(19)日本国特許庁(JP)　(12)特　許　公　報(B2)　(11)特許番号

特許第6542178号
(P6542178)

(45)発行日　令和1年7月10日(2019.7.10)　(24)登録日　令和1年6月21日(2019.6.21)

(51)Int.Cl.		F I		
G01N 21/17	(2006.01)	G01N	21/17	630
G01N 21/21	(2006.01)	G01N	21/21	Z
G01N 21/23	(2006.01)	G01N	21/23	
A61B 3/10	(2006.01)	A61B	3/10	

請求項の数 15　(全 25 頁)

(21)出願番号　特願2016-201911(P2016-201911)
(22)出願日　平成28年10月13日(2016.10.13)
(65)公開番号　特開2018-25524(P2018-25524A)
(43)公開日　平成30年2月15日(2018.2.15)
審査請求日　平成30年12月21日(2018.12.21)
(31)優先権主張番号　特願2016-154112(P2016-154112)
(32)優先日　平成28年8月5日(2016.8.5)
(33)優先権主張国　日本国(JP)

早期審査対象出願

(73)特許権者　501299406
株式会社トーメーコーポレーション
愛知県名古屋市西区則武新町二丁目１１番３３号
(72)発明者　山成　正宏
愛知県名古屋市西区則武新町２丁目１１番３３号　株式会社トーメーコーポレーション内

審査官　嶋田　行志

最終頁に続く

(54)【発明の名称】偏光情報を利用した光断層画像撮影装置

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
光干渉を用いて対象物の断層画像を取得する光断層画像撮影装置であって、
前記光干渉による干渉光を検出し、前記干渉光の干渉信号を出力する検出装置と、
前記検出装置で検出された少なくとも１つの干渉光に対応する前記干渉信号のノイズ成分及び信号強度を用いて、当該ノイズ成分のフォンノイマンエントロピーを算出する演算装置と、を備えることを特徴とする光断層画像撮影装置。
【請求項２】
前記演算装置は、干渉信号のフォンノイマンエントロピーをさらに算出すると共に、算出された前記干渉信号のフォンノイマンエントロピーから前記ノイズ成分のフォンノイマンエントロピーを除去することによって、前記測定物の偏光特性を示すフォンノイマンエントロピーをさらに算出することを特徴とする、請求項１に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項３】
前記ノイズ成分のフォンノイマンエントロピーは、サンプルの深さ方向に累積した偏光特性から計算されることを特徴とする、請求項１又は２に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項４】
前記サンプルの深さ方向に累積した偏光特性はジョーンズ行列で特徴付けられることを特徴とする、請求項３に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項５】
前記サンプルの深さ方向に累積した偏光特性はミューラー行列で特徴付けられることを

特徴とする、請求項３に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項６】
前記サンプルの深さ方向に累積した偏光特性はジョーンズベクトルで特徴付けられることを特徴とする、請求項３に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項７】
前記サンプルの深さ方向に累積した偏光特性はストークスベクトルで特徴付けられることを特徴とする、請求項３に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項８】
前記光断層画像撮影装置において、干渉光を少なくとも２つの異なる偏光成分に分離し検出することを特徴とする、請求項４から７のいずれか１項に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項９】
前記ノイズ成分のフォンノイマンエントロピーは、サンプルの深さ方向に局所化された偏光特性から計算されることを特徴とする、請求項１又は２に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項１０】
前記サンプルの深さ方向に局所化された偏光特性はジョーンズ行列で特徴付けられることを特徴とする、請求項９に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項１１】
前記サンプルの深さ方向に局所化された偏光特性はミューラー行列で特徴付けられることを特徴とする、請求項９に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項１２】
前記サンプルの深さ方向に局所化された偏光特性はジョーンズベクトルで特徴付けられることを特徴とする、請求項９に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項１３】
前記サンプルの深さ方向に局所化された偏光特性はストークスベクトルで特徴付けられることを特徴とする、請求項９に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項１４】
前記光断層画像撮影装置において、干渉光を少なくとも２つの異なる偏光成分に分離し検出することを特徴とする、請求項１０から１３のいずれか１項に記載の光断層画像撮影装置。
【請求項１５】
光干渉を用いて対象物の断層画像を取得する光断層画像撮影装置であって、
前記光干渉による干渉光を検出し、前記干渉光の干渉信号を出力する検出装置と、
前記検出装置で出力された前記干渉信号に基づいて前記対象物の偏光特性を示す共分散行列を算出し、算出した共分散行列に基づいてフォンノイマンエントロピーを算出する演算装置と、を備え、
前記演算装置は、算出に用いる共分散行列のアンサンブル平均のサンプル数が十分でない場合に、アンサンブル平均された共分散行列の固有値を補正し、補正した固有値を用いてフォンノイマンエントロピーを算出することを特徴とする光断層画像撮影装置。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明は、光コヒーレンストモグラフィーにより、光断層画像撮影する装置に関し、特に、偏光感受型光コヒーレンストモグラフィーによる計測データの高精度化のための補正処理を備えた光断層画像撮影する装置に関する。
【背景技術】
【０００２】
光コヒーレンストモグラフィー（ＯＣＴ）は、非侵襲、非接触で測定できることから、眼科において生体組織や手術で留置された非生物物質の高解像度な断層画像を取得する手段

として広く使用されている方法である。
【０００３】
光コヒーレンストモグラフィー（ＯＣＴ）においては、タイムドメイン方式と呼ばれる、ミラーを動かして参照光の光路長を機械的に変化させながら断層画像取得を行うタイムドメインＯＣＴと、フーリエドメイン方式と呼ばれる、分光器を用いてスペクトル情報を検出し断層画像取得を行うスペクトルドメインＯＣＴ、もしくは、波長走査光源を用いてスペクトル干渉信号を検出し断層画像取得を行う光周波数掃引ＯＣＴとがある。
【０００４】
偏光状態を変化させる複屈折は分子が一定方向に配列する組織において生じる。眼底における網膜では網膜神経線維層、血管壁、強膜、篩状板に強い複屈折性が存在する。また、網膜色素上皮層はメラニン色素が持つ偏光解消効果により散乱光の偏光状態がランダムになる特性を持つ。機能性ＯＣＴの一つである偏光感受型ＯＣＴ（ＰＳ－ＯＣＴ）は、この複屈折性や偏光解消効果を持つこれら組織の可視化が可能であり、近年、さまざまな偏光感受型ＯＣＴの開発が試みられている。
【０００５】
偏光感受型ＯＣＴ（ＰＳ－ＯＣＴ）は、サンプルを観察する測定光に円偏光或いは偏光変調した光を用い、干渉光を２つの直交する直線偏光として検出する構成をとることが一般的である。
【０００６】
特許文献１には、偏光感受型ＯＣＴ（ＰＳ－ＯＣＴ）の１例が開示されている。そこには、Ｂスキャンと同時に（同期して）光源からの偏光ビーム（偏光子により直線的に偏光されたビーム）をＥＯ変調器（偏光変調器、電気光学変調器）によって連続的に変調し、この連続的に偏光を変調した偏光ビームを分けて、一方をサンプルに照射し、その反射光を得ると共に、他方を参照光として、両者のスペクトル干渉によりＯＣＴ計測を行い、このスペクトル干渉成分のうち、垂直偏光成分と水平偏光成分を同時に２つの光検出器で測定することにより、サンプルの偏光特性を表すジョーンズ行列を得ることが開示されている。
【０００７】
特許文献２には、偏光感受型ＯＣＴで計測したリターデーションについての位相差の分布に対して、モンテカルロシミュレーションでノイズの特性を解析することによって得られた分布変換関数を用いて対称な位相差の分布のデータに変換することにより系統的な誤差を除去し、ノイズに埋もれた真の位相差を推測し、偏光感受型ＯＣＴによる画像をより鮮明に補正する方法が開示されている。
【０００８】
特許文献３および非特許文献１には、偏光感受型ＯＣＴで計測した偏光状態をストークスベクトルで表し、ストークスベクトルから偏光均一度（degree of polarization uniformity）を求め、それを網膜色素上皮層の検出に用いる方法が開示されている。
【０００９】
非特許文献２には、偏光感受型ＯＣＴの測定値から求めた偏光均一度はノイズによるバイアスの影響を受けることが開示されている。さらに、ストークスベクトルに補正項を導入することにより、偏光均一度のバイアスを除去する方法が開示されている。
【００１０】
非特許文献３には、偏光感受型ＯＣＴの測定値から求めた偏光均一度は入射偏光状態に依存することが示されており、入射偏光状態に依存しないパラメーターとして偏光解消指数（depolarization index）が開示されている。
【先行技術文献】
【特許文献】
【００１１】
【特許文献１】特許第４３４４８２９号公報
【特許文献２】特開２０１３－０１９７７３号公報

【特許文献３】ＷＯ２０１０／１２２１１８
【非特許文献】
【００１２】
【非特許文献１】“Retinal pigment epithelium segmentation by polarization sensitive optical coherence tomography” ＯＰＴＩＣＳ ＥＸＰＲＥＳＳ，ＶＯＬ．１６，Ｎｏ．２１，２００８，ｐ１６４１６－１６４２８
【非特許文献２】“Degree of polarization uniformity with high noise immunity using polarization-sensitive optical coherence tomography” ＯＰＴＩＣＳ ＬＥＴＴＥＲＳ，ＶＯＬ．３９，Ｎｏ．２４，２０１４，ｐ６７８３－６７８６
【非特許文献３】“Degree of polarization (uniformity) and depolarization index: unambiguous depolarization contrast for optical coherence tomography” ＯＰＴＩＣＳ ＬＥＴＴＥＲＳ，ＶＯＬ．４０，Ｎｏ．１７，２０１５，ｐ３９５４－３９５７
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【００１３】
非特許文献２においては、偏光感受型ＯＣＴで取得されるジョーンズベクトルをストークスベクトルに変換し、ストークスベクトルへノイズ強度から算出した補正項を導入することによりストークスベクトルのバイアスを除去し、それにより偏光均一度のバイアスも除去する方法が開示されている。しかし、非特許文献３に開示されているように、偏光均一度はバイアスの有無とは無関係に、入射偏光状態に依存するという欠点がある。
【００１４】
非特許文献２においては、直交する２つの入射偏光状態に対応する偏光均一度を求め、それらをＯＣＴ信号強度で重み付け加算する手法も開示されている。しかし、その手法が入射偏光状態への依存性を解消するかどうかについては議論されておらず、また数学的根拠も示されていない。
【００１５】
非特許文献３においては、偏光感受型ＯＣＴで取得されるミューラー行列から偏光解消指数を求めることにより、入射偏光状態に依存せず偏光の均一性または偏光解消の度合いを評価できることが開示されている。しかしながら、偏光解消指数に対しノイズが与えるバイアス効果については議論されておらず、バイアスを補正する方法については未解決の状態である。
【００１６】
本発明は、上記の課題を解決するため、フォンノイマンエントロピーに着目する。偏光解消指数と同様に、フォンノイマンエントロピーを用いて、入射偏光状態に依存せず対象物の偏光特性の乱雑さを表し、ノイズによって発生するフォンノイマンエントロピーのバイアスの補正又は／及びサンプル数が小さいときに発生するフォンノイマンエントロピーのバイアスの緩和を実施可能な光断層画像撮影装置を提供する。
【課題を解決するための手段】
【００１７】
上記目的を達成するために、本発明は、光干渉を用いて対象物の断層画像を取得する光断層画像撮影装置であって、少なくとも１つの光に対応する干渉信号のノイズ成分及び信号強度を用いてノイズ成分のフォンノイマンエントロピーを推定することを特徴とする。
【００１８】
また、本発明の請求項２に記載の発明は、請求項１にかかる光断層画像撮影装置であって、さらに、測定された信号のフォンノイマンエントロピーからノイズ成分を除去するステップと、測定対象の偏光特性を示すフォンノイマンエントロピーのみを算出するステップを備えることを特徴とする。
【００１９】
また、本発明は、光干渉を用いて対象物の断層画像を取得する光断層画像撮影装置であって、共分散行列のアンサンブル平均のサンプル数が十分でない場合に発生する固有値の過

