】

前記独立変調器の組の 1 つ以上の部材はビームブロックである、請求項 1 に記載の記録チャンネル合波器。

10

【請求項 7】

複数の独立したチャンネルを使用して視野内の標的を分類または認識するためのセンサであって、

検出器およびその間に位置決めされた前記視野を含む経路内に位置決めされ制御された電磁放射線源と、

制御された前記電磁放射線源からのビームを第 1 の組の独立変調器の間に連続的に向けるように位置決めされた走査素子と、

前記第 1 の組の独立変調器の各部材が、変調されたビームを生成するために一連の独立した状態の間で該ビームの状態を変調するように構成されたチャンネルに対応する、第 1 の組の独立変調器と、

20

前記変調されたビームを、前記視野に向けられている同時記録された経路に向け直すように構成された反射器の組立品と、

前記視野内の物体から反射された、または前記視野内の物体によって伝達された電磁放射線を、前記第 1 の組の独立変調器から独立している第 2 の変調器に向けるように位置決めされた電磁放射線収集器と、

検出器であって、第 1 の組の変調器および第 2 の変調器によって形成されたチャンネルの組と同期する信号の組を生成する、第 2 の変調器から電磁放射線を受けるように位置決めされた検出器と、

プロセッサが、ユーザ調整可能な閾値を検出器信号の組に適用してクラスラベルを検出器信号の組に割り当てることによってメモリに記憶された分類アルゴリズムを実行するように構成され、分類アルゴリズムが、前記第 1 の組の変調器および前記第 2 の変調器によって形成されたチャンネルの組に関して閾値の関数を指定する、メモリに接続された前記プロセッサと

30

を含み、

走査素子は、回転軸を含む第 1 の機械的スキャナに取り付けられたスキャナミラーであり、反射器の組立品は、ミラーの組立品であり、

前記スキャナミラーは、回転軸に平行な平面ミラーと、前記平面ミラーに対してある角度で取り付けられた第 2 のウェッジミラーとを有する複合ミラーである、センサ。

【請求項 8】

40

前記第 2 のウェッジミラーが前記平面ミラーに取り付けられる角度は約 45 度である、請求項 7 に記載のセンサ。

【請求項 9】

前記ミラーの組立品は、第 2 の組の機械的スキャナに取り付けられた 1 つ以上の平面スキャナミラーを含む、請求項 7 に記載のセンサ。

【請求項 10】

前記第 1 の組の独立変調器および前記第 2 の独立変調器は、レンズ、偏波変調器、スペクトルフィルタ、回折アレイ発生器、ホログラム、振幅位相マスク、およびそれらの任意の組み合わせからなる群から選択される、請求項 7 に記載のセンサ。

【請求項 11】

50

前記第 1 の組の独立変調器および前記第 2 の独立変調器の 1 つ以上の部材は調整可能である、請求項 7 に記載のセンサ。

【請求項 1 2】

前記第 1 の組の独立変調器の 1 つ以上の部材はビームブロックである、請求項 7 に記載のセンサ。

【請求項 1 3】

収集器によって前記第 2 の変調器に向けられた前記電磁放射線は、前記視野内の物体から照射または放射される受動型源からの電磁放射線を含む、請求項 1 2 に記載のセンサ。

【請求項 1 4】

前記走査素子が前記ビームブロックに向けられている間に前記収集器によって前記第 2 の変調器に向けられた前記電磁放射線は、検出器信号の組の要素として受動チャネルに対応する検出器信号を生成する、請求項 1 3 に記載のセンサ。

10

【請求項 1 5】

クラスラベルは前記メモリに記憶される、請求項 7 に記載のセンサ。

【請求項 1 6】

検出器信号の組は、記録されたデジタル画像の組であり、クラスラベルは、デジタル分類画像を形成するように各画素に割り当てられる、請求項 7 に記載のセンサ。

【請求項 1 7】

クラスラベルは 0 または 1 である、請求項 7 に記載のセンサ。

【請求項 1 8】

前記視野は、センサが取り付けられているジンバルまたは移動式プラットフォームによって面積または体積にわたって走査または掃引される、請求項 7 に記載のセンサ。

20

【請求項 1 9】

前記クラスラベルは、20 Hz 以上の速度で割り当てられる、請求項 7 に記載のセンサ。

【請求項 2 0】

前記クラスラベルは割り当てられ、前記分類画像は 20 フレーム / 秒以上の速度で電子的に表示される、請求項 1 6 に記載のセンサ。

【請求項 2 1】

検出器信号の組は、前記走査素子によって提供されるタイミング信号を使用するロックイン増幅器によって、前記第 1 の組の変調器および前記第 2 の変調器によって形成されたチャネルの組と同期する、請求項 7 に記載のセンサ。

30

【請求項 2 2】

複数の独立した偏波チャネルを使用して視野内の標的を分類または認識するための偏光計であって、

検出器およびその間に位置決めされた該視野を含む経路内に位置決めされ制御された電磁放射線源と、

制御された前記電磁放射線源からのビームを第 1 の組の独立偏波変調器の間に連続的に向けるように位置決めされた走査素子と、

第 1 の組の独立偏波変調器であって、前記組の各部材が、変調されたビームを生成するために一連の独立した偏波状態の間でビームの偏波状態を変調するように構成された偏波チャネルに対応する、第 1 の組の独立偏波変調器と、

40

前記変調されたビームを、前記視野に向けられている同時記録された経路に向け直すように構成された反射器の組立品と、

前記視野内の物体から反射された、または前記視野内の物体によって伝達された電磁放射線を、前記第 1 の組の偏波変調器から独立している第 2 の偏波変調器に向けるように位置決めされた電磁放射線収集器と、

検出器であって、第 1 の組の偏波変調器および第 2 の偏波変調器によって形成されたチャネルの組と同期する信号の組を生成する、第 2 の偏波変調器から電磁放射線を受けるように位置決めされた検出器と、

50

プロセッサが、ユーザ調整可能な閾値を検出器信号の組に適用してクラスラベルを検出器信号の組に割り当てることによって前記メモリに記憶された分類アルゴリズムを実行するように構成され、該分類アルゴリズムが、前記第 1 の組の偏波変調器および前記第 2 の偏波変調器によって形成されたチャンネルの組に関して閾値の関数を指定する、メモリに接続されたプロセッサと

を含み、

前記チャンネルは、縮小ミューラー行列のベクトル空間に勾配演算子を適用し、かつ、結果として得られるコントラストパラメータを最大にする部分空間射影アルゴリズムによって定義される、偏光計。

【請求項 2 3】

前記走査素子は、回転軸を含む第 1 の機械的スキャナに取り付けられたスキャナミラーであり、前記反射器の組立品は、ミラーの組立品である、請求項 2 2 に記載の偏光計。

【請求項 2 4】

前記スキャナミラーは、前記回転軸に平行な平面ミラーと、該平面ミラーに対してある角度で取り付けられた第 2 のウェッジミラーとを有する複合ミラーである、請求項 2 3 に記載の偏光計。

【請求項 2 5】

前記第 2 のウェッジミラーが前記平面ミラーに取り付けられる角度は約 4 5 度である、請求項 2 4 に記載の偏光計。

【請求項 2 6】

前記ミラーの組立品は、第 2 の組の機械的スキャナに取り付けられた 1 つ以上の平面スキャナミラーを含む、請求項 2 3 に記載の偏光計。

【請求項 2 7】

前記第 1 の組の独立偏波変調器および前記第 2 の独立偏波変調器の 1 つ以上の部材は調整可能である、請求項 2 2 に記載の偏光計。

【請求項 2 8】

前記第 1 の組の独立偏波変調器の 1 つ以上の部材はビームブロックである、請求項 2 2 に記載の偏光計。

【請求項 2 9】

前記収集器によって前記第 2 の偏波変調器に向けられた電磁放射線は、前記視野内の物体から照射または放射される受動型源からの電磁放射線を含む、請求項 2 8 に記載の偏光計。

【請求項 3 0】

前記走査素子が前記ビームブロックに向けられている間に前記収集器によって前記第 2 の偏波変調器に向けられた前記電磁放射線は、信号の組の要素として受動チャンネルに対応する検出器信号を生成する、請求項 2 9 に記載の偏光計。

【請求項 3 1】

前記ユーザ調整可能な閾値は、前記部分空間射影アルゴリズムによって導出された前記チャンネルの関数である、請求項 2 2 に記載の偏光計。

【請求項 3 2】

前記クラスラベルはメモリに記憶される、請求項 2 2 に記載の偏光計。

【請求項 3 3】

前記検出器信号の組は、記録されたデジタル画像の組であり、クラスラベルは、デジタル偏波分類画像を形成するように各画素に割り当てられる、請求項 2 2 に記載の偏光計。

【請求項 3 4】

前記クラスラベルは 0 または 1 である、請求項 2 2 に記載の偏光計。

【請求項 3 5】

前記視野は、前記偏光計が取り付けられているジンバルまたは移動式プラットフォームによって面積または体積にわたって走査または掃引される、請求項 2 2 に記載の偏光計。