小推定を補正するステップと、前記補正した固有値を用いてフォンノイマンエントロピーを算出するステップを備えることを特徴とする。

【００２０】

また、本発明は、光干渉を用いて対象物の断層画像を取得する光断層画像撮影装置であって、測定したジョーンズ行列に対して移動平均処理を行うステップと、移動平均処理を行ったジョーンズ行列の共分散行列に対して移動平均処理を行うステップと、固有値分解によってジョーンズ行列を推定するステップを備えることを特徴とする。

【００２１】

また、本発明は、光干渉を用いて対象物の断層画像を取得する光断層画像撮影装置であって、少なくとも２つ以上の生体組織又は／及び非生物物質についてそれぞれ偏光特性を表す共分散行列を算出するステップと、教師あり学習又は教師なし学習により生体組織又は／及び非生物物質をセグメンテーションするステップを備えることを特徴とする。

【００２２】

また、本発明は、光干渉を用いて対象物の断層画像を取得する光断層画像撮影装置であって、少なくとも２つ以上の生体組織又は／及び非生物物質についてそれぞれ偏光特性を表す共分散行列を算出するステップと、教師あり学習又は教師なし学習により生体組織又は／及び非生物物質を分類するステップを備えることを特徴とする。

【００２３】

また、本発明は、光干渉を用いて対象物の断層画像を取得する光断層画像撮影装置であって、少なくとも２つ以上の生体組織又は／及び非生物物質についてそれぞれ偏光特性を表す共分散行列を算出するステップと、共分散行列を分解して得られるジョーンズ行列又は／及びその固有値から位相遅延量、複屈折軸、フォンノイマンエントロピー、ディアテニュエーションのうち少なくとも１つを算出するステップと、前記算出結果のうち少なくとも１つのパラメーターを用いて教師あり学習又は教師なし学習により生体組織又は／及び非生物物質をセグメンテーションするステップを備えることを特徴とする。

【００２４】

また、本発明は、光干渉を用いて対象物の断層画像を取得する光断層画像撮影装置であって、少なくとも２つ以上の生体組織又は／及び非生物物質についてそれぞれ偏光特性を表す共分散行列を算出するステップと、共分散行列を分解して得られるジョーンズ行列又は／及びその固有値から位相遅延量、複屈折軸、フォンノイマンエントロピー、ディアテニュエーションのうち少なくとも１つを算出するステップと、前記算出結果のうち少なくとも１つのパラメーターを用いて教師あり学習又は教師なし学習により生体組織又は／及び非生物物質を分類するステップを備えることを特徴とする。

【００２５】

また、本発明は、光干渉を用いて対象物の断層画像を取得する光断層画像撮影装置であって、少なくとも２つ以上の生体組織又は／及び非生物物質についてそれぞれ偏光特性を表す共分散行列を算出するステップと、共分散行列を分解して得られるジョーンズ行列又は／及びその固有値から位相遅延量、複屈折軸、フォンノイマンエントロピー、ディアテニュエーションのうち少なくとも１つを算出するステップと、前記算出結果のうち少なくとも１つのパラメーターに加えて共分散行列を用いて教師あり学習又は教師なし学習により生体組織又は／及び非生物物質をセグメンテーションするステップを備えることを特徴とする。

【００２６】

また、本発明は、光干渉を用いて対象物の断層画像を取得する光断層画像撮影装置であって、少なくとも２つ以上の生体組織又は／及び非生物物質についてそれぞれ偏光特性を表す共分散行列を算出するステップと、共分散行列を分解して得られるジョーンズ行列又は／及びその固有値から位相遅延量、複屈折軸、フォンノイマンエントロピー、ディアテニュエーションのうち少なくとも１つを算出するステップと、前記算出結果のうち少なくとも１つのパラメーターに加えて共分散行列を用いて教師あり学習又は教師なし学習により生体組織又は／及び非生物物質を分類するステップを備えることを特徴とする。

【００２７】
また、本発明に係る補正処理は、Cloude-Pottier分解に基づいて実施される。つまり、取得された被検物の偏光特性を表すジョーンズ行列を、例えば、パウリ行列や辞書式順序行列などの完備な基底を用いてベクトル化する。そして、ベクトル化した後、例えば、４×４のコヒーレンシー行列又は／及び共分散行列に拡張する。拡張した４×４のコヒーレンシー行列又は／及び共分散行列を、対角化して固有値展開し、固有値及び固有値ベクトルを求める。ここで、求めた固有値からフォンノイマンエントロピーを求めることができる。
【発明の効果】
【００２８】
上記のように、本発明にかかる光断層画像撮影装置は、フォンノイマンエントロピーを用いることにより、入射偏光状態に依存せず対象物の偏光特性の乱雑さを表し、ノイズによって発生するフォンノイマンエントロピーのバイアスの補正を行うことができる。
【図面の簡単な説明】
【００２９】
【図１】本発明に係る光断層画像撮影装置の光学系の概略構成図である。
【図２】本発明に係る光断層画像撮影装置の構成を示した図である。
【図３】３次元断層像の取得までのフローを説明する図である。
【図４】本発明に係る期待値を求める処理のフローチャートを示した図である。
【図５】本発明に係る試験例１の試験結果を示す図である。
【図６】本発明に係る試験例２の試験結果を示す図である。
【図７】本発明に係る試験例３の試験結果を示す図である。
【図８】本発明に係る試験例４の試験結果を示す図である。
【図９】本発明に係る試験例５の試験結果を示す図である。
【図１０】本発明に係る光断層画像撮影装置の光学系の変形例の概略構成図である。
【発明を実施するための形態】
【実施例】
【００３０】
以下、本発明の一実施例に係る光断層画像撮影装置について図面を参照して説明する。図１には断層画像取得部１００の詳細構成を示す。
【００３１】
図１に示すように、断層画像取得部１００ではサンプル（被検査物）１１７に測定光を照射することにより、サンプル１１７の２次元又は／及び３次元断層画像を撮影する。本実施形態では、時間的に波長を変化させて走査する波長走査光源１０１を用いたフーリエドメイン（光周波数掃引）方式が採用されている。
【００３２】
即ち、波長掃引光源１０１から出力された光は、光ファイバを通してファイバーカプラ１０２に入力され、このファイバーカプラ１０２において、例えば５：９５の比率で、参照光と測定光とに分波されて各々参照アーム１６０及びサンプルアーム１５０へ出力される。そのうち参照アーム１６０に出力された参照光は、光ファイバを通って光サーキュレーター１２０に入力後、コリメータレンズ１２１に入力され、参照ミラー１２２へ入射される。参照ミラー１２２はサンプルの表面位置に参照光路を合わせる光路長調整のため光路軸上で移動制御可能であり、ＯＣＴ断層像を測定する前に、測定光路長と参照光路長を合わせる。
【００３３】
そして、参照ミラー１２２で反射された参照光はコリメータレンズ１２１から光ファイバを通り光サーキュレーター１２０で光路が変更され、偏光コントローラ１１９を通り、コリメータレンズ１２３に入力し偏光感受型検出アーム１３６に入力される。
【００３４】
一方、前記ファイバーカプラ１０２からサンプルアーム１５０に出力された測定光は、光

ファイバを通って偏光コントローラ１０３を介して偏波依存ディレイライン１３３のコリメータレンズ１０４に入力後、偏光子１０５を通る。本実施例では偏光子１０５の偏光角度は４５度に設定してある。さらに、偏光コントローラ１０３を通過しコリメータレンズ１０４に入力する直前の偏光角度も４５度に制御され、４５度に偏光された測定光が効率よく取り出せるように、偏光コントローラ１０３及び偏光子１０５が調整及び制御されている。

【００３５】

４５度に偏光された測定光は偏波依存ディレイライン１３３内の偏光ビームスプリッター１０６を通すことにより互いに直交する２つの直線偏光状態（垂直方向及び水平方向）の光に分割される。分割された測定光は各々異なる全反射プリズム１０７及び１０８で反射され、２つの異なる光路で伝播させる。ここで、全反射プリズム１０７及び１０８の少なくとも１つの全反射プリズムを移動制御することにより、２つの異なる偏光状態（垂直方向及び水平方向）の間の遅延を生じさせる。

【００３６】

ここで、入射測定光を偏光ビームスプリッター１０６の中心から一定距離外れた位置に入射するように設定することにより、偏光ビームスプリッター１０６により２つの異なる偏光状態の光を生成し、各々異なる全反射プリズム１０７及び１０８で反射され、一定の遅延を持つ２つの異なる偏光状態（垂直方向及び水平方向）の測定光が生成され、反射ミラー１１０で光路を変えた後、コリメータレンズ１０９により光ファイバ接続される。

【００３７】

光ファイバを通った測定光は、偏光コントローラ１１１を通った後、光サーキュレーター１１２で光路が変更され、コリメータレンズ１１３に入射後、ガルバノミラー１１４及び１１５で反射し、レンズ１１６により集光して、サンプル１１７へ入射する。

【００３８】

ガルバノミラー１１４及び１１５は、測定光を走査させるためのもので、ガルバノミラー１１４及び１１５を制御することにより、測定光をサンプル１１７の表面において水平方向及び垂直方向に走査されるようになっている。これにより、サンプル１１７の２次元の断層画像や３次元の断層画像が取得できるのである。

【００３９】

サンプル１１７で反射された測定光は、上記とは逆にレンズ１１６、ガルバノミラー１１５及び１１４を通り、コリメータレンズ１１３に入力される。そして、測定光は光ファイバを通って前記光サーキュレーター１１２で光路が変更され、偏光コントローラ１１８を通った後、コリメータレンズ１２５に入力し偏光感受型検出アーム１３６に入力される。

【００４０】

コリメータレンズ１２３から偏光感受型検出アーム１３６に入力し、偏光子１２４で偏光された参照光と、サンプル１１７で反射された測定光は無偏光ビームスプリッター１３２を用いて合成され、分割される。分割された光は、その後、コリメータレンズ１２６及び１２７に入力後、２つのインライン型の偏光ビームスプリッター１２８及び１２９によって２つの直交する偏光状態に分けられる。

【００４１】

ここで、インライン型の偏光ビームスプリッター１２８及び１２９後の参照光の垂直方向及び水平方向の直線偏光のパワーを等しくするために、偏光子１２４の偏光角度は４５度に調整すると共に、効率を上げるため、事前に通る偏光コントローラ１１９を用いて偏光子１２４へ入射する直前の偏光角度がほぼ４５度となるように制御されている。

【００４２】

２つの偏光状態の干渉は、２つのバランス型光検出器１３０及び１３１により検出される。検出された垂直方向及び水平方向の２つの偏光状態の干渉信号は図２に示す制御装置２００に設けられた演算部２０２において、各干渉信号に対するフーリエ変換などの処理が行われ、サンプル１１７のジョーンズ行列に対応して取得したＢスキャン画像又は／及びＣスキャン画像（ボリュームデータ）が取得される。取得された断層画像は記憶部２０３

に記憶される。

【００４３】

図４は、断層像取得部１００による断層像（Ｂスキャン像）を取得する様子を示したものである。図４（ａ）は被検眼Ｅの眼底網膜の一例を、図４（ｂ）は断層像取得部１００から取得して得られた眼底網膜４０１の複数の２次元断層像（Ｂスキャン像）の例を示している。そして、図４（ｃ）は本実施例にて生成された眼底部のＣスキャン像（３次元断層像、ボリュームデータとも言う）の例を示している。尚、図４（ａ）～（ｃ）のｘ軸はＢスキャンのスキャン方向を、ｙ軸はＣスキャンの方向を示す。更に、図４（ｂ）、（ｃ）のｚ軸はＡスキャン信号の奥行き方向、つまり眼底部の深さ方向を示す。

【００４４】

図４（ｂ）の４０４は取得した２次元断層像であり、ガルバノミラーユニット１０６をＸ方向にスキャンさせながら、演算部２０２がＡスキャン信号４０３を再構築して作成される。この２次元断層像がＢスキャン像であり、眼底網膜４０１に対する奥行き方向（Ｚ方向）と直交するＸ方向の２次元の断面、すなわち図４（ｂ）におけるｘ軸及びｚ軸で規定される平面における２次元断層像である。図４（ａ）の４０２は２次元断層像４０４の撮影位置を示す。

【００４５】

次に、サンプル１１７のジョーンズ行列に対応して取得したＢスキャンの画像又は／及びＣスキャン画像（ボリュームデータ画像）について、取得したジョーンズ行列の各要素の期待値を求める方法について、図３のフローチャートを用いて説明する。

【００４６】

まず、Ｓ１０で最初のピクセルを設定する。最初のピクセルは０番目のピクセルとするため、Ｓ１０ではｎ＝０と設定し、設定したピクセルをｎ番目のピクセルとする。

【００４７】

次に、Ｓ１２で、測定されたジョーンズ行列をベクトル化する。測定されたジョーンズ行列を、

【数１】

$$\mathbf{J}=\begin{bmatrix}\underline{E_1} & \underline{E_2}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}J_{1H} & J_{2H}\\ J_{1V} & J_{2V}\end{bmatrix}$$

と表すとき、行列の第一列と第二列はそれぞれ直交した入射偏光を用いて測定されたジョーンズベクトルであり、数１は、数２に示すような１×４対象ベクトルへ変換される。

【数２】

$$\underline{\kappa}=\frac{1}{2}\mathrm{Tr}(\mathbf{J\Psi})$$

ここで、Ｔｒ（ＪΨ）は行列ＪΨのトレースを示し、Ψは任意の完備な基底である。なお、すべての基底を用いて対象ベクトルを形成するものとする。

【００４８】

任意の完備な基底Ψの例としては、以下のパウリ行列基底や、

【数３】

$$\{\mathbf{\Psi}_P\}=\left\{\sqrt{2}\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\ \sqrt{2}\begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & -1\end{bmatrix}\ \sqrt{2}\begin{bmatrix}0 & 1\\ 1 & 0\end{bmatrix}\ \sqrt{2}\begin{bmatrix}0 & -j\\ j & 0\end{bmatrix}\right\}$$

以下の辞書式順序行列基底が挙げられる。

【数４】

$$\{\mathbf{\Psi}_L\}=\left\{2\begin{bmatrix}1 & 0\\ 0 & 0\end{bmatrix}\ 2\begin{bmatrix}0 & 1\\ 0 & 0\end{bmatrix}\ 2\begin{bmatrix}0 & 0\\ 1 & 0\end{bmatrix}\ 2\begin{bmatrix}0 & 0\\ 0 & 1\end{bmatrix}\right\}$$

完備な基底であれば、どのような基底であっても最終的な結果は等価である。辞書式順序行列基底を用いると対象ベクトルは、

【数５】

$$\underline{\boldsymbol{\kappa}_{\mathrm{L}}} = \begin{bmatrix} J_{1\mathrm{H}} & J_{2\mathrm{H}} & J_{1\mathrm{V}} & J_{2\mathrm{V}} \end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$$

と表される。ここで、Ｔはベクトルの転置を示す。

【００４９】

次に、Ｓ１４で、ベクトル化したジョーンズ行列を４×４のコヒーレンシー行列に拡張する。数２の対象ベクトルκは他変数複素ガウス分布で統計的にモデル化できる。対象ベクトルκの確率密度関数は、

【数６】

$$p(\underline{\boldsymbol{\kappa}}) = \frac{1}{\pi^{m}\det(\mathbf{C})}\exp\left(-\underline{\boldsymbol{\kappa}}^{\dagger}\mathbf{C}^{-1}\underline{\boldsymbol{\kappa}}\right)$$

で表される。ここで、ｄｅｔ（Ｃ）は行列Ｃの行列式を表し、ｍは対象ベクトル$\underline{\kappa}$の次元を表す。数５においてはｍ＝４である。上付き文字のダガーは転置共役を示す。行列Ｃは半正定値共分散行列で、

【数７】

$$\mathrm{C} = E\left\{\underline{\kappa\ \kappa^{\dagger}}\right\}$$

と定義される。ここで、Ｅ｛$\underline{\kappa\ \kappa^{\dagger}}$｝は行列$\underline{\kappa\ \kappa^{\dagger}}$の期待値を示す。行列Ｃは

【数８】

$$\mathbf{Z} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\underline{\boldsymbol{\kappa}}_{i}\,\underline{\boldsymbol{\kappa}}_{i}^{\dagger}$$

で推定できる。

【００５０】

ここで、数８は行列Ｃの最尤推定量である。また、ｎはサンプル数、κｉはｎ個のサンプル中ｉ番目の対象ベクトルを示す。数８は複素ウィシャート分布を持ち、その確率密度関数は

【数９】

$$p(\mathbf{Z}) = \frac{n^{mn}[\det(\mathbf{Z})]^{n-m}}{[\det(\mathbf{C})]^{n}\,\tilde{\Gamma}_{m}(n)}\exp\left[-n\,\mathrm{Tr}\left(\mathbf{C}^{-1}\mathbf{Z}\right)\right]$$

で表される。ここで、

【数１０】

$$\tilde{\Gamma}_{m}(n) = \pi^{m(m-1)/2}\prod_{i=1}^{m}\Gamma(n-i+1)$$

を用いた。なお、Γ（ｎ－ｉ＋１）はガンマ関数である。

【００５１】

本実施例では、辞書式順序行列基底を用いて、数８で定義されたＺを数１１に示す４×４の共分散行列Ｔに拡張する。

【数１１】

$$\mathbf{T} \equiv \overline{\underline{\kappa}_{\mathrm{L}} \underline{\kappa}_{\mathrm{L}}^{\dagger}} = \begin{bmatrix} \overline{|J_{1\mathrm{H}}|^2} & \overline{J_{1\mathrm{H}} J_{2\mathrm{H}}^*} & \overline{J_{1\mathrm{H}} J_{1\mathrm{V}}^*} & \overline{J_{1\mathrm{H}} J_{2\mathrm{V}}^*} \\ \overline{J_{2\mathrm{H}} J_{1\mathrm{H}}^*} & \overline{|J_{2\mathrm{H}}|^2} & \overline{J_{2\mathrm{H}} J_{1\mathrm{V}}^*} & \overline{J_{2\mathrm{H}} J_{2\mathrm{V}}^*} \\ \overline{J_{1\mathrm{V}} J_{1\mathrm{H}}^*} & \overline{J_{1\mathrm{V}} J_{2\mathrm{H}}^*} & \overline{|J_{1\mathrm{V}}|^2} & \overline{J_{1\mathrm{V}} J_{2\mathrm{V}}^*} \\ \overline{J_{2\mathrm{V}} J_{1\mathrm{H}}^*} & \overline{J_{2\mathrm{V}} J_{2\mathrm{H}}^*} & \overline{J_{2\mathrm{V}} J_{1\mathrm{V}}^*} & \overline{|J_{2\mathrm{V}}|^2} \end{bmatrix}$$

ここで、数１１において、上線はアンサンブル平均を表す。アンサンブル平均においては、関心領域内において測定対象が広義に静的かつエルゴード性を持つと仮定する。つまり、アンサンブル平均は空間的に適用してもよいし、時間的に適用してもよいし、空間と時間両方に適用してもよい。

【００５２】

数１１の定義から、ＣやＺと同様にＴも半正定値行列である。また、Ψとしてパウリ行列基底を用いた場合、共分散行列はミューラー行列と同じ形になる。そのため、後述する共分散行列と示している部分をミューラー行列で置き換えても議論が成立する。また、ＯＣＴにおいては各Ａスキャンのジョーンズベクトルとストークスベクトルは可換であるため、変換処理によりジョーンズベクトルの代わりにストークスベクトルを用いることも可能である。

【００５３】

次に、Ｓ１６で、拡張した４×４の共分散行列Ｔを対角化して分解する。Cloude-Pottier分解を用いると、４×４の共分散行列Ｔは行列対角化により以下の数１２のように分解される。

【数１２】

$$\mathbf{T} = \mathbf{U}\mathbf{A}\mathbf{U}^{\dagger}$$

$$\mathbf{A} = \mathrm{diag}[\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \lambda_4], \quad \lambda_1 \geq \lambda_2 \geq \lambda_3 \geq \lambda_4 \geq 0$$

$$\mathbf{U} = [\underline{e_1} \quad \underline{e_2} \quad \underline{e_3} \quad \underline{e_4}]$$

ここで、行列Ａは４つの固有値からなる対角行列である。行列Ｕは４つの１×４固有ベクトルで構成されるユニタリ行列である。固有値の不等式はＴが半正定値行列であることから導かれる。