10

20

30

40

50

【請求項 36】

前記クラスラベルは、20 Hz 以上の速度で割り当てられる、請求項 22 に記載の偏光計。

【請求項 37】

前記クラスラベルは割り当てられ、前記偏波分類画像は 20 フレーム / 秒以上の速度で電子的に表示される、請求項 33 に記載の偏光計。

【請求項 38】

前記検出器信号の組は、前記走査素子によって提供されるタイミング信号を使用するロックイン増幅器によって、前記第 1 の組の偏波変調器および前記第 2 の偏波変調器によって形成された前記チャンネルの組と同期する、請求項 22 に記載の偏光計。

10

【請求項 39】

複数の独立したチャンネルを含む請求項 22 に記載の偏光計を使用して視野内の標的を分類または認識するための方法であって、

前記視野がその間に位置決めされた検出器を含む経路内に制御された電磁放射線源を位置決めするステップと、

制御された前記電磁放射線源からのビームを第 1 の組の独立偏波変調器の間に走査素子によって連続的に向けるステップと、

前記走査素子および前記第 1 の組の独立偏波変調器によって変調されたビームを生成するステップであって、前記独立偏波変調器の組の各部材が、一連の独立した偏波状態の間で前記ビームの偏波状態を変調するように構成されたチャンネルに対応する、生成するステップと、

20

前記変調されたビームを、前記視野に向けられている同時記録された経路に反射器の組立品によって向け直すステップと、

前記視野内の物体から反射された、または視野内の物体によって伝達された前記電磁放射線の一部を、前記第 1 の組の偏波変調器から独立している第 2 の偏波変調器に電磁放射線の一部を向ける電磁放射線収集器によって収集するステップと、

前記第 2 の偏波変調器から前記電磁放射線を前記検出器で受けるステップであって、前記検出器が、前記第 1 の組の偏波変調器および前記第 2 の偏波変調器によって形成されたチャンネルの組と同期する検出器信号の組を生成する、受けるステップと、

クラスラベルを前記検出器信号の組に割り当てるために分類アルゴリズムおよびユーザ調整可能な閾値を検出器信号の組に適用するステップであって、前記分類アルゴリズムが、前記第 1 の組の偏波変調器および前記第 2 の偏波変調器によって形成された前記チャンネルの組に関して閾値の関数を指定する、適用するステップと

30

を含み、
前記チャンネルは、縮小ミューラー行列のベクトル空間に勾配演算子を適用し、かつ、結果として得られるコントラストパラメータを最大にする部分空間射影アルゴリズムによって定義される、方法。

【請求項 40】

前記走査素子は、回転軸を含む第 1 の機械的スキャナに取り付けられたスキャナミラーであり、前記反射器の組立品は、ミラーの組立品である、請求項 39 に記載の方法。

40

【請求項 41】

前記スキャナミラーは、前記回転軸に平行な平面ミラーと、該平面ミラーに対してある角度で取り付けられた第 2 のウェッジミラーとを有する複合ミラーである、請求項 40 に記載の方法。

【請求項 42】

前記第 2 のウェッジミラーが前記平面ミラーに取り付けられる角度は約 45 度である、請求項 41 に記載の方法。

【請求項 43】

前記ミラーの組立品は、第 2 の組の機械的スキャナに取り付けられた 1 つ以上の平面スキャナミラーを含む、請求項 40 に記載の方法。

50

【請求項 4 4】

前記第 1 の組の独立偏波変調器および前記第 2 の独立偏波変調器の 1 つ以上の部材は調整可能である、請求項 3 9 に記載の方法。

【請求項 4 5】

前記第 1 の組の独立偏波変調器の 1 つ以上の部材はビームブロックである、請求項 3 9 に記載の方法。

【請求項 4 6】

収集されて前記第 2 の偏波変調器に向けられた前記電磁放射線の一部は、前記視野内の物体から照射または放射される受動型源からの電磁放射線を含む、請求項 4 5 に記載の方法。

10

【請求項 4 7】

前記走査素子が前記ビームブロックに向けられている間に収集されて前記第 2 の偏波変調器に向けられた前記電磁放射線の一部は、前記検出器信号の組の要素として受動チャネルに対応する検出器信号を生成する、請求項 4 6 に記載の方法。

【請求項 4 8】

前記ユーザ調整可能な閾値は、前記部分空間射影アルゴリズムによって得られた前記チャネルの組の関数である、請求項 3 9 に記載の方法。

【請求項 4 9】

前記クラスラベルはメモリに記憶される、請求項 3 9 に記載の方法。

【請求項 5 0】

前記検出器信号の組は、記録されたデジタル画像の組であり、クラスラベルは、デジタル偏波分類画像を形成するように各画素に割り当てられる、請求項 3 9 に記載の方法。

20

【請求項 5 1】

前記クラスラベルは 0 または 1 である、請求項 3 9 に記載の方法。

【請求項 5 2】

前記視野は、前記偏光計が取り付けられているジンバルまたは移動式プラットフォームによって面積または体積にわたって走査または掃引される、請求項 3 9 に記載の方法。

【請求項 5 3】

前記クラスラベルは、20 Hz 以上の速度で割り当てられる、請求項 3 9 に記載の方法。

30

【請求項 5 4】

前記クラスラベルは割り当てられ、前記偏波分類画像は 20 フレーム / 秒以上の速度で電子的に表示される、請求項 5 0 に記載の方法。

【請求項 5 5】

前記検出器信号の組は、前記走査素子によって提供されるタイミング信号を使用するロックイン増幅器によって、前記第 1 の組の偏波変調器および前記第 2 の偏波変調器によって形成された前記チャネルの組と同期する、請求項 3 9 に記載の方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

連邦政府資金による研究開発の記載

本発明は、米国陸軍によって授与された契約 W 9 0 9 M Y - 1 2 - C - 0 0 2 3 の下で政府支援によってなされたものである。米国政府は、本発明において一定の権利を有する。

40

【0002】

背景

本発明の実施形態は、偏光検査によるリモートセンシングまたは遠隔試験の分野に関し、偏光計の分野からの技術および偏光測定への学習アルゴリズムの適用によって、物体、物質、および物質の状態の自動化または補助識別、分類、および認識の分野からの技術を含む。対象の物体、物質または物質の状態は、多くの場合、標的と呼ばれ、このリモート

50

センシングの分野は、多くの場合、自動標的認識 (A T R) と呼ばれる。

【背景技術】

【0003】

図1を参照して、偏光計は、a) レーザまたは他の制御された電磁放射線 (E M R , e l e c t r o m a g n e t i c - r a d i a t i o n) の供給源を使用する能動型、または、b) 太陽または熱の電磁放射を使用する受動型、あるいは、c) 能動型源 (a c t i v e s o u r c e 、能動型の供給源) および受動型源 (p a s s i v e s o u r c e 、受動型の供給源) の両方を使用するハイブリッド式のいずれかとして、これらの放射源に応じて分類することができる。偏光計は、測定値、偏波変調器 (p o l a r i z a t i o n m o d u l a t o r) 、およびその用途に応じてさらに細分することができる。10
ストークス偏光計は、E M R の偏光特性を完全に特徴付けるストークスパラメータ (またはストークスベクトル) を測定する。線源がほとんどの受動型源のように非偏光である場合、ストークスパラメータは照射された物体の全ての取得可能な偏光特性を示すので、ストークス偏光計を受動型リモートセンシングに適用することができる。例えば、特許文献1 (米国特許第4, 306, 809号明細書) 、特許文献2 (米国特許第5, 247, 176号明細書) および特許文献3 (米国特許第5, 956, 147号明細書) に教示されているようなミューラー行列偏光計は、電磁波に対する物質または物体の完全な線形応答を特徴付けるミューラー行列を測定するために、多くの場合レーザである制御された偏光源を使用する。特許文献4 (米国特許第7, 218, 398号明細書) は、ミューラー行列偏光計20
で得られたデータの、物質の特性評価の逆問題への応用を教示している。例えば特許文献4に教示されているように一般化された偏光解析法がこれらの仮定を緩和するにもかかわらず、偏光解析器は、疎なミューラー行列をもたらす散乱または複屈折がないと仮定して逆問題を解くミューラー行列偏光計の下位分類である。特徴化のために設計されたほとんどの偏光計は、物質または対象試料の位置および配向を正確に制御するための試料台も含む実験器具である。偏光計は、偏波変調器によって分類することもできる。光弾性変調器 (P E M) 、液晶可変リターダ (l i q u i d c r y s t a l v a r i a b l e r e t a r d e r s 、 L C V R) およびマイクログリッドアレイを含む代替手段も使用されているが、大半の偏光計は、偏光プリズムまたはビームスプリッタおよび回転式のリターダまたは波長板のいくつかの組み合わせに依存している。