【００５４】

Ｓ１８では、数１２の固有値を数１３に示すように規格化する。

【数１３】

$$\lambda_i' = \frac{\lambda_i}{\sum_j^4 \lambda_j}, \quad i = 1,2,3,4$$

ここで、数１３の規格化は０≦λ$_i$′≦１となるように定義され、規格化された固有値λ$_i$′は対応する固有ベクトル$\underline{e_i}$が多項確率過程に従って発生する確率とみなされる。

【００５５】

そして、Ｓ２０において、ジョーンズ行列各要素における、局所位相遅延量の期待値を求める。数４の辞書式順序行列基底を用いる場合、固有ベクトル$\underline{e_i}$の各要素を、

【数１４】

$$\underline{e_i} := [a_i \quad b_i \quad c_i \quad d_i]^{\mathrm{T}}$$

と置くと、固有ベクトル$\underline{e_i}$は数１５に示すジョーンズ行列Ｌ$_i$に変換することができる

。

【数１５】

$$\mathbf{L}_i = \begin{bmatrix} a_i & b_i \\ c_i & d_i \end{bmatrix}$$

【００５６】

上述のような、Cloude-Pottier分解によってＬ$_i$を求める手法は、数１の測定されたジョーンズ行列に対して適用できるが、数１は対象物で光が散乱又は／及び反射する前後の深さ方向に累積した全ての影響を含んでおり、対象物の局所的な偏光特性を示しているわけではない。この累積的性質は局所ジョーンズ行列を求めることにより解決されるため、数１の代わりに下記に示す数１６を局所ジョーンズ行列として用いる。数１６は測定値の波数依存性を補正したものである。

【数１６】

$$\hat{\mathbf{E}}'^{-1}_{sample}(z-\frac{\delta z}{2})\hat{\mathbf{E}}'_{sample}(z+\frac{\delta z}{2}) = \mathbf{J}'^{-1}_{in}\mathbf{U}_s^{-1}(z)\begin{bmatrix} \lambda_1(\delta z)\big|_z & 0 \\ 0 & \lambda_2(\delta z)\big|_z \end{bmatrix}\mathbf{U}_s(z)\mathbf{J}'_{in}$$

ここで、Ｅ’$_{sample}$（Ｅの上部に＾が付与）は波数依存性を補正した測定されたジョーンズ行列を表し、深さｚを中心として深さ方向にδｚだけ離した２つのジョーンズ行列を用いている。また、Ｕ$_S$（ｚ）は深さｚにおける対象物の累積的な複屈折光学軸を示すジョーンズ行列であり、λ$_1$（δｚ）｜$_z$とλ$_2$（δｚ）｜$_z$は深さｚにおける深さ範囲δｚの局所ジョーンズ行列の2つの固有値である。また、Ｊｉｎ’はファイバー入射光学系からサンプル表面までの偏光特性を示すジョーンズ行列である。

【００５７】

２つの多変数ガウス分布の積も多変数ガウス分布となるため、上述した統計的記述は局所ジョーンズ行列についても同様に当てはまる。局所ジョーンズ行列の場合、数１７のような重み付けを行う。

【数１７】

$$\frac{\sqrt{\left\|\hat{\mathbf{E}}'_{sample}(z-\frac{\delta z}{2})\right\|_2\left\|\hat{\mathbf{E}}'_{sample}(z+\frac{\delta z}{2})\right\|_2}}{\left\|\hat{\mathbf{E}}'^{-1}_{sample}(z-\frac{\delta z}{2})\hat{\mathbf{E}}'_{sample}(z+\frac{\delta z}{2})\right\|_2}\hat{\mathbf{E}}'^{-1}_{sample}(z-\frac{\delta z}{2})\hat{\mathbf{E}}'_{sample}(z+\frac{\delta z}{2})$$

‖Ｘ‖$_2$で表される値は行列Ｘの作用素ノルムを示す。数１７の重み付けを適用後、局所ジョーンズ行列を推定するために数１１で示したアンサンブル平均を行い、Cloude-Pottier分解を用いると、局所ジョーンズ行列の数１５が得られる。数１５に示されたＬ$_i$の局所位相遅延量は以下の数１８のように示される。

【数１８】

$$R_i = \arg(\xi_1^{(i)}\xi_2^{(i)*})$$

ここで、ξ$_1$$^{(i)}$とξ$_2$$^{(i)}$はＬｉの固有値、ａｒｇ（Ｘ）は複素数Ｘの偏角を示す。

【００５８】

関心領域内で対象物がある一つの主要な光散乱メカニズムを持つと仮定すると、最も大きい固有値に対応するＬ$_1$とＲ$_1$はその主要な光散乱メカニズムの局所ジョーンズ行列と局所位相遅延量であるとそれぞれ見なされる。さらに、対象物の測定が多項確率過程でモデル化される場合は、局所位相遅延量の期待値は以下の数１９で求めることができる。

【数１９】

$$E(R)=\sum_i \lambda_i' R_i$$

【００５９】

さらに、Ｌ$_i$の複屈折軸はＬ$_i$の固有値ξ$_1^{(i)}$に対応するＬ$_i$の固有ベクトルから導出される。固有ベクトルはストークスベクトルに変換され、複屈折軸の相対角を求めることができる。

【００６０】

上述のように、Ｓ２０でｎ番目のピクセルのジョーンズ行列の各要素における局所位相遅延量の期待値を求めたら、Ｓ２２でｎ＝ｎ＋１として次のピクセルに対してＳ１２～Ｓ２０の処理を実施して、同様にジョーンズ行列の各要素における局所位相遅延量の期待値を求める。

【００６１】

Ｓ２４で、すべてのピクセルについてジョーンズ行列の各要素における局所位相遅延量の期待値を求めたら（ｎ＞ｎ（Ｆｉｎａｌ））、一連の処理は終了する。上述のように、ジョーンズ行列の各要素における局所位相遅延量の期待値を求め、その値を用いることにより、ジョーンズ行列の各要素は適切に推定されて、良好な定量解析が可能になる。

【００６２】

また、関心領域におけるジョーンズ行列の乱雑さを示すための指標として、フォンノイマンエントロピーを以下のように定義できる。一般に、数２０の対数の底をどのような値に定義してもよく、本実施例では、０≦Ｈ≦１となるように対数の底をｍ＝４に設定した。Ｈ＝０のとき、対象物は完全に均一なジョーンズ行列を持つ。Ｈ＝１のとき、対象物は完全にランダムなジョーンズ行列を持つ。実際には、計測されたフォンノイマンエントロピーは両者間のどこかに値を持つ。

【数２０】

$$H=\sum_i -\lambda_i' \log_4 \lambda_i'$$

フォンノイマンエントロピーにより、例えば対象物がある空間内で持つ複屈折の乱雑さを求めることができる。これにより、例えば網膜色素上皮や虹彩色素上皮、ぶどう膜のメラニン色素量に由来する偏光解消効果を評価し、組織内の複屈折分布の乱雑さを評価できる。

【００６３】

ここで、フォンノイマンエントロピーは測定されたジョーンズ行列の乱雑さを表すパラメーターであるため、対象物の偏光特性だけではなくノイズの影響も含んでいる。信号対雑音比（ＳＮＲ）が低い場合、フォンノイマンエントロピーに対するノイズによるバイアスが高くなるため、対象物の偏光特性を定量評価することが難しくなる。以上を受け、次に、ノイズによるフォンノイマンエントロピーのバイアスを除去する方法について説明する。

【００６４】

まず、数１に示される局所化されていない累積的なジョーンズ行列から求められたフォンノイマンエントロピーに対するバイアス補正方法について以下に述べる。

【００６５】

ランダムノイズと対象物の偏光特性は独立であるから、数２１が成り立つ。Ｈ$_{measured}$、Ｈ$_{subject}$、Ｈ$_{noise}$はそれぞれ測定されたジョーンズ行列、対象物、ノイズのフォンノイマンエントロピーを表す。ここで、Ｈ$_{noise}$をＨ$_{measured}$から除去する方法を考える。

【数２１】

$$H_{\mathrm{measured}} = H_{\mathrm{subject}} + H_{\mathrm{noise}}$$

【００６６】

４×４共分散行列は数１の$\underline{E_1}$と$\underline{E_2}$に関係した２つの部分空間に分割することができる。フォンノイマンエントロピーはそれら部分空間と数２２に示すような部分加法性と呼ばれる関係がある。

【数２２】

$$H_{noise}\left(\underline{E_1},\underline{E_2}\right) \leq H_{noise}\left(\underline{E_1}\right) + H_{noise}\left(\underline{E_2}\right)$$

ここで、$H_{noise}(\underline{E_1})$と$H_{noise}(\underline{E_2})$は部分空間のフォンノイマンエントロピーで、$H_{noise}(\underline{E_1}, \underline{E_2})$は全体のフォンノイマンエントロピーを$\underline{E_1}$と$\underline{E_2}$の結合エントロピーとして明示的に表記したものである。

【００６７】

$\underline{E_1}$と$\underline{E_2}$の部分空間のノイズは互いに独立であると仮定すると、数２２は数２３に示すような等号が成り立つ。

【数２３】

$$H_{noise}\left(\underline{E_1},\underline{E_2}\right) = H_{noise}\left(\underline{E_1}\right) + H_{noise}\left(\underline{E_2}\right)$$

数２３は４×４共分散行列のノイズのフォンノイマンエントロピーが各部分空間（２×２共分散行列）のノイズのフォンノイマンエントロピーの和から導出されることを示している。

【００６８】

また、$H_{noise}(\underline{E_1})$と$H_{noise}(\underline{E_2})$は共分散行列の固有値から、数２４のように求められる。

【数２４】

$$H_{noise}\left(\underline{E_i}\right) = \sum_{j=1}^{2} -\lambda_j^{(i)} \log_4\left(\lambda_j^{(i)}\right)$$

ここで、$\lambda_j^{(i)}$は$\underline{E_i}$で構成される部分空間のｊ番目の固有値である。その固有値は、偏光度（ＤＯＰ：degree of polarization）又は偏光均一度（ＤＯＰＵ：degree of polarization uniformity）と数２５で示す関係がある。

【数２５】

$$\lambda_j^{(i)} = \frac{1 \pm P^{(i)}}{2}$$

$P^{(i)}$は$\underline{E_i}$で構成される部分空間のＤＯＰＵを示す。以上から、数２５のＤＯＰＵとノイズの関係が分かれば$H_{noise}(\underline{E_1}, \underline{E_2})$も導出できることが分かる。

【００６９】

測定されたジョーンズ行列は各行列要素において独立した複素加法性ホワイトガウスノイズを持つとすると、測定されたジョーンズ行列は数２６のように示される。

【数２６】

$$\mathbf{J}_{\mathrm{measured}} = \left[\underline{E_1} + \underline{n_1} \quad \underline{E_2} + \underline{n_2}\right] = \begin{bmatrix} E_{1\mathrm{H}} + n_{1\mathrm{H}} & E_{2\mathrm{H}} + n_{2\mathrm{H}} \\ E_{1\mathrm{V}} + n_{1\mathrm{V}} & E_{2\mathrm{V}} + n_{2\mathrm{V}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} g_{1\mathrm{H}} & g_{2\mathrm{H}} \\ g_{1\mathrm{V}} & g_{2\mathrm{V}} \end{bmatrix}$$

数２６が深さ方向に累積したジョーンズ行列であることに注意すると、数２６の［g_{1H} g_{1V}］^{T}を変換してできるストークスパラメーターは数２７のように定義される。

【数２７】

$$\begin{bmatrix} s_0^{(1)} \\ s_1^{(1)} \\ s_2^{(1)} \\ s_3^{(1)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |g_{1H}|^2 + |g_{1V}|^2 \\ |g_{1H}|^2 - |g_{1V}|^2 \\ 2\mathrm{Re}\left[g_{1H} g_{1V}^*\right] \\ 2\mathrm{Im}\left[g_{1H} g_{1V}^*\right] \end{bmatrix}$$

また、数２７と同様にして［ｇ２Ｈｇ２Ｖ］Ｔのストークスパラメーターも定義される。

【００７０】

ここで、ノイズ成分を含まないストークスパラメーターは数２８で示される。

【数２８】

$$\begin{bmatrix} s_0'^{(1)} \\ s_1'^{(1)} \\ s_2'^{(1)} \\ s_3'^{(1)} \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} |E_{1H}|^2 + |E_{1V}|^2 \\ |E_{1H}|^2 - |E_{1V}|^2 \\ 2\mathrm{Re}\left[E_{1H} E_{1V}^*\right] \\ 2\mathrm{Im}\left[E_{1H} E_{1V}^*\right] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |E_{1H}|^2 + |E_{1V}|^2 \\ |E_{1H}|^2 - |E_{1V}|^2 \\ 2|E_{1H}||E_{1V}|\cos\delta \\ 2|E_{1H}||E_{1V}|\sin\delta \end{bmatrix}$$

δ＝ａｒｇ［Ｅ１ＨＥ１Ｖ＊］であり、δは対象物の信号強度ではなく偏光特性に影響される。また、δは最終的にＰ（ｉ）の計算過程でキャンセルされるため、δは未知の状態でもよい。

【００７１】

次に、信号振幅がノイズ振幅よりも十分大きいと仮定し、アンサンブル平均された信号強度を用いたストークスパラメーターを数２９のように定義すると、信号強度とノイズ強度の間の相対関係によって発生するバイアスを示すＤＯＰＵは数３０で求められる。

【数２９】

$$\begin{bmatrix} s_0''^{(1)} \\ s_1''^{(1)} \\ s_2''^{(1)} \\ s_3''^{(1)} \end{bmatrix} := \begin{bmatrix} \overline{|g_{1H}|^2} + \overline{|g_{1V}|^2} \\ \overline{|g_{1H}|^2} - \overline{|g_{1V}|^2} \\ 2\mathrm{Re}\left[\overline{g_{1H} g_{1V}^*}\right] \\ 2\mathrm{Im}\left[\overline{g_{1H} g_{1V}^*}\right] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{|g_{1H}|^2} + \overline{|g_{1V}|^2} \\ \overline{|g_{1H}|^2} - \overline{|g_{1V}|^2} \\ 2\mathrm{Re}\left[\overline{E_{1H} E_{1V}^*}\right] \\ 2\mathrm{Im}\left[\overline{E_{1H} E_{1V}^*}\right] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{|g_{1H}|^2} + \overline{|g_{1V}|^2} \\ \overline{|g_{1H}|^2} - \overline{|g_{1V}|^2} \\ 2\overline{|E_{1H}||E_{1V}|}\cos\delta \\ 2\overline{|E_{1H}||E_{1V}|}\sin\delta \end{bmatrix}$$

$$= \begin{bmatrix} \overline{|g_{1H}|^2} + \overline{|g_{1V}|^2} \\ \overline{|g_{1H}|^2} - \overline{|g_{1V}|^2} \\ 2\sqrt{\overline{|g_{1H}|^2} - \overline{|n_{1H}|^2}}\sqrt{\overline{|g_{1V}|^2} - \overline{|n_{1V}|^2}}\cos\delta \\ 2\sqrt{\overline{|g_{1H}|^2} - \overline{|n_{1H}|^2}}\sqrt{\overline{|g_{1V}|^2} - \overline{|n_{1V}|^2}}\sin\delta \end{bmatrix}$$

【数３０】

$$P^{(1)}=\frac{\sqrt{\left\{s_1''^{(1)}\right\}^2+\left\{s_2''^{(1)}\right\}^2+\left\{s_3''^{(1)}\right\}^2}}{s_0''^{(1)}}$$
$$=\frac{\sqrt{\left(\overline{|g_{1H}|^2}-\overline{|g_{1V}|^2}\right)^2+4\left(\overline{|g_{1H}|^2}-\overline{|n_{1H}|^2}\right)\left(\overline{|g_{1V}|^2}-\overline{|n_{1V}|^2}\right)}}{\overline{|g_{1H}|^2}+\overline{|g_{1V}|^2}}$$

また、数３０と同様にしてＰ（２）も定義される。数３０はアンサンブル平均されたストークスパラメーターではなく、アンサンブル平均された信号強度を用いている。なお、数３０の分子の平方根内の第２項において積の各因子が負の値を持つと、Ｐ（１）が０から１の間の定義域から外れる可能性がある。そのため、数３０の分子の平方根内の第２項において積の各因子が負の値を持つ場合、その因子を０に置き換えてから数３０を計算してもよい。

【００７２】

以上より、数２３～２５、２９、３０を用いて、H_{noise}が信号強度とノイズ強度から求められる。これにより、$H_{measured}$からH_{noise}を除去することが可能となる。

【００７３】

上述したフォンノイマンエントロピーのバイアス成分導出は、深さ方向に累積したジョーンズ行列について述べたものである。しかしこの場合、関心領域が深さ方向を含む空間的に設定されるとき、結果としてＤＯＰＵとフォンノイマンエントロピーは深さ方向にジョーンズ行列を急速に変化させる強い複屈折によるアーティファクトを持つ可能性がある。そのため、次に、局所ジョーンズ行列のノイズ成分のフォンノイマンエントロピーH_{noise}を導出する方法を以下に述べる。

【００７４】

局所ジョーンズ行列を求めるために、深さｚを中心として深さ方向に長さδ_Zだけ離れた２つの累積したジョーンズ行列を用いる。これは前述した数１６や数１７で既に示しており、数１６や数１７と同じ表記法を用いると行列の全要素は数３１で示される。

【数３１】

$$\hat{\mathbf{E}}'_{sample}\left(z+\frac{\delta z}{2}\right)=\begin{bmatrix}a & b\\ c & d\end{bmatrix},\quad \hat{\mathbf{E}}'_{sample}\left(z-\frac{\delta z}{2}\right)=\begin{bmatrix}e & f\\ g & h\end{bmatrix}$$

これにより、局所ジョーンズ行列は数３２のように導出される。

【数３２】

$$\hat{\mathbf{E}}'^{-1}_{sample}\left(z-\frac{\delta z}{2}\right)\hat{\mathbf{E}}'_{sample}\left(z+\frac{\delta z}{2}\right)=\left[\det\left(\hat{\mathbf{E}}'_{sample}\left(z-\frac{\delta z}{2}\right)\right)\right]^{-1}\begin{bmatrix}ha-fc & hb-fd\\ -ga+ec & -gb+ed\end{bmatrix}$$

ここで、数３２の右辺の行列式は行列各要素のノイズフロアを歪ませる効果があり、フォンノイマンエントロピーの推定を複雑にするため、数３２の代わりに数３３を用いる。

【数３３】

$$\det\left(\hat{\mathbf{E}}'^{-1}_{sample}\left(z-\frac{\delta z}{2}\right)\right)\hat{\mathbf{E}}'^{-1}_{sample}\left(z-\frac{\delta z}{2}\right)\hat{\mathbf{E}}'_{sample}\left(z+\frac{\delta z}{2}\right)=\begin{bmatrix}ha-fc & hb-fd\\ -ga+ec & -gb+ed\end{bmatrix}$$
$$\equiv\left[\underline{\varepsilon_1}\quad\underline{\varepsilon_2}\right]=\begin{bmatrix}\varepsilon_{1H} & \varepsilon_{2H}\\ \varepsilon_{1V} & \varepsilon_{2V}\end{bmatrix}$$

【００７５】

局所ジョーンズ行列のノイズ成分のフォンノイマンエントロピーH_{noise}を求める方

法として、数２６の代わりに数３３を用い、数３０で示したＰ（１）及び同様に求められるＰ（２）の導出方法と同じ手順を踏む方法が考えられる。しかしながら、数３３の第１列と第２列の列ベクトルは依存しているため、数３３は数２６とは異なり数２３で示されるような加法性を満たさないという問題がある。このとき、数２３は数３４のように修正される。

【数３４】

$$H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_1},\underline{\varepsilon_2}\right)=H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_1}\right)+H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_2}\right)-H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_1}:\underline{\varepsilon_2}\right)$$

右辺の第３項は$\underline{\varepsilon_1}$と$\underline{\varepsilon_2}$の相互情報量である。

【００７６】

ここで、数３４は条件付きフォンノイマンエントロピーを用いて数３５のように変形することができる。

【数３５】

$$\begin{aligned}H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_1}:\underline{\varepsilon_2}\right)&=H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_1}\right)-H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_1}\mid\underline{\varepsilon_2}\right)\\&=H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_2}\right)-H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_2}\mid\underline{\varepsilon_1}\right)\end{aligned}$$

Ｈ（Ｙ｜Ｘ）はＸという条件付きのＹのフォンノイマンエントロピーを表す。

【００７７】

以上から、結合エントロピーは、数３４と数３５を用いて数３６のように表される。

【数３６】

$$\begin{aligned}H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_1},\underline{\varepsilon_2}\right)&=H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_2}\right)+H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_1}\mid\underline{\varepsilon_2}\right)\\&=H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_1}\right)+H_{noise}\left(\underline{\varepsilon_2}\mid\underline{\varepsilon_1}\right)\end{aligned}$$

【００７８】

ここで、数３６を計算するためには数３３の行列各要素の分散が必要となる。行列各要素を強い一定フェーザーの信号成分と弱いランダムフェーザーの信号成分との和としてモデル化し仮定すると、分散は以下の数３７～数４０のように求められる。

【数３７】

$$\begin{aligned}\mathrm{Var}(\varepsilon_{1\mathrm{H}})=\mathrm{Var}(ha-fc)&=\mathrm{Var}(h)\,\mathrm{Var}(a)+\mathrm{Var}(h)\{\mathrm{E}(a)\}^2+\{\mathrm{E}(h)\}^2\,\mathrm{Var}(a)\\&\quad+\mathrm{Var}(f)\,\mathrm{Var}(c)+\mathrm{Var}(f)\{\mathrm{E}(c)\}^2+\{\mathrm{E}(f)\}^2\,\mathrm{Var}(c)\end{aligned}$$