【0004】

リモートセンシング用の偏光計は、小型で軽量で一般的に高速でなければならず、その検出方式は、視野内の一般的に任意の位置および配向における物質および物体に対して機能しなければならない。最も一般的な方法は、測定値またはチャンネルの数を、受信機内の偏光プリズムまたはビームスプリッタを使用して即時に達成可能な2に制限し、2つのチャンネルの差を形成することである。このリモートセンシング用の偏光計の類は、例えば、受動型源 (p a s s i v e s o u r c e) については特許文献5 (米国特許第8, 116, 000号明細書) に、能動型源 (a c t i v e s o u r c e) については特許文献6 (米国特許第7, 333, 897号明細書) に教示されている。ほとんどの偏光プリズムおよびビームスプリッタは、E M R を直交偏波状態 (例えば、垂直および水平の線形状態) に分離するので、この種のほとんどの偏光計は、2つの直交チャンネルを測定する。40
能動型2チャンネル偏光計の場合、チャンネルは、照射E M R の偏波方向と平行に、かつ直交して (または交差して) 整列することが多い。例えば特許文献3および特許文献7 (米国特許第6, 060, 710号明細書) で教示されているような特定の能動型偏光計は、複雑な較正および復調動作を必要とするが、リモートセンシングのために十分に高速なミューラー行列を測定することができる光弾性変調器 (P E M) を使用している。

【0005】

リモートセンシングでは、検出する、識別する、分類する、認識する、特定するという用語は、正式な意味を有するが、多くの公表文献ではこれらの用語が不用意に交換されている。本明細書では、「検出する」という用語は、標的によって反射または伝達されたE M R を記録することを意味し、「識別する」という用語は、標的を背景と区別することを50

意味し、「分類する」という用語は、背景およびしばしばクラッタ (clutter) と呼ばれる他の非標的を含む様々な部類間で単一または複数の標的を区別することを意味し、「認識する」および「特定する」という用語は、さらにいっそうの特異性を暗示する。(金属、プラスチック、または木材などの) 物体の区別は一般的に分類であると見なされる一方で、物体を物質および可能性のある形状の既知の組み合わせとして区別することは、認識であると見なされる。測定データの変動性、および、特にフィールドデータは、測定された特性の分布を予測する学習アルゴリズムの適用を必要とする。学習アルゴリズムはまた、クラッタを排除し、誤警報を低減するのに役立つ。アルゴリズムは、機械学習の分野から適応させることができる。例えば特許文献7および特許文献6ならびに非特許文献1 (Jonesら「Proc. SPIE」6240、62400A頁(2006年)) および非特許文献2 (HooverおよびTyorら「Applied Optics」第46巻、8364~8373頁(2007年)) に教示されているように、変化する複雑さの学習アルゴリズムが、偏光計測定に基づいて物質を分類するために適用されている。

【0006】

電磁波の測定された特性の物質感度に依存して、物質、物質状態、およびこれらの物質および状態からなる物体を迅速かつ非破壊的に識別し、分類し、認識することができる電磁センサは、多くの有用な用途を有する。光周波数および近接光周波数での偏光は、金属、プラスチック、繊維複合材、結晶、キラル分子、および生物組織を含む繊維状物質を含む物質および物質状態の広範囲に敏感であり、パターン化された、応力を加えられた、または損傷した物質の場合はさらに広い範囲が考慮される。偏光計は、通常、標的物質または物質状態と他の物質または物質状態とのコントラストを、反射または伝達されたEMRの観察中に増加させることによって、このような物質および状態の識別および分類について実証されている。ほとんどの偏光計は、偏波変調器の異なる設定によって定義される放射照度チャンネルの差分によってコントラストを増加させる。理想的には、標的の放射照度は2つのチャンネルにおいて異なる一方で、非標的の放射照度は2つのチャンネルにおいて類似しており、これにより、差チャンネルは標的コントラストの増加をもたらす。偏光計放射照度チャンネルは、時間および/または空間において多重化されたデジタル画像の形態であってもよく、検出器信号の形態であってもよい。高速性能のために、例えば特許文献8 (米国特許第4,881,818号明細書)、特許文献9 (米国特許第5,929,443号明細書)、および特許文献5に教示されているような偏波差結像(PDI)の場合のように、偏光計は通常、2つの同時チャンネルに限定されている。

【0007】

能動型偏光計は、典型的には対象の試料または場所を照射するビームに形成される、多くの場合レーザーである制御され偏光されたEMRの線源を含む。直射日光照度または熱放射を利用する受動型偏光計と比較すると、能動型偏光計は追加の特性構成要素へのアクセスを提供し、天候および時刻とは独立して機能する。特許文献1、特許文献2、特許文献3、および特許文献4において光周波数および赤外線周波数について教示されているように、特性評価のために設計された能動型偏光計は、典型的には、所与の角度および電磁周波数での照射のために、ミューラー行列としても知られている完全な偏波特性を測定する。これらは、典型的には、試料の配向および位置を制御する台を含む大規模な実験器具、および、高い寸法、重量、電力(SWaP)の要件を含む、データ速度がビデオ速度を大幅に下回る偏波変調器である。例えば、特許文献4は、この種の偏光計の最大データ速度を1Hzのオーダーで特定している。

【0008】

数学的には、ストークスパラメータは、

【数1】

$$S = [S_0 \quad S_1 \quad S_2 \quad S_3]^T,$$

(1)

10

20

30

40

50

のように記述され、式中、 S_0 は放射照度、 S_1 は水平 - 垂直座標系の直線偏波度であり、 S_2 は水平 - 垂直座標に対して $\pm 45^\circ$ の直線偏波度であり、 S_3 は円偏波度であり、 $[\dots]^T$ は行列転置を表す。ストークスパラメータは、EMRの偏波状態を定義する。ミュラー行列は、電磁波と有形物との相互作用時のストークスパラメータの線形変換であり、

【数2】

$$S_{\text{out}} = MS = \begin{bmatrix} M_{00} & M_{01} & M_{02} & M_{03} \\ M_{10} & M_{11} & M_{12} & M_{13} \\ M_{20} & M_{21} & M_{22} & M_{23} \\ M_{30} & M_{31} & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

のように記述される。

数学的解析および設計のために、ミュラー行列は、多くの場合、次のような1次元形式で記述される。

【数3】

$$\tilde{M} = [M_{00} \quad M_{01} \quad M_{02} \quad M_{03} \quad M_{10} \quad \dots \quad M_{31} \quad M_{32} \quad M_{33}]. \quad (3)$$

【0009】

ストークスパラメータは、多くの場合、ストークスベクトルと呼ばれ、数字の1次元配列の計算的な意味においてのみ正確である。放射照度は負ではないため、ストークスパラメータおよびミュラー行列の両方は、加法逆元を欠いており、代数的な意味でのベクトルではない。

【0010】

リモートセンシングのために設計された能動型偏光計は、典型的には、完全なミュラー行列を測定せず、対象の標的と予想される背景およびクラッタとの間のコントラストを示す特性の部分のみを測定し、より少ない構成要素およびより少ない測定のために、SWaPを低減して速度を増加させることを可能にする。例えば、特許文献10に教示されているように、ほとんどの大気エアロゾルおよび雲は、能動型偏光計を用いて2つの直交チャネルの差を形成することによって達成することができる、M11の測定から得られる単一の独立したパラメータを含む対角ミュラー行列を示す。リモートセンシング用に設計されたほぼ全ての能動型偏光計は、1つ以上の偏波チャネルの測定に基づいており、この制限は低SWaPおよび/または高速の要件によって課される。非特許文献3 (Vannierら「Applied Optics」第55巻、2881~2891頁(2016年))は、LCVR変調器および最適化動作を使用して光学リモートセンシングのための偏光計における現在の公有の最先端技術を実証し、特定の種類の物質のコントラストが強調された画像化を提供する単一チャネルの能動型偏光計を経験的に導いて実装する。しかし、非特許文献2に示されているように、多くの関連物質の能動偏波特性は、実際には多次元であり、学習アルゴリズムを測定された多次元特性に適用することで、識別、分類および認識の性能を改善することができる。特に、標的の配向または姿勢に対して比較的不変である分類性能を達成するためには、通常はリモートセンシングにとって重要な要件である多次元測定が多くの場合に必要とされる。したがって、高速、高性能の分類またはATRのための能動型偏光計に対応するには、2チャネルの偏光計によって達成可能な低いSW

a P および高速を維持しながら、特定の多次元特性を測定することができる新たな部類の偏光計が必要である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0011】

【特許文献1】米国特許第4,306,809号明細書

【特許文献2】米国特許第5,247,176号明細書

【特許文献3】米国特許第5,956,147号明細書

【特許文献4】米国特許第7,218,398号明細書

【特許文献5】米国特許第8,116,000号明細書

【特許文献6】米国特許第7,333,897号明細書

【特許文献7】米国特許第6,060,710号明細書

【特許文献8】米国特許第4,881,818号明細書

【特許文献9】米国特許第5,929,443号明細書

【特許文献10】米国特許第7,580,127号明細書

【非特許文献】

【0012】

【非特許文献1】Jonesら「Proc. SPIE」6240、62400A頁(2006年)

【非特許文献2】HooverおよびTyoら「Applied Optics」第46巻、8364~8373頁(2007年)

【非特許文献3】Vannierら「Applied Optics」第55巻、2881~2891頁(2016年)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0013】