【数３８】

$$\begin{aligned}\mathrm{Var}(\varepsilon_{1\mathrm{V}})=\mathrm{Var}(-ga+ec)&=\mathrm{Var}(g)\,\mathrm{Var}(a)+\mathrm{Var}(g)\{\mathrm{E}(a)\}^2+\{\mathrm{E}(g)\}^2\,\mathrm{Var}(a)\\&\quad+\mathrm{Var}(e)\,\mathrm{Var}(c)+\mathrm{Var}(e)\{\mathrm{E}(c)\}^2+\{\mathrm{E}(e)\}^2\,\mathrm{Var}(c)\end{aligned}$$

【数３９】

$$\begin{aligned}\mathrm{Var}(\varepsilon_{2\mathrm{H}})=\mathrm{Var}(hb-fd)&=\mathrm{Var}(h)\,\mathrm{Var}(b)+\mathrm{Var}(h)\{\mathrm{E}(b)\}^2+\{\mathrm{E}(h)\}^2\,\mathrm{Var}(b)\\&\quad+\mathrm{Var}(f)\,\mathrm{Var}(d)+\mathrm{Var}(f)\{\mathrm{E}(d)\}^2+\{\mathrm{E}(f)\}^2\,\mathrm{Var}(d)\end{aligned}$$

【数４０】

$$\begin{aligned}\mathrm{Var}(\varepsilon_{2\mathrm{V}})=\mathrm{Var}(-gb+ed)&=\mathrm{Var}(g)\,\mathrm{Var}(b)+\mathrm{Var}(g)\{\mathrm{E}(b)\}^2+\{\mathrm{E}(g)\}^2\,\mathrm{Var}(b)\\&\quad+\mathrm{Var}(e)\,\mathrm{Var}(d)+\mathrm{Var}(e)\{\mathrm{E}(d)\}^2+\{\mathrm{E}(e)\}^2\,\mathrm{Var}(d)\end{aligned}$$

数３７～数４０において、Ｖａｒ（Ｘ）とＥ（Ｘ）はそれぞれＸの分散と期待値を表す。

【００７９】

次に、数３６を求めるために必要な条件付き分散は、以下に示す数４１～数４４のように求められる。

【数４１】

$$\mathrm{Var}(\varepsilon_{1\mathrm{H}} \mid \underline{\varepsilon_2}) = \{\mathrm{E}(h)\}^2\,\mathrm{Var}(a) + \{\mathrm{E}(f)\}^2\,\mathrm{Var}(c)$$

【数４２】

$$\mathrm{Var}(\varepsilon_{1\mathrm{V}} \mid \underline{\varepsilon_2}) = \{\mathrm{E}(g)\}^2\,\mathrm{Var}(a) + \{\mathrm{E}(e)\}^2\,\mathrm{Var}(c)$$

【数４３】

$$\mathrm{Var}(\varepsilon_{2\mathrm{H}} \mid \underline{\varepsilon_1}) = \{\mathrm{E}(h)\}^2\,\mathrm{Var}(b) + \{\mathrm{E}(f)\}^2\,\mathrm{Var}(d)$$

【数４４】

$$\mathrm{Var}(\varepsilon_{2\mathrm{V}} \mid \underline{\varepsilon_1}) = \{\mathrm{E}(g)\}^2\,\mathrm{Var}(b) + \{\mathrm{E}(e)\}^2\,\mathrm{Var}(d)$$

【００８０】

数３３の行列各要素の絶対値の二乗のアンサンブル平均と数３７～数４４の分散を用いることにより、ＤＯＰＵが数４５～数４８で求められる。

【数４５】

$$P^{(\underline{\varepsilon_1})} = \frac{\sqrt{\left(\overline{|\varepsilon_{1\mathrm{H}}|^2} - \overline{|\varepsilon_{1\mathrm{V}}|^2}\right)^2 + 4\left(\overline{|\varepsilon_{1\mathrm{H}}|^2} - \mathrm{Var}(\varepsilon_{1\mathrm{H}})\right)\left(\overline{|\varepsilon_{1\mathrm{V}}|^2} - \mathrm{Var}(\varepsilon_{1\mathrm{V}})\right)}}{\overline{|\varepsilon_{1\mathrm{H}}|^2} + \overline{|\varepsilon_{1\mathrm{V}}|^2}}$$

【数４６】

$$P^{(\underline{\varepsilon_2})} = \frac{\sqrt{\left(\overline{|\varepsilon_{2\mathrm{H}}|^2} - \overline{|\varepsilon_{2\mathrm{V}}|^2}\right)^2 + 4\left(\overline{|\varepsilon_{2\mathrm{H}}|^2} - \mathrm{Var}(\varepsilon_{2\mathrm{H}})\right)\left(\overline{|\varepsilon_{2\mathrm{V}}|^2} - \mathrm{Var}(\varepsilon_{2\mathrm{V}})\right)}}{\overline{|\varepsilon_{2\mathrm{H}}|^2} + \overline{|\varepsilon_{2\mathrm{V}}|^2}}$$

【数４７】

$$P^{(\underline{\varepsilon_1}|\underline{\varepsilon_2})} = \frac{\sqrt{\left(\overline{|\varepsilon_{1\mathrm{H}}|^2} - \overline{|\varepsilon_{1\mathrm{V}}|^2}\right)^2 + 4\left(\overline{|\varepsilon_{1\mathrm{H}}|^2} - \mathrm{Var}(\varepsilon_{1\mathrm{H}} \mid \underline{\varepsilon_2})\right)\left(\overline{|\varepsilon_{1\mathrm{V}}|^2} - \mathrm{Var}(\varepsilon_{1\mathrm{V}} \mid \underline{\varepsilon_2})\right)}}{\overline{|\varepsilon_{1\mathrm{H}}|^2} + \overline{|\varepsilon_{1\mathrm{V}}|^2}}$$

【数４８】

$$P^{(\underline{\varepsilon_2}|\underline{\varepsilon_1})} = \frac{\sqrt{\left(\overline{|\varepsilon_{2\mathrm{H}}|^2} - \overline{|\varepsilon_{2\mathrm{V}}|^2}\right)^2 + 4\left(\overline{|\varepsilon_{2\mathrm{H}}|^2} - \mathrm{Var}(\varepsilon_{2\mathrm{H}} \mid \underline{\varepsilon_1})\right)\left(\overline{|\varepsilon_{2\mathrm{V}}|^2} - \mathrm{Var}(\varepsilon_{2\mathrm{V}} \mid \underline{\varepsilon_1})\right)}}{\overline{|\varepsilon_{2\mathrm{H}}|^2} + \overline{|\varepsilon_{2\mathrm{V}}|^2}}$$

以上より、数２４、２５、４５～４８を用いて、数３６における局所ジョーンズ行列のノイズ成分のフォンノイマンエントロピーH_{noise}が求められる。なお、数４５～４８の分子の平方根内の第２項において積の各因子が負の値を持つと、数４５～４８の値が０から１の間の定義域から外れる可能性がある。そのため、数４５～４８の分子の平方根内の第２項において積の各因子が負の値を持つ場合、その因子を０に置き換えてから数４５～４８を計算してもよい。

【００８１】

なお、行列各要素の深さ依存のノイズ分散は、例えば散乱を持つ対象物を置かずに測定したＡスキャンのノイズ強度の平均に多項式フィッティングを適用することにより算出できる。このノイズ測定やパラメーターの算出は装置の製造時に行なってもよいし、装置起動時など予め定められた時期に自動的に行なってもよいし、対象物測定前或いは測定後において例えば光シャッターや光スキャナなどを制御することにより対象物からの光を検出しない状態にして行なっても構わない。

【００８２】

次に、共分散行列のアンサンブル平均に用いるサンプル数が小さい場合を考える。サンプル数が小さい場合、フォンノイマンエントロピーの値が低く見積もられる傾向がある。これを緩和するための方法として、ＡＱ－ＭＬＥ（asymptotic quasi maximum likelifood estimator）を用いる。アンサンブル平均された共分散行列の固有値はＡＱ－ＭＬＥによって数４９のように求められる。

【数４９】

$$\hat{l}_i = \lambda_i - \frac{\lambda_i}{n}\sum_{j=1,j\neq i}^{m}\frac{\lambda_j}{\lambda_i-\lambda_j} - O(n^{-1}),\quad i=1,2,\ldots,m$$

ここで、数４９の第１式目の左辺（ｌ$_i$の上部に⌒）は推定されたｉ番目の固有値、λ$_i$は限られたサンプル数によるアンサンブル平均から求められたｉ番目の固有値、ｎはサンプル数、ｍは共分散行列の次元であり、本実施例においてはｍ＝４である。また、Ｏ（ｎ$^{-1}$）は近似の次数を表し、実際の計算では無視される。

【００８３】

数４９によって推定された固有値を用いて、数５０に示すようにフォンノイマンエントロピーを求めることができる。

【数５０】

$$\hat{H} = \sum_{i=1}^{4} -\hat{l}_i' \log_4 \hat{l}_i',\quad \hat{l}_i' = \frac{\hat{l}_i}{\sum_{i=1}^{4}\hat{l}_i}$$

数５０の第１式目の左辺（Ｈの上部に＾）は、推定されたフォンノイマンエントロピーである。

【００８４】

ここで、上述したCloude-Pottier分解について考える。上述のCloude-Pottier分解は、画像フィルターとして用いることも可能である。元データとしては３次元ボリュームデータでもよいし、対象物上のある同じ領域を繰り返し撮影したデータでもよいし、その組み合わせのデータでもよい。例えば、前段処理としてコヒーレントなジョーンズ行列フィルターを適用し、その後にCloude-Pottier分解を適用しても構わない。この場合、それぞれのフィルターは２次元又は３次元空間的に適用してもよいし、時間的に適用してもよいし、空間的、時間的の両者の組み合わせでもよい。

【００８５】

コヒーレントなジョーンズ行列フィルターのカーネルサイズとして、例えば空間的に３×１ピクセル（縦×横）に設定してもよい。また、Cloude-Pottier分解のカーネルサイズを、例えば空間的に７×１１ピクセル（縦×横）に設定してもよい。カーネルサイズは四角形である必要はなく、空間的又は時間的に任意の形状に設定することができる。カーネルに対してガウス関数などの任意の重み付け関数をかけてもよい。

【００８６】

また、ジョーンズ行列フィルターは、主に空間的に小さなスペックルノイズの除去に用いられ、Cloude-Pottier分解はスペックルよりも大きな局所的な統計を取るために用いられるため、ジョーンズ行列フィルターのカーネルサイズよりもCloude-Pottier分解のカーネルサイズの方が大きいことが好ましい。ただし、必ずしも実装としてその条件に制限されるものではない。

【００８７】
また、元データの信号強度に任意のしきい値を設定し、しきい値以下のピクセルは画像フィルターの元データから除去しても構わない。また、しきい値以下のピクセルについては任意の色、例えば黒色で画像をマスクしても構わない。
【００８８】
Cloude-Pottier分解によって得られた位相遅延量、複屈折軸、ノイズ成分によるバイアスを除去したフォンノイマンエントロピー、さらにノイズ成分のフォンノイマンエントロピーに任意のカラーマップを用いて画像化することができる。また、それらをボリュームレンダリングしても構わない。さらに、ボリュームレンダリングの不透明度として信号強度や信号強度にしきい値をかけたデータを用いても構わない。
【００８９】
また、これまで元データとしてジョーンズ行列を考えてきたが、数２２、数２３に示されるように、その部分空間であるジョーンズベクトルについても上述の理論は成り立つ。つまり、ジョーンズベクトルを１×２の対象ベクトルとみなし、数８から２×２の共分散行列のアンサンブル平均を求め、Cloude-Pottier分解によってジョーンズベクトルを推定し、数２４を用いてフォンノイマンエントロピーを算出することができる。数２７～３０からその部分空間のＤＯＰＵを算出し、数２４、数２５からその部分空間のノイズ成分のみのフォンノイマンエントロピーH_{noise}を求め、測定したフォンノイマンエントロピーからH_{noise}を除算し、対象物の偏光特性のみを表すフォンノイマンエントロピーを算出することができ、対象物の偏光特性の乱雑さ又は／及び対象物で散乱された光の偏光特性の乱雑さを表すことができる。
【００９０】
このときの画像フィルターとしてのカーネルサイズや画像の表示方法については、上述のジョーンズ行列のフォンノイマンエントロピーと同様にさまざまに設定することが可能である。ジョーンズベクトルは光の少なくとも２つの異なる偏光成分を検出すれば測定できるため、この方法はデータ処理アルゴリズムだけでなくハードウェアの簡素化にも寄与する。例えば、干渉光を直交した２つの偏光成分に偏光ビームスプリッターやウォラストンプリズムなどを用いて分離し、それぞれ光検出器で検出する偏光ダイバーシティ検出光学系を構築することにより、ジョーンズベクトルを測定することができるＯＣＴを作製し、上述の方法によりフォンノイマンエントロピーを求めることができる。
【００９１】
ここで、Cloude-Pottier分解は、共分散行列Ｃが複素ウィシャート分布に従い、ＺやＴがＣの最尤推定量である、という数学的な定理に基づいている。共分散行列を分解して得られるジョーンズ行列Ｌｉや固有値λｉから、位相遅延量、複屈折軸、フォンノイマンエントロピー、ディアッテニュエーション（diattenuation）などのパラメーターを求めることができる。それらのパラメーターの分布とともに、複素ウィシャート分布などの多変量分布は分布それ自体が生体組織又は／及び非生物物質の偏光特性を反映するため、異なる偏光特性を持った生体組織又は／及び非生物物質のセグメンテーションや分類に使用することができる。つまり、上述の各種パラメーターの分布や多変量分布のうち一部又は全部を用いて多変数空間を構成し、ニュートラルネットワーク、サポートベクターマシン、決定木、ランダムフォレスト、単純ベイズ分類器などのアルゴリズムを用いた教師あり学習又は／及びクラスタリングなどのアルゴリズムを用いた教師なし学習により、生体組織又は／及び非生物物質の測定データをセグメンテーション又は／及び分類することが可能となる。
【００９２】
（試験例）
本発明における、ノイズ成分のフォンノイマンエントロピーの補正の方法について、以下、検証のための試験例について説明する。検証のために３種類の対象物を測定した。対象物は、ガラス板、波長６３３ｎｍの１／４波長板、波長１３１０ｎｍの１／４波長板である。これら対象物を、以下、それぞれガラス板、ＥＷＰ、ＱＷＰと表記する。また、検証

のために用いた装置は中心波長１２９７ｎｍのＰＳ－ＯＣＴである。

【００９３】

まず、試験例１として、上記静的な対象物の表面と裏面間の局所ジョーンズ行列を測定し、その往復での位相遅延量を平均、数１９による期待値Ｅ（Ｒ）、数１８による推定値Ｒ１によって推定した。試験例１の結果を図５に示す。図５において、ガラス板、ＥＷＰ、ＱＷＰそれぞれのＡスキャンのプロットはそれぞれの単一のＡスキャンから計算された位相遅延量である。平均（Ｍｅａｎ）、Ｅ（Ｒ）、$Ｒ_{1}$は０からｎ番目までの全てのＡスキャンを用いて計算されプロットしている。図５（１）、（２）、（３）のフォンノイマンエントロピーはそれぞれ０．７４、０．６２、０．６６であった。また、それらの実効ＳＮＲ（ＥＳＮＲ）はそれぞれ３．５０、５．２７、４．８８ｄＢであった。

【００９４】

図５（１）、（３）において、真値（Ｔｒｕｅ　Ｖａｌｕｅ）は計測範囲の下限と上限にあり、この場合平均及びＥ（Ｒ）はバイアスを持つ。平均及びＥ（Ｒ）のバイアスはそれぞれ、非対称な位相遅延量の分布及びＲｉ（ｉ≧２）が持つノイズ成分によるものである。図５（２）における平均及びＥ（Ｒ）のバイアスは図５（１）（３）よりも低い。これは、位相遅延量の分布が対称に近いためである。それらに対し、図５（１）、（２）、（３）全てにおいて$Ｒ_{1}$は真値に収束した。そのため、ＳＮＲが低くても$Ｒ_{1}$が最も効果的にバイアスなしで位相遅延量を推定できると言える。

【００９５】

次に、対象物の位相遅延量がちょうどπのとき複屈折軸は折り返しの影響を受けることから、試験例２として、位相遅延量がπではないＥＷＰを用いて複屈折軸の推定を行なった。複屈折軸の向きは０から１８０度まで１０度刻みで設定され、上述のCloude-Pottier分解によって得られた$Ｌ_{1}$の固有ベクトルから推定した。その固有ベクトルはストークスパラメーターに変換され、共分散行列Ｔのアンサンブル平均に８００本のＡスキャンを用いて算出された０度の複屈折軸との相対角度を求めた。相対角度が９０度を超えた時の折り返し現象は手動により補正した。このようにして得られた複屈折軸の相対角度を図６に示す。サンプル数の影響を見るため、共分散行列Ｔのアンサンブル平均を異なるＡスキャン数、具体的には８、１６、３２、６４、１２８本のＡスキャンを用いてそれぞれ算出した。図６において、測定結果は見やすさのために、設定した複屈折軸の角度毎に、左から順に８、１６、３２、６４、１２８Ａスキャンを用いて算出した相対角度を水平方向にずらしてプロットしている。ここで、フォンノイマンエントロピー及びＥＳＮＲはそれぞれ０．２５、１２．４２ｄＢであった。

【００９６】

図６より、Cloude-Pottier分解におけるＴのアンサンブル平均に用いられるＡスキャンの数を増加させることにより、設定した複屈折軸の向きに近く幅の狭い分布を持った、より好ましい複屈折軸の向きを推定できることが示された。この結果、図５及び図６はジョーンズ行列がCloude-Pottier分解を用いてバイアスなしに$Ｌ_{1}$から推定されることが示された。

【００９７】

次に、試験例３として、数４９、５０で示されたＡＱ－ＭＬＥの効果を検証するため、ガラス板、ＥＷＰ、ＱＷＰを測定した。この時用いた信号強度の設定を表１に示す。

【表１】

Sample	Balanced setting		Unbalanced setting	
	Front surface [dB]	Back surface [dB]	Front surface [dB]	Back surface [dB]
Glass plate	Setting (a)		Setting (b)	
	$\begin{bmatrix} -0.8 & -0.5 \\ -1.2 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.2 & -0.1 \\ -0.9 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.8 & -21.6 \\ -22.6 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.3 & -20.9 \\ -21.7 & 0 \end{bmatrix}$
EWP	Setting (c)		Setting (d)	
	$\begin{bmatrix} 0 & -2.7 \\ -2.3 & -2.4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.7 & -0.3 \\ 0 & -2.7 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -0.8 & -3.9 \\ -4.7 & 0 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -24.9 \\ -23.7 & -0.8 \end{bmatrix}$
QWP	Setting (e)		Setting (f)	
	$\begin{bmatrix} -1.3 & -0.3 \\ 0 & -1.7 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -1.2 & -1.9 \\ 0 & -4.1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 & -4.7 \\ -4.3 & -0.4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} -22.2 & -0.4 \\ 0 & -21.7 \end{bmatrix}$

様々な設定下においてフォンノイマンエントロピーがどのように収束するかを確かめるため、異なる信号強度で測定を行った。その結果を図７に示す。図７において、ＡＱ－ＭＬＥを用いない場合を実線で、用いた場合を破線で示してある。また、水平軸は共分散行列Ｔのアンサンブル平均に用いられたＡスキャン数ｎを示す。

【００９８】

図７において、ＡＱ－ＭＬＥを用いないフォンノイマンエントロピーＨはＡスキャン数がおよそｎ≦～２０の領域で小さい結果となった。この結果はＡＱ－ＭＬＥを用いて推定されたフォンノイマンエントロピー（Ｈの上部に＾。以下、代用標記としてＨ’と表す）によって緩和された。Ａスキャン数ｎが多い領域においては、数５０から予測される通り、ＡＱ－ＭＬＥを用いないフォンノイマンエントロピーＨとＡＱ－ＭＬＥを用いて推定されたフォンノイマンエントロピーＨ’は両方とも同じフォンノイマンエントロピーの値に収束した。

【００９９】

次に、試験例４として、ある一つの深さにおける累積的なジョーンズ行列から求めたノイズ成分のフォンノイマンエントロピーH_{noise}を、表１と同様な測定条件において測定したデータから算出した。上述のように信号強度からH_{noise}を推定し、フォンノイマンエントロピーＨ’との関係を図８に示す。

【０１００】

図８において、H_{noise}はほぼＨ’と一致するという結果が得られた。わずかにH_{noise}がＨ’より大きく推定されたが、これは異なるＯＣＴチャンネル間のノイズが完全にランダムではなくわずかに相関を持っているためであると考えられる。また、Ｈ’が０．４よりも大きい場合、H_{noise}がＨ’より小さい結果も得られた。これは、信号強度がノイズ強度よりも十分高いという仮定が崩れているためであると考えられる。

【０１０１】

次に、試験例５として、局所ジョーンズ行列から算出したノイズ成分のフォンノイマンエントロピーH_{noise}を、表１と同様な測定条件において測定したデータから算出した。上述のように局所ジョーンズ行列の信号強度からH_{noise}を推定し、フォンノイマンエントロピーＨ’との関係を図９に示す。比較のため、$H_{noise}(\underline{\varepsilon_1})+H_{noise}(\underline{\varepsilon_2})$や数３５に示された２つの等価な$H_{noise}$の計算方法の結果をプロットしている。