偏光計を含むほとんどの能動型フィールドセンサは、放射源 - 送信機、および受信機 - 検出器を同一のプラットフォームに位置決めする実際的な利点のために、モノスタティック(monostatic)またはほぼモノスタティックな形状用に構成されている。他方では、受動型センサは、例えば図2に示すように大きなバイスタティック角度(bistatic)で動作することが多い。受動型偏波特性の次元は一般に、姿勢の不変性を達成するには低すぎるか、能動型偏光計の分類性能と適合する一方で、特定の物質および物体に対して、受動型特性は、能動型特性を増強し、かつ性能を向上させることができる大きなバイスタティック角度において固有の情報を含む。したがって、より多くの情報を利用してリモートセンシング性能を向上させるために、同一のハイブリッド式偏光計において能動型特性および受動型特性の測定値を組み合わせるためのフィールド偏光計が必要とされている。

【課題を解決するための手段】

【0014】

発明の実施形態の概要

本発明の一実施形態は、制御された電磁放射線源(EMR)からのビームを独立変調器の組の間に連続的に向けるように位置決めされた走査素子を有する記録チャンネル合波器(Registered channel multiplexer、RCM、登録されたチャンネルの多重化装置)を提供する。RCMの一例を図3に示す。独立変調器(independent modulator)の組の各部材は、変調されたビームを生成するために一連の独立した状態の間でビームの状態を変調するように構成されたチャンネルを画成する。反射器の組立品は、変調されたビームを、視野に向けられている同時記録された経路に向け直すように構成される。走査素子は、回転軸を含むガルバノメータスキャナなどの第1の機械的スキャナに取り付けられたスキャナミラーであってよく、反射器の組立品はミラーの組立品であってよい。さらに、スキャナミラーは、第1の機械的スキャナ

10

20

30

40

50

の回転軸に平行な平面ミラーと、平面ミラーに対してある角度で、例えば約45度の角度で取り付けられた第2のウェッジミラー(wedge mirror、くさび形ミラー)とを含む複合ミラー(composite mirror)であってもよい。ミラーの組立品は、第2の組の機械的スキャナに取り付けられた1つ以上の平面スキャナミラーを含んでもよい。独立変調器の組は、レンズ、偏波変調器、スペクトルフィルタ、回折アレイ発生器、ホログラム、振幅位相マスク、およびそれらの任意の組み合わせからなる群から選択することができる。独立変調器の組の1つ以上の部材は調整可能であり、1つ以上の異なる部材は、図4に示すようなビームブロック(beam block)であってもよい。

【0015】

本発明の別の実施形態は、複数の独立したチャンネルを使用して視野(FOV)内の単一または複数の標的を分類または認識するためのセンサを提供する。センサは、検出器およびその間に位置決めされたFOVを含む経路内に位置決めされ(position、配置されている)制御された電磁放射線源(EMR)を含む。このセンサは、制御されたEMR源からのビームを、第1の組の独立変調器の間に連続的に向けるように位置決めされた走査素子を含む記録チャンネル合波器(RCM)を含み、第1の組の独立変調器の各部材はチャンネルに対応し、スキャナおよび変調器は、変調されたビームを生成するために一連の独立した状態の間でビームの状態を変調するように構成される。反射器の組立品は、FOVに向けられている同時記録された経路に変調されたビームを向け直すように構成される。EMR収集器は、FOV内の物体から反射された、またはFOV内の物体によって伝達されたEMRを、第1の組の独立変調器から独立している第2の変調器に向けるように位置決めされる。検出器は、第2の変調器からEMRを受けるとして位置決めされ、検出器は、第1の組の変調器および第2の変調器によって形成されるチャンネルの組と同期する信号の組を生成する。第1の組の独立変調器および第2の独立変調器は、レンズ、偏波変調器、スペクトルフィルタ、回折アレイ発生器、ホログラム、振幅位相マスク、およびそれらの任意の組み合わせからなる群から選択することができる。センサは、メモリに接続されたプロセッサを含み、プロセッサは、ユーザ調整可能な閾値を検出器信号の組に適用して(メモリに記憶することもできる)クラスラベルを検出器信号の組に割り当てることによってメモリに記憶された分類アルゴリズムを実行するように構成され、分類アルゴリズムは、第1の組の変調器および第2の変調器によって形成されたチャンネルの組に関して閾値の関数を指定する。クラスラベルは、0または1のみの値、または多値の値を想定した二値とすることができる。第1の組の独立変調器および第2の独立変調器は調整可能であり、第1の組の独立変調器の1つ以上の異なる部材はビームブロックであってもよい。収集器によって第2の変調器に向けられたEMRは、FOV内の物体から照射または放射される受動型源からのEMRを含んでもよく、その場合、走査素子がビームブロックに向けられている間に収集器によって第2の変調器に向けられるEMRは、検出器信号の組の要素として受動チャンネルに対応する検出器信号を生成することができる。一実施形態では、検出器信号の組は、記録されたデジタル画像の組であり、クラスラベルは、デジタル分類画像を形成するように各画素に割り当てられる。クラスラベルを20Hz以上の速度で割り当てることができ、結像のために、クラスラベルを割り当て、かつ分類画像を20フレーム/秒以上の速度で電子的に表示することができる。FOVを、センサが取り付けられているジンバルまたは移動式プラットフォーム(moving platform)によって面積または体積にわたって走査または掃引することができる。さらに、検出器信号の組は、走査素子によって提供されるタイミング信号を使用するロックイン増幅器によって、第1の組の変調器および第2の変調器によって形成されたチャンネルの組と同期することができる。

【0016】

本発明の別の実施形態は、複数の独立した偏波チャンネルを使用して視野(FOV)内の単一または複数の標的を分類または認識するための偏光計を提供する。偏光計は、検出器およびその間に位置決めされたFOVを含む経路内に位置決めされ制御された電磁放射線

10

20

30

40

50

源 (E M R) を含む。偏光計は、制御 E M R 源からのビームを第 1 の組の独立偏波変調器の間に連続的に向けるように位置決めされた走査素子を含む記録チャンネル合波器 (R C M) を含む。組の各部材が偏波チャンネルに対応する第 1 の組の独立偏波変調器は、変調されたビームを生成するために一連の独立した偏波状態の間でビームの偏波状態を変調するように構成される。反射器の組立品は、F O V に向けられている同時記録された経路に変調されたビームを向け直すように構成される。E M R 収集器は、F O V 内の物体から反射された、または F O V 内の物体によって伝達された E M R を、第 1 の組の独立偏波変調器から独立している第 2 の偏波変調器に向けるように位置決めされる。検出器は、第 2 の偏波変調器から E M R を受けるように位置決めされ、検出器は、第 1 の組の偏波変調器および第 2 の偏波変調器によって形成されるチャンネルの組と同期する信号の組を生成する。偏光計は、メモリに接続されたプロセッサを含み、プロセッサは、ユーザ調整可能な閾値を検出器信号の組に適用して (メモリに記憶することもできる) クラストラベルを検出器信号の組に割り当てることによってメモリに記憶された分類アルゴリズムを実行するように構成され、分類アルゴリズムは、第 1 の組の偏波変調器および第 2 の偏波変調器によって形成されたチャンネルの組に関して閾値の関数を指定する。クラストラベルは、0 または 1 のみの値、または多値の値を想定した二値とすることができる。第 1 の組の独立偏波変調器および第 2 の独立偏波変調器は調整可能であり、第 1 の組の偏波変調器の 1 つ以上の部材はビームブロックであってもよい。収集器によって第 2 の変調器に向けられた E M R は、視野から照射または放射される受動型源からの E M R を含んでもよく、その場合、走査素子がビームブロックに向けられている間に収集器によって第 2 の変調器に向けられる E M R は、検出器信号の組の要素として受動チャンネルに対応する検出器信号を生成することができる。一実施形態では、検出器信号の組は、記録されたデジタル画像の組であり、クラストラベルは、デジタル偏波分類画像 (*polarization classification image, PCI*) を形成するように各画素に割り当てられる。クラストラベルは 20 Hz 以上の速度で割り当てることができ、PCI は 20 フレーム / 秒以上の速度で電子的に表示することができる。F O V を、偏光計が取り付けられているジンバルまたは移動式プラットフォームによって面積または体積にわたって走査または掃引することができる。さらに、検出器信号の組は、走査素子によって提供されるタイミング信号を使用するロックイン増幅器によって、第 1 の組の偏波変調器および第 2 の偏波変調器によって形成されたチャンネルの組と同期することができる。一実施形態では、チャンネルは、縮小ミューラ行列のベクトル空間に勾配演算子を適用し、かつ、結果として得られるコントラストパラメータを最大にする部分空間射影アルゴリズムによって定義され、ユーザ調整可能な閾値は、部分空間射影アルゴリズムによって得られるチャンネルの関数である。別の実施例では、コントラストパラメータおよびユーザ調整可能な閾値の関数は、外部機械学習アルゴリズムによって定義される。