【０１０２】

図９において、$H_{noise}(\underline{\varepsilon_1})+H_{noise}(\underline{\varepsilon_2})$は図９（ｂ）及び（ｃ）の高いＨ’を除いて過大にフォンノイマンエントロピーを見積もっている。対して、数３５における２つの等価なH_{noise}の計算方法はともにＨ’とよく一致している。例外として、Ｈ’がおおよそ０．５を超える領域においてH_{noise}がＨ’を過小に見積もっている。この原因は、信号強度がノイズ強度よりも十分高いという仮定が崩れているためであると考えられる。

【０１０３】

以上、本発明の実施形態について詳述してきたが、かかる実施形態における具体的な記載

によって、本発明は限定されるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲において種々の変更を加えることが可能である。

【０１０４】

例えば、光断層画像撮影装置の光学系の構成は、図１に示す構成に限られず、種々の構成を採ることができる。例えば、図１０に示すような構成としてもよい。図１０に示す光断層画像撮影装置では、周波数領域が異なる２つの干渉光成分をサンプリングしようとする場合に、深さ方向の計測レンジを狭めることなく、被検物の同じ位置の複数の断層画像を同時に取得できる構成となっている。

【０１０５】

すなわち、光路長の異なる２つの測定光を生成し、それらを重畳して被検物に照射し、被検物からの反射光は２つの反射光に分岐され（３２１～３３２）、分岐された２つの反射光と、光路長の異なる２つの参照光とが干渉光生成部３６０，３７０で合波されて、２つの干渉光が生成される。そして２つの干渉光は、２つの干渉光検出器３８０，３９０で別々に検出されて、２つの干渉信号が生成される。このような構成のＯＣＴにおいても、本発明は適用可能である。

【０１０６】

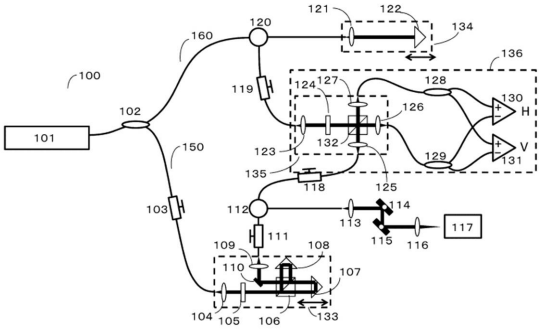
そして、図１０に示す構成では、光路長差を有する２つの測定光を生成する構成としたが、生成する測定光は２つに限られず、光路長差を有する３以上の測定光を生成してもよい。例えば、３つの異なる光路長を有する測定光を用いる場合、これら測定光に対応する３つの参照光を生成すると共に、各光路長に対応する３つの干渉光生成部及び３つの干渉光検出部を設ければよい。

【符号の説明】

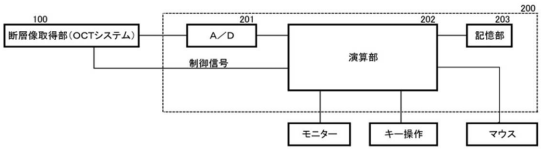
【０１０７】

１００・・断層画像取得部
１０１・・波長走査光源
１０２・・ファイバーカプラ
１０６・・偏光ビームスプリッター
１１２、１２０・・光サーキュレーター
１２８、１２９・・インライン型偏光ビームスプリッター
１３０、１３１・・バランス型光検出器
１３２・・無偏光ビームスプリッター
１３３・・偏波依存ディレイライン
２０１・・ＡＤボード
２０２・・演算部
２０３・・記憶部

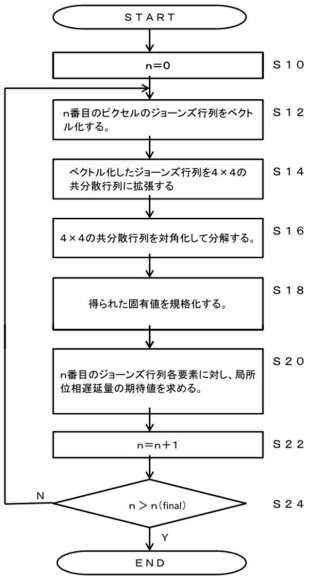
【図１】



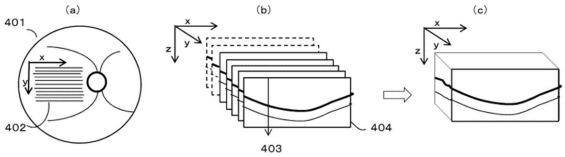
【図２】



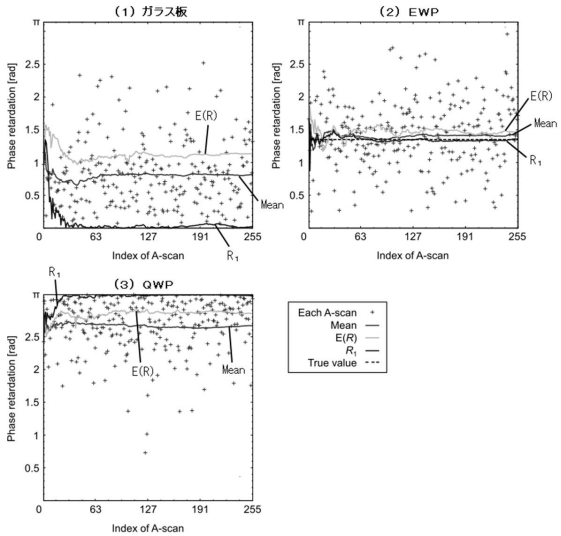
【図３】



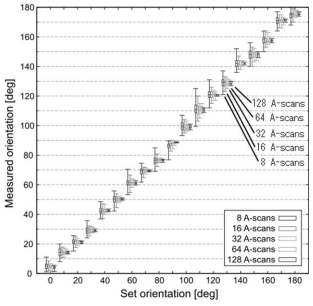
【図４】



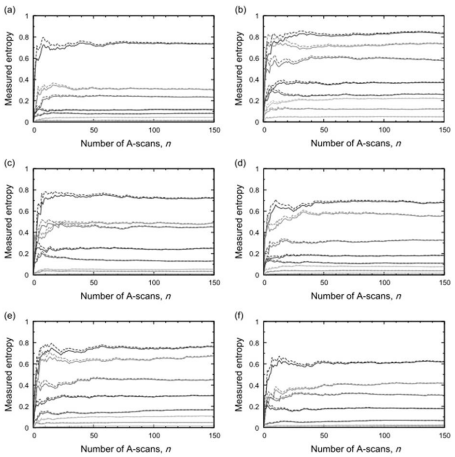
【図５】



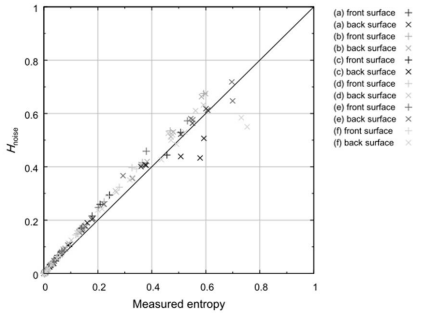
【図６】



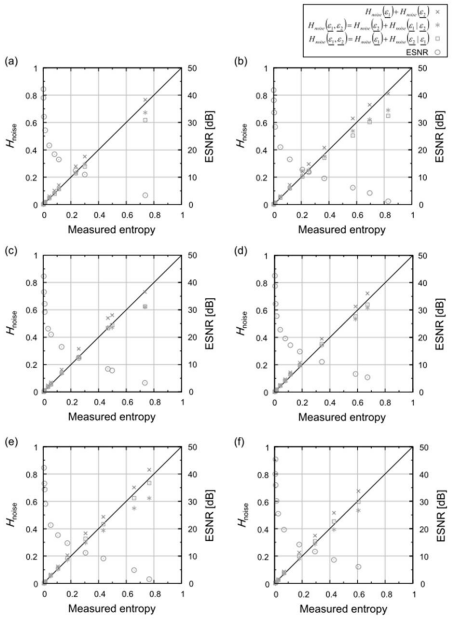
【図７】



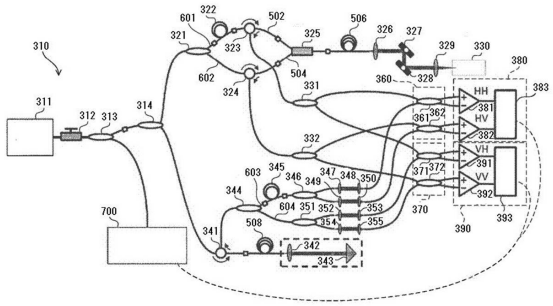
【図８】


(a) front surface
(a) back surface
(b) front surface
(b) back surface
(c) front surface
(c) back surface
(d) front surface
(d) back surface
(e) front surface
(e) back surface
(f) front surface
(f) back surface
H_{noise}
Measured entropy

【図９】


ESNR
(a)
(b)
(c)
(d)
(e)
(f)
H_{noise}
ESNR [dB]
Measured entropy

【図１０】


310
311
312
313
314
321
322
323
324
325
326
327
328
329
330
331
332
341
342
343
344
345
346
347
348
349
350
351
352
353
354
355
360
361
362
370
371
372
380
381
382
383
390
391
392
393
501
502
504
506
508
601
602
603
604
700
HH
HV
VH
VV

フロントページの続き

(56)参考文献 特開２０１６－０３５４０２（ＪＰ，Ａ）
特開２０１６－０８３２４５（ＪＰ，Ａ）
特開２００８－１７５６９８（ＪＰ，Ａ）
特表２０１２－５０８３８０（ＪＰ，Ａ）
特開２０１４－２２８４７３（ＪＰ，Ａ）
特開２００１－２８１１５４（ＪＰ，Ａ）
特表２０００－５０７００７（ＪＰ，Ａ）
特表２００８－５１９２６４（ＪＰ，Ａ）
米国特許第０６９６１１２３（ＵＳ，Ｂ１）
米国特許出願公開第２００８／０００７７３４（ＵＳ，Ａ１）
Generalized Jones matrix optical coherence tomography: performance and local birefringence imaging, Optics Express, 米国, OSA, ２０１０年 １月 ６日, Vol. 18, No. 2, pp. 854-876, doi: 10.1364/OE.18.000854

(58)調査した分野(Int.Cl., ＤＢ名)
Ｇ０１Ｎ ２１／００－２１／９５８
Ｇ０１Ｂ １１／００－１１／３０
Ａ６１Ｂ １／００－ １／３２
Ａ６１Ｂ ３／００－ ３／１８
Ａ６１Ｂ １０／００－１０／０６
ＪＳＴＰｌｕｓ／ＪＭＥＤＰｌｕｓ／ＪＳＴ７５８０（ＪＤｒｅａｍＩＩＩ）
ＪＳＴＣｈｉｎａ（ＪＤｒｅａｍＩＩＩ）
ＯＳＡ Ｐｕｂｌｉｓｈｉｎｇ
ＡＰＳ Ｊｏｕｒｎａｌｓ
Ｓｃｉｅｎｃｅ Ｄｉｒｅｃｔ
Ｓｃｉｔａｔｉｏｎ