【 0 0 1 7 】

本発明の別の実施形態は、複数の独立したチャンネルを含む偏光計を使用して視野 (F O V) 内の単一または複数の標的を分類または認識するための方法を提供する。この方法は、検出器およびその間に位置決めされた F O V を含む経路内に制御された電磁放射線源 (E M R) を位置決めするステップを含む。この方法は記録チャンネル合波器 (R C M) を使用し、記録チャンネル合波器 (R C M) は、独立偏波変調器の組の各部材がチャンネルに対応し、かつ、この組が一連の独立した偏波状態の間でビームの偏波状態を変調するように構成された、変調されたビームを生成する第 1 の組の独立偏波変調器の間に、制御 E M R 源からのビームを連続的に向ける走査素子と、変調されたビームを、F O V に向けられる同時記録された経路に向け直す反射器の組立品とを使用する。この方法は、F O V 内の物体から反射された、または F O V 内の物体によって伝達された E M R の一部を、第 1 の組の偏波変調器から独立している第 2 の偏波変調器に E M R を向ける E M R 収集器によって収集するステップと、第 2 の偏波変調器から E M R を検出器で受けるステップとをさらに含み、ここで、検出器は、第 1 の組の偏波変調器および第 2 の偏波変調器によって形成されたチャンネルの組と同期する検出器信号の組を生成する。この方法は、分類アルゴリズムお

10

20

30

40

50

よびユーザ調整可能な閾値を検出器信号の組に適用してクラスラベルを検出器信号の組に割り当て、ここで、分類アルゴリズムは、第1の組の偏波変調器および第2の偏波変調器によって形成されたチャンネルの組に関して閾値の関数を指定し、クラスラベルは、0または1のみの値、または多値の値を想定した二値とすることができる。第1の組の独立偏波変調器および第2の独立偏波変調器は調整可能であり、第1の組の偏波変調器の1つ以上の部材はビームブロックであってもよい。収集器によって第2の変調器に向けられたEMRは、FOV内の物体から照射または放射される受動型源からのEMRを含んでもよく、その場合、走査素子がビームブロックに向けられている間に収集器によって第2の変調器に向けられるEMRは、検出器信号の組の要素として受動チャンネルに対応する検出器信号を生成することができる。一実施形態では、検出器信号の組は、記録されたデジタル画像の組であり、クラスラベルは、デジタル偏波分類画像(PCI)を形成するように各画素に割り当てられる。クラスラベルは20Hz以上の速度で割り当てることができ、PCIは20フレーム/秒以上の速度で電子的に表示することができる。この方法はまた、偏光計が取り付けられているジンバルまたは移動式プラットフォームを使用して、FOVを面積または体積にわたって走査または掃引するステップを含む。この方法はまた、走査素子からのタイミング信号を読み出すロックイン増幅器を使用して、検出器信号の組を、第1の組の偏波変調器および第2の偏波変調器によって形成されたチャンネルの組と同期するステップを含む。一実施形態は、縮小ミューラー行列のベクトル空間に勾配演算子を適用し、かつ、結果として得られるコントラストパラメータを最大にする部分空間射影アルゴリズムを使用して偏波チャンネルを定義するステップを含み、ユーザ調整可能な閾値は、部分空間射影アルゴリズムによって得られるチャンネルの関数とすることができる。別の実施形態は、外部機械学習アルゴリズムを適用して、コントラストパラメータおよびユーザ調整可能な閾値の関数を定義するステップを含む。

10

20

【0018】

別の実施形態は、フィールド実装のためにSWaPが十分に小さい結像モードにおいてビデオ速度までのデータ速度を達成することができるハイブリッド式偏光計および使用方法を含む。

【0019】

新規の部分空間射影アルゴリズムは、対象の標的または状態と、予想される背景と、観察され得る他の物体または状態との間のコントラストを最大にする偏波変調器の設定またはチャンネルの組を特定する。各偏光計チャンネルは、放射照度測定値または検出器信号に対応し、複数のチャンネルの測定値は、一般に、物体または状態が標的に対応するか否かを試験するために使用される検出器信号の組または射影を形成するように組み合わせられる。射影は、使用される分類アルゴリズムの種類に応じて、1次元または多次元の放射照度信号であってもよい1次元射影の場合、閾値を超えるかまたは下回るか、または2つの閾値の間にある放射照度が正の標的分類に対応するように、単純な放射照度閾値が分類子としての役割を果たす。結像モードでは、全てのピクセルが独立したセンサであり、正の分類は、他の全てのピクセルが黒色の白いピクセルで表すことができ、迅速な解釈および実用的なデータの伝送および記憶に有利な二値偏波分類画像(PCI)を提供する。

30

【0020】

部分空間射影アルゴリズムは、予想される物体、物質、および/または物質状態の利用可能な偏波変調器およびミューラー行列から偏光計チャンネルを導出し、ミューラー行列はモデルおよび/または訓練の特性評価測定から先験的に知られている。部分空間射影アルゴリズムは、単一の標的ミューラー行列のみが入力として使用される場合に、最大限に偏った1次元の分類子を提供し、非標的ミューラー行列が入力に組み込まれる場合、より一般化された分類子を提供する(発明を実施するための形態を参照)。この方法を、既存の偏光計に適用して実現可能なチャンネルの最適な組を導出するか、または偏光計の設計段階で適用して必要な分類またはATRの性能を達成できるチャンネルの最小組を導出することができる。

40

【0021】

50

本発明の別の実施形態は、偏光計によって記録された単一または複数の標的のコントラストを強調する方法を提供する。この方法は、モデル化されたまたは測定された単一または複数の標的のミューラー行列および偏光計によって記録される他の物質または物体を取得するステップと、偏波変調器の設定を特定するために、ミューラー行列および偏光計の偏波変調器の組に部分空間射影アルゴリズムを適用するステップとを含み、ここで、部分空間射影アルゴリズムは、縮小ミューラー行列のベクトル空間に勾配演算子を適用し、結果として得られるコントラストパラメータを最大にする。別の実施例は、外部機械学習アルゴリズムを適用して、コントラストパラメータを定義するステップを含む。

【0022】

本発明は、結像モードでビデオ速度までのデータ速度を達成する偏波合波器のための新規のハードウェア設計を含む。受動型偏光計が受信機のみにおいて偏波変調器を含む一方で、能動型偏光計は送信機および受信機の両方において変調器を含む。本発明の一実施形態は、従来の偏波変調器、偏光プリズムを受信機において使用し、より一般的な記録チャンネル合波器(RCM)の一形態である新規の時間多重化偏波変調器(または偏波合波器)を送信機において使用する。RCMは、受動チャンネルに対応するヌル状態を含む可能性がある複数の独立した調整可能な状態の間で、ビームを切り替えたり走査したりするためにスキャナを利用する様々な形状を想定することができる。機械的スキャナによるビデオ速度の多重化を達成するには、特許文献1、特許文献2、および特許文献4に教示されているような回転式のリターダ偏光計において使用される中空コアモータよりも低慣性のロータが必要である。本発明の一実施形態は、調整可能な偏波変調器の組の間でレーザビームを切り替える低慣性ガルバノメータスキャナを使用する。送信機内の各変調器は、受信器の静的偏光プリズムと組み合わせて2つの直交偏光計チャンネルを構成する一方で、偏光計は全体に8つ以上のチャンネルを有することができる。送信機内の各偏波変調器は、複数の任意のチャンネルを実現するように独立して調整することができる。

【0023】

本発明の偏光計の主要な実施形態を使用して、自然の背景上の様々な物質の分類が、約20mの水平範囲でのフィールド試験で実証されている。主な実施例の用途には、経路間隔に対する危険物の分類、採鉱、製造、廃棄、および再生利用の流れにおける物質の分類、および、繊維複合材および非立方体金属を含むがこれらに限定されない車両および構造材料の即時の非破壊試験が挙げられるが、これらに限定されない。レーザ周波数および/または射影および収集光学系を変更することによって、本発明は、薄膜、織物、ポリマー、キラル医薬品、複合材料、および非立方体金属の監視を含むがこれに限定されない製造用途、および、機械加工およびレーザー加工を含む処理に向けてカスタマイズすることができる。本発明の小規模の実施形態は、資産のタグ付けおよび製品認証、マイクロプラスチックの定量化、生物医学的組織の分析、および一般的な偏光顕微鏡検査のためのセキュリティインク認識に適用可能である一方で、高出力レーザを使用する大規模の実施例は、分解済または未分解の画像からの長距離の物質および物体の分類および認識、事例の監視および調査、損害評価、捜索および救助、汚染物質および特にプラスチック破片のマッピングおよび評価、および宇宙物体の分類などに適用可能である。

【図面の簡単な説明】

【0024】

添付の図面は、本明細書に組み込まれて本明細書の一部を形成し、本発明の1つ以上の実施形態を示し、記述とともに本発明の原理を説明する役割を果たす。図面は、本発明の1つ以上の実施形態を説明するためのものにすぎず、本発明を限定するものとして解釈されるべきではない。

【0025】

【図1】電磁放射線(EMR)源、行われる測定、使用される偏波変調器、および用途に基づく偏光計型式の分類法の図である。

【図2】能動型モノスタティックセンサ、受動型バイスタティックセンサおよびハイブリッド式能動型-受動型センサの形状を示す図である。

10

20

30

40

50

【図3】8つの能動型調整可能偏波チャンネルまたは4つの独立した能動型調整可能偏波差チャンネルを提供する、本発明の実施例の偏波合波器を示す図である。

【図4】6つの能動型調整可能偏波チャンネルおよび2つの受動型調整可能偏波チャンネルを提供する、本発明の実施形態の偏波合波器を示す図である。

【図5】本発明の一実施形態で使用される複合ウェッジスキャナミラーの図である。

【図6A】本発明の実施形態のフィールド試験で得られた浜辺のビニール袋の従来の画像と対応する偏波分類画像（PCI）との、15mの水平範囲での比較である。

【図6B】本発明の実施形態のフィールド試験で得られた浜辺のビニール袋の従来の画像と対応する偏波分類画像（PCI）との、15mの水平範囲での比較である。

【図7】試験サイトにおいて選択された物質の分布をマッピングするように設計された本発明の一実施形態のフローチャートである。

【図8A】異なる分類子の閾値を用いて得られた浜边上のビニール袋の1組の偏波分類画像（PCI）である。

【図8B】異なる分類子の閾値を用いて得られた浜边上のビニール袋の1組の偏波分類画像（PCI）である。

【図8C】異なる分類子の閾値を用いて得られた浜边上のビニール袋の1組の偏波分類画像（PCI）である。

【図8D】異なる分類子の閾値を用いて得られた浜边上のビニール袋の1組の偏波分類画像（PCI）である。

【発明を実施するための形態】

【0026】

本発明は、利用可能な偏波変調器および先験的なミューラー行列から偏光計チャンネルおよび対応する分類子を導出するために使用される部分空間射影アルゴリズムを最初に説明し、次いで、フィールド実装を可能にするために寸法、重量、および電力（SWAP）が十分に小さい結像モードにおいてビデオ速度までのデータ速度を達成することができるハイブリッド式偏光計において実用化するように新規の偏光計の設計を縮小することができる特定のハードウェアを説明することによって、図面を参照して詳細に説明することができる。

【0027】

部分空間射影アルゴリズムは、技術文献で知られているものを、部分ミューラー行列偏光計（partial Mueller-matrix polarimeter、pMMP）として導出する。新たに開示された部分空間射影アルゴリズムは、誤差が生じやすい擬似逆行列の使用を回避し、偏光計によって観察することができる物体、物質、または物質状態に制限を課さない点で、先に公開されたpMMP設計方法に対して有利である。

【0028】

部分空間射影アルゴリズムは、

【数4】

$$I' \equiv I - I_U, \quad (4)$$

のように測定された放射照度を低減させることによって形成された縮小ミューラー行列のベクトル空間にベクトル代数を適用することに基づいており、式中、 I は偏光計によって実際に測定された放射照度であり、 I_U は従来の非偏光カメラが非偏光照明で測定する放射照度である。低減された放射照度 I' は、正または負であり得る。低減された放射照度は、低減された偏光計器の行列と、照射された物体の縮小ミューラー行列とのベクトル積として表現可能であることが分かる。

【0029】

10

20

30

40

【数5】

$$\tilde{M}' \equiv [M_{01} \quad M_{02} \quad M_{03} \quad M_{10} \quad \dots \quad M_{31} \quad M_{32} \quad M_{33}]. \quad (5)$$

【0030】

従来のミューラー行列は代数ベクトル空間を形成しないので、縮小ミューラー行列の構築が必要である。そこで、一般的なpMMP設計の問題は、以下のように、標的ミューラー行列 M_T と、パラメータ集合

$$\Theta = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_Q\}$$

によって定義される偏光計構成が与えられた場合、 $M \times N$ の偏光計放射照度測定値 $\{I_{m \times n}\}$ 、 $m = 1, \dots, M$ および $n = 1, \dots, N$ の集合内の標的行列の表現を最大にする集合 Q を決定することである。本発明の一実施形態では、パラメータ Q はリターダ-波長板の角度方向であるが、 Q は偏波変調器の設定の任意の組み合わせを表すことができる。このアルゴリズムはまた、受動型偏光計のためのチャンネルおよび分類子を導出するのに一般的に十分である。偏光計測定における標的コントラストを最大にするために、偏光計器の行列は、縮小標的行列

$$\tilde{M}'_T$$

の部分空間への射影を最大にするように選択されなければならない。

【0031】

この部分空間射影は、微分可能な標的行列を定義し、低減された放射照度に対して

【数6】

$$\nabla' \equiv \sum_{i=1}^{15} \hat{M}'_i \frac{\partial}{\partial M'_i}, \quad (6)$$

として定義された縮小ミューラー行列の空間に勾配演算子を適用することによって形式化することができる。

【0032】

次に、偏光計測定における標的の表示は、変調器パラメータの組に対して、ベクトルのドット積であるコントラストパラメータを最大化することによって最大化され、すなわち、

【数7】

$$\max_{\Theta} |C| = \max_{\Theta} |\nabla' I \cdot \nabla' I_T|, \quad (7)$$

である。

【0033】

この新規の偏光計システムおよび使用方法は、本発明の主要な実施形態を用いて収集されたフィールドデータを用いて検証されている。この実施形態を、図面を参照してより詳細に説明することができる。

【 0 0 3 4 】

異なる電磁放射線（EMR）源を利用するフィールドセンサが図2に示されている。センサ視野（FOV）は、例えばセンサが車両に取り付けられている場合、または物体がコンベヤベルト上などの固定されたFOVを通して移動する場合など、面積または体積にわたって走査または掃引することができる。各記録フレームは、標的を含んでも含まなくてもよいが、説明のために図2では標的を想定している。標的1は、センサ送信機3によって投影される典型的にはレーザービームであるプローブビーム2（probe beam）によって照射される。標的は受動型源4によって照射されてもよく、この受動源4は、典型的には太陽であるが、赤外線周波数が記録されている場合には物体自体からの熱放射とすることができる。能動センサの場合、反射されたプローブEMR5はセンサ受信機6によって記録される一方で、受動センサの場合、受信機7は反射された受動EMR8のみを記録する。ハイブリッド式能動型 - 受動型センサ（hybrid active-passive sensor）は、送信機10によって射影されたプローブビーム9を用いて標的を照射し、反射されたプローブEMR11および反射された受動EMR12の両方を受信機13に記録する。

10

【 0 0 3 5 】

以下に説明する新規のハードウェア設計により、部分空間射影アルゴリズムによって指定されたチャンネルが実装され、対応するデータがビデオ速度で得られる。偏波合波器はセンサ送信機に内蔵されており、その実施形態は、図2の3および10で示されている。偏波合波器は、記録チャンネル合波器（RCM）の一形態である。複屈折結晶波長板が偏波変調器のために想定されるが、他の偏波変調器を使用することもできる。従来の偏光計は、中空コア式モータを回転させる際に波長板を使用し、これは非常に正確であるが、偏光映像を実現するほど高速ではない。図3に示すように、本発明の実施形態は、独立した調整可能な偏波変調器を含む複数のアームの間で切り替えるために、ガルバノメータスキャナなどの低慣性スキャナを使用する。

20

【 0 0 3 6 】

図3を参照して、一実施形態では、レーザー14は、各々が受信機（図示せず）内の静的偏光プリズムを組み合わせると対の直交チャンネルを画成する複数の独立したアーム17a-dの間で、ガルバノメータスキャナ16によって連続的に走査されるミラー15に衝突する平行光線を放射する。最初の時間間隔の間、スキャナは、部分空間射影アルゴリズムによって指定されたチャンネルに設定された第1の偏波変調器18を含む第1のアーム17aを介してビームを向ける。変調器18は、回転可能な結晶波長板または対の波長板であってもよいが、他の種類の偏波変調器であってもよい。偏波変調器に続いて、ビームは折り畳みミラー組立品19（fold mirror assembly）によって反射されてスキャナミラー15に戻され、次いでビームを視野に向けて反射する視野ミラー20（field mirror）に戻される。ビームは一般に、ビーム位置21に配置された射影レンズによって拡大されるか、または焦点が合わせられる。スキャナは、第1のアーム17a上に所定の時間間隔で滞留し、次いで、第2の時間間隔、通常は第1の時間間隔と同じ持続時間で第2のアーム17bに切り替わり、次いで、第1アーム17aまで逆戻りして走査を繰り返す前に残りのアーム17c-dを切り替える。図3に示すサブシステムは一般に、偏波状態発生器（PSG）と呼ばれ、4つより多くのアームまたは4つより少ないアームを有することができる。

30

40

【 0 0 3 7 】

一般に、スキャナ位置、例えば図3に示される実施形態の4つの位置の組に対して収集された放射照度または画像の組は、分類に使用される射影ベクトルを形成する。各アームの停止時間は、アームの数、FOVから収集されたEMR電力、検出器の感度、およびセンサの速度要件によって決定され、一般にスキャナの切り替え速度によって制限される。停止時間に加えて、スキャナは特徴的な切り替え時間を有する。4つのアームと高性能ガルバノメータスキャナによる停止時間および切り替え時間の典型的な合計は12.5msであり、これは、各画像または射影ベクトルの収集については50msを意味する。十分

50

に高速なデータ処理により、20フレーム/秒のPCIの映像を可能にする。より高速なスキャナは、より速いデータ速度を可能にする。

【0038】

図4は、スキャナがビームブロック22上に存在する間に記録されたヌルチャネルを含むPSGを示している。ヌルチャネルは、残りのアームから得られた能動チャネルと組み合わせられた一対の受動チャネルを記録して、ハイブリッド式能動型-受動型偏光計を実現する。受動型源からの反射電力がレーザの反射電力よりも小さいかまたは大きい場合、ヌルチャネル上の停止時間は、能動チャネル上の停止時間と同じであってもよく、より長くてもよく、またはより短くてもよい。スキャナタイミング信号は、ロックイン検出のための基準周波数を提供することができる。

10

【0039】

図5は、本発明の一実施形態の複合スキャナミラーを示している。複合スキャナミラーの主要部分は、取付ボス23 (mounting boss)、平面ミラー24、およびウェッジミラー25である。ミラー24および25は、少なくとも中央部では高い光学的品質を有していなければならない、表面は回転軸と同一平面上で、かつ回転軸を中心としていなければならない、ビデオ速度データを得るために組立品全体が低慣性でなければならない。フィールド試験に使用される複合ミラーは、3D印刷されたプラスチック部材で構成され、 6.4 g/cm^2 の慣性モーメントを有する。ガルバノメータベースの合波器の代替実施例、例えば複合ウェッジミラーを必要としない実施例を使用することができる。開示された偏波合波器は、記録チャネル合波器(RCM)の一形態であり、一般に、出力において空間的および角度的に記録されたビームを生成する異なるチャネルの間で時間内に切り替わる。異なる形態のRCMは、本発明に図示された実施形態の偏波変調器に他の変調器を代用することによって実現することができる。

20

【0040】

分類性能およびデータ処理速度は、分類アルゴリズムに依存し、非常に多様なアルゴリズムを使用することができる。分類アルゴリズム、または単に分類子は、測定されたチャネルの数に対応する1次元または多次元であってもよい。2チャネルの偏光計は、典型的には、測定されたチャネル間の差に基づいて1次元の分類子を使用し、したがって、偏波差結像(PDI、polarization difference imaging)という用語が使用される。1次元の分類子は、指定されたチャネルで測定された放射照度射影がユーザ定義の閾値より高いか、または2つの閾値の間にある場合に、正の目標分類を行い、そうでない場合は負の分類を行う。本発明の部分空間射影アルゴリズムによって得られたチャネルに関して、分類子を定義することができる。

30

【0041】

分類子は、訓練データ集合の性能と予期しないデータに一般化する能力とを両立するバイアス分散のトレードオフの観点から記述されている。最小限の訓練データ集合は標的のみを含み、目標のみを含む場面では良好に動作するが、クラッタ物体が観察されると頻繁な誤警報を被る可能性がある高バイアス分類子をもたらす。部分空間射影アルゴリズムの式7から導出されたチャネルに基づく1次元の分類子は、高バイアス分類子である。分散は、訓練データ集合に表されていない標的の変化および/または背景またはクラッタを含む場面で良好に性能を発揮する分類子の能力である。分類子の次元数を増加させると、その射影がより一意的である高次元の空間に標的特性が射影されるので、分散を増加させることができる。部分空間射影アルゴリズムの式7から導出された2つ以上のチャネルを組み合わせることで、分類子の次元を増加させることができる。代替的に、または組み合わせ、背景および/または予想されるクラッタ物体の特性を含むより大きな訓練データ集合を使用することによって、分類子の偏りを低下させることができる。例えば、一般化されたコントラストパラメータRを最大化することによって背景特性を組み込むことができ、

40

【0042】

【数 8】

$$\max_{\theta} |R| = \max_{\theta} \left| \frac{\nabla' I' \cdot \nabla' I'_T}{\nabla' I' \cdot \nabla' I'_B} \right|, \quad (8)$$

式中、分母は、式 7 の単純な標的コントラストではなく、測定されたチャンネルにおける背景特性の表現を定量化する。7. 部分空間射影アルゴリズムによって導出されたチャンネルに基づく一般化されたコントラストパラメータの多くの他の例は、背景および任意の数のクラッタ偏波特性を組み込むことが可能である。本発明の部分空間射影アルゴリズムは、主成分分析 (PCA) および分類子をさらに一般化するための支援ベクトルマシン (SVM) を含むがこれに限定されない確立されたアルゴリズムと組み合わせることができることも、学習アルゴリズムの当業者には明らかである。

【0043】

画像フォーマットにおいて、分類子は各画素に独立して適用される。正の分類は、他の全てのピクセルが黒色である白色ピクセルによって表すことができ、図 6 に示すような二値偏波分類画像 (PCI) が得られる。二値画像は、迅速な解釈および実用的なデータ伝送および記憶に有利である。図 6 の従来の非偏光画像では、特にビデオ速度で大面積を走査する場合、PCI が標的を鮮明に明らかにする一方で、標的であるビニール袋 26 (plastic bag) は、藻類、小枝、および他のクラッタ物体 27 からほとんど見分けがつかない。図 6 に示す PCI は、15 m の水平範囲で白昼に本発明の主な実施形態によるフィールド試験において得られた。

【0044】

図 7 は、部分空間射影 pMMP 設計アルゴリズムによって導出された分類子を使用した、試験サイトにおいて選択された物質の分布をマッピングするように設計された本発明の一実施形態のフローチャートである。破線のボックス 28 内の構成要素は、フィールドセンサ上に搭載され、フローチャートは、単一の画像またはビデオフレームに対応する。センサの視野は、図示されていない運動システムによって、検査領域にわたって走査または掃引することができる。部分空間射影 pMMP 設計アルゴリズムは、コンピュータメモリ 29 に記憶された分類子と、チューナ 30 を介してユーザによって変更することができる偏波変調器の設定とを定義する。PSG スキャナ 31 は、RCM 内の独立変調器の間でビームを切り替え、部分空間射影アルゴリズムによって定義されたチャンネル 33 に対応する画像を記録するようにカメラ 32 をトリガするタイミング信号を提供する。これらの画像および対応するチャンネル仕様は、汎用グラフィックス処理ユニット (GP GPU) 35 などのリアルタイムプロセッサに入力される試験データ 34 を構成する。他の実時間アーキテクチャを使用することもできるが、GP GPU のような並列処理アーキテクチャは、各ピクセルが独立したセンサとして処理されるので有利である。ユーザは、制御器 36 を介して分類子の閾値を調整することができる。これらの入力から、プロセッサは、二値 PCI の各ピクセルにおいて 0 または 1 であるクラスラベル 37 を生成する。標的がフレーム内に存在する場合、すなわちフレームが十分な数の白色ピクセルを含む場合、フレームは、外部 GPS モジュール 38 によって提供される対応するグローバル測位システム (GPS) 座標を用いてサイトマップ上に記憶される。十分なメモリがあれば、全てのフレームをサイトマップに記憶することができる。あるいは、各フレームに、クラスラベル 0 または 1 を割り当てて、画像を含まない密度マップを生成することができる。GPS モジュールおよび記憶されたサイトマップは、センサ上に搭載されてもよい。

【0045】

図 8 A ~ 図 8 D は、分類子閾値が調整されるときに本発明の主要な実施例によって得られる、図 6 A に示す場面の二値 PCI の組である。

【 0 0 4 6 】

分類子の訓練および偏光計の試験および通常使用はいずれも、上述のステップを実施するコンピュータソフトウェアでプログラムされた汎用または特定目的のコンピュータまたは分散システムによって実行され、コンピュータソフトウェアは、C++、Python、FORTRAN、BASIC、Java（登録商標）、アセンブリ言語、分散プログラミング言語などの任意の適切なコンピュータ言語におけるものであってもよい。装置はまた、様々なハードウェア実装において（例えば、インターネットおよび/または1つ以上のイントラネットを介して接続された）複数のそのようなコンピュータ/分散システムを含んでもよい。例えば、データ処理は、適切にプログラムされたマイクロプロセッサ、コンピューティングクラウド、フィールドプログラマブルゲートアレイ（FPGA）、汎用グラフィックス処理ユニット（GPGPU）などによって、適切なメモリ、ネットワーク、およびバス要素とともに行ってもよい。本明細書で開示される全てのコンピュータソフトウェアは、（媒体の組み合わせを含む）任意のコンピュータ可読媒体上に具体化されてもよく、CD-ROM、DVD-ROM、ハードドライブ（ローカルまたはネットワーク記憶装置）、USBキー、その他の取り外し可能なドライブ、ROM、およびファームウェアを含むがこれらに限定されない。

10

【 0 0 4 7 】

本明細書および特許請求の範囲において、「a」、「an」、および「the」という語は、別段の指定がない限り1つ以上を意味し、「約」または「およそ」とは、引用した数値の20パーセント（20%）以内を意味する。

20

【 0 0 4 8 】

これらの実施例を特に参照して本発明を詳細に説明したが、他の実施例も同じ結果を達成することができる。本発明の変形および変更は当業者には明らかであり、そのような変更および等価物の全てに及ぶことが意図されている。全ての参考文献、出願、特許、および上記で引用されたおよび/または添付の刊行物および対応する出願の全開示は、参照により本明細書に組み込まれる。

【 図 1 】

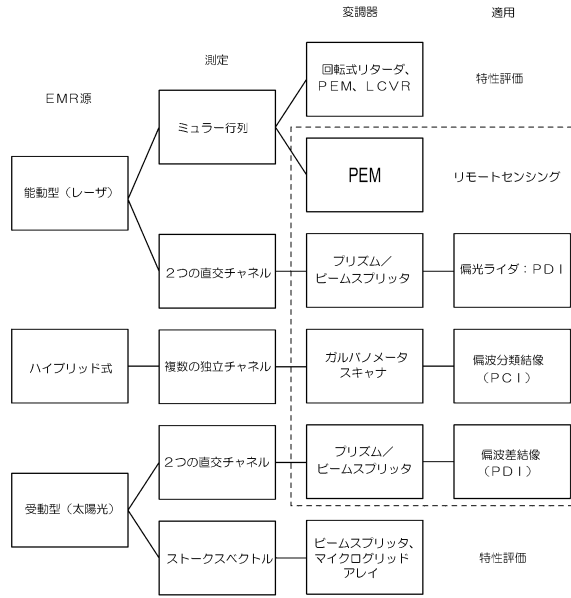


FIG. 1

【 図 2 】

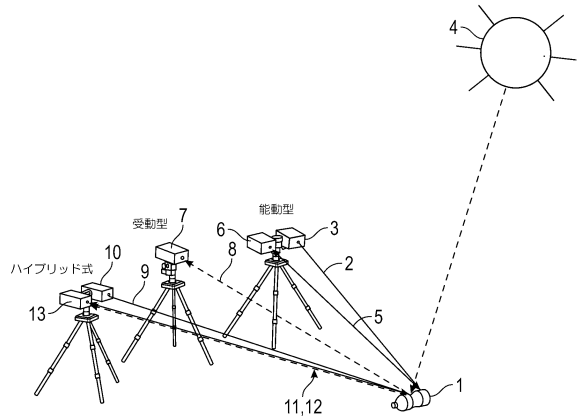


FIG. 2

【 図 3 】

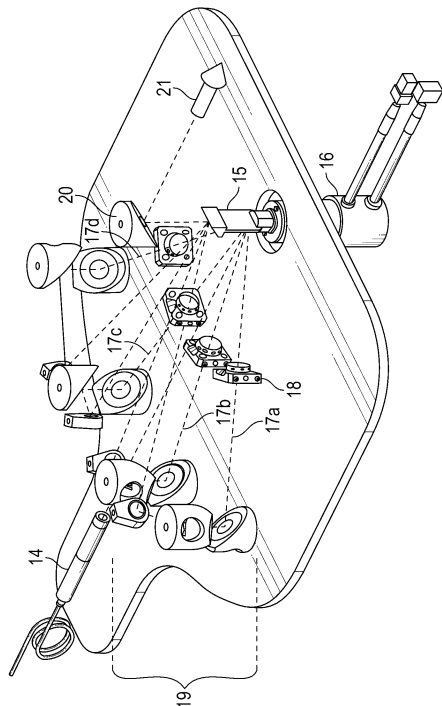


FIG. 3

【 図 4 】

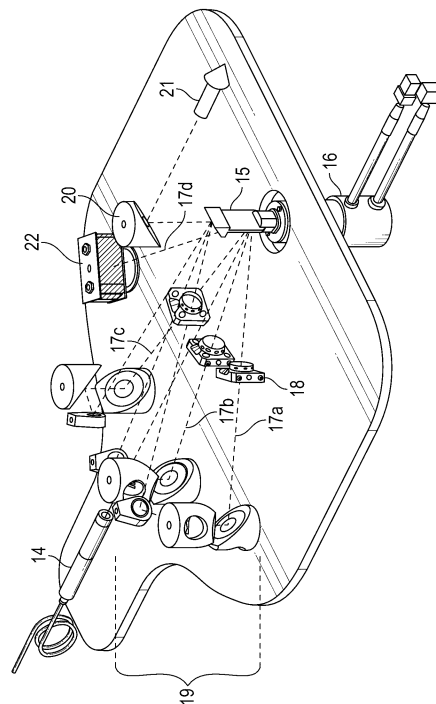


FIG. 4

【図5】

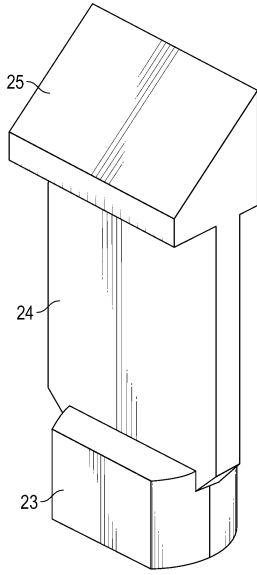


FIG. 5

【図6A】

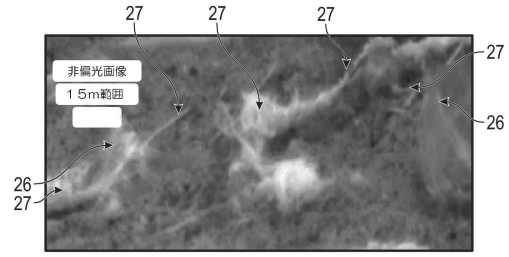


FIG. 6A

【図6B】



FIG. 6B

【図7】

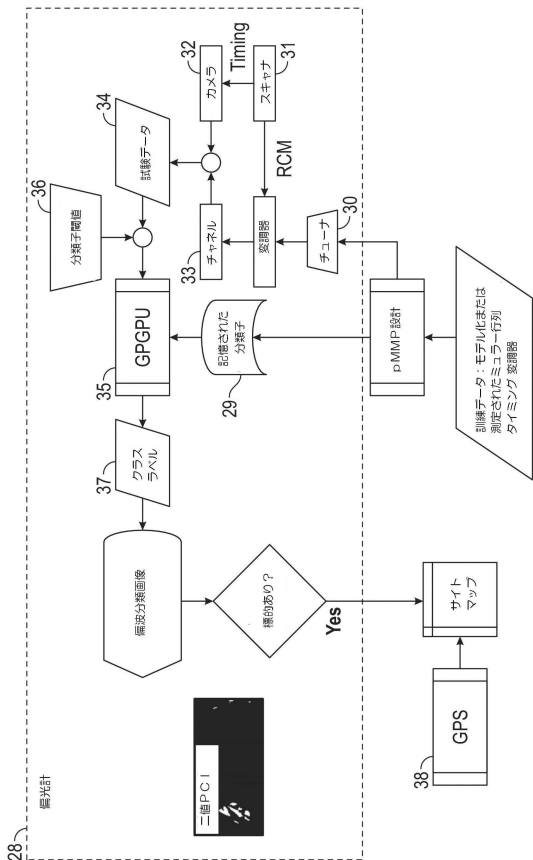


FIG. 7

【図8A】

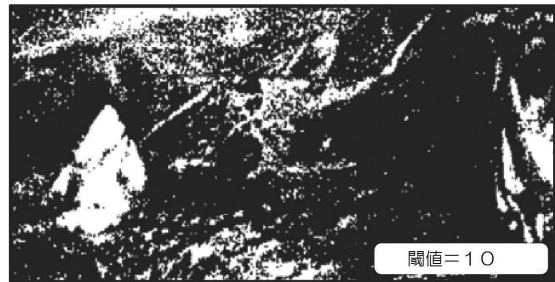


FIG. 8A

【図8B】



FIG. 8B

【図 8 C】



FIG. 8C

【図 8 D】

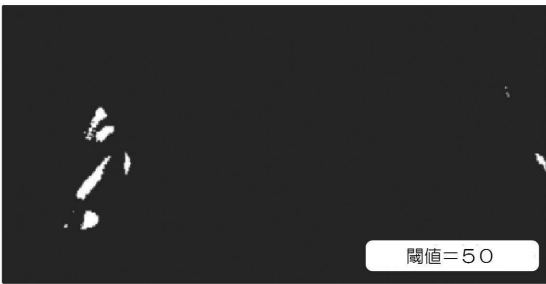


FIG. 8D

フロントページの続き

- (72)発明者 レイエス, パブロ, エー.
アメリカ合衆国 ニューメキシコ州 87106, アルバカーキ, シカモア ストリート ノース
イースト 450
- (72)発明者 タリアフェロ, デイビッド, イー.
アメリカ合衆国 ニューメキシコ州 87107, アルバカーキ, グランド ドライブ ノースウ
ェスト 4912
- (72)発明者 コーレップ ザ サード, パーシル, エヌ.
アメリカ合衆国 ニューメキシコ州 87042, ペラルタ, パークレーン サークル 10

審査官 横尾 雅一

- (56)参考文献 特表2015-527618(JP, A)
特開2005-181927(JP, A)
特開2012-078802(JP, A)
米国特許出願公開第2005/0264813(US, A1)
特開2002-151774(JP, A)
特開平04-267214(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 21/00 - 21/61
G01J 4/00 - 4/04
G02B 19/00 - 21/00
G02B 21/06 - 21/36
G02B 5/00 - 5/136
G02B 26/10 - 26/12
G02B 27/00 - 27/64