

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7704157号
(P7704157)

(45)発行日 令和7年7月8日(2025.7.8)

(24)登録日 令和7年6月30日(2025.6.30)

(51)国際特許分類	F I
H 0 4 N 25/10 (2023.01)	H 0 4 N 25/10
H 0 4 N 23/12 (2023.01)	H 0 4 N 23/12
H 0 4 N 23/95 (2023.01)	H 0 4 N 23/95

請求項の数 6 (全38頁)

(21)出願番号	特願2022-577890(P2022-577890)	(73)特許権者	000004226 日本電信電話株式会社 東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(86)(22)出願日	令和3年1月27日(2021.1.27)	(74)代理人	110002147 弁理士法人酒井国際特許事務所
(86)国際出願番号	PCT/JP2021/002909	(72)発明者	宮田 将司 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
(87)国際公開番号	WO2022/162800	(72)発明者	曾我部 陽光 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
(87)国際公開日	令和4年8月4日(2022.8.4)	(72)発明者	小林 史英 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
審査請求日	令和5年5月10日(2023.5.10)	(72)発明者	杉本 志織

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 撮像装置及び光学素子

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

透明基板と、前記透明基板上または前記透明基板内において前記透明基板の面方向に配置された複数の構造体と、を有する光学素子と、

光電変換素子を含む複数の画素が配置された撮像素子と、

前記撮像素子から得られた電気信号に基づいて画像信号を生成する信号処理部と、

を有する撮像装置であって、

前記光学素子は、結像機能を有し、

前記光学素子は、波長毎に異なる点拡がり関数を有した状態で光を出力することで各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像を、偏光成分に応じて、各偏光成分に対応する複数の画素にそれぞれ結像し、

前記複数の構造体は、側面視したときに、同じ高さを有し、

前記信号処理部は、偏光成分毎に、各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像を再構成し、

前記複数の構造体の各々は、前記透明基板の屈折率よりも高い屈折率を有し、入射した光に対して断面形状に応じた光位相遅延量を与える柱状構造体であり、

前記複数の構造体は、前記画素に対する前記各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像を偏光成分に応じて各偏光成分に対応する複数の画素にそれぞれ結像するための光位相遅延分布に従って断面形状が設定され、前記画素に対する前記各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像を偏光成分に応じて各偏光成分に対応する複数の画素にそれぞれ

結像するための光位相量遅延分布に従って配置され、

前記複数の構造体の各々の断面形状及び配置は、各波長及び各偏光成分のそれぞれに対応する画素上の各位置に結像するように設計されており、

前記複数の構造体の各々の断面形状は、複数種の 2 回回転対称形状のいずれかであり、

前記複数の構造体は、式 (1) で示す配置周期で配置され、

前記複数の構造体の側面視したときの高さ h は、式 (2) のように設定され、

前記撮像装置は、前記撮像素子で得られた画像のバンド数よりも多くのバンドを持つマルチバンド画像を出力する

ことを特徴とする撮像装置。

【数 1】

10

P : 配置周期

λ_{min} : 受光対象の波長帯域における最短波長

n_0 : 透過側の透明基板の屈折率

$$P \leq \lambda_{min}/n_0 \cdots (1)$$

【数 2】

n_0 : 透明基板の屈折率

n_1 : 構造体の屈折率

h : 構造体の高さ

20

λ_r : 分離する波長域の最も長波長側の波長域における所望の中心波長

$$h \geq \lambda_r/(n_1 - n_0) \cdots (2)$$

【請求項 2】

前記信号処理部は、前記光学素子の撮像プロセスによって定義される行列と、各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像とを基に、偏光成分毎にそれぞれ画像を再構成することを特徴とする請求項 1 に記載の撮像装置。

【請求項 3】

前記信号処理部は、ニューラルネットワークで構成されるモデルを用いて、前記光学素子の撮像プロセスによって定義される行列と、各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像とを入力とする最適化問題を解くことを特徴とする請求項 2 に記載の撮像装置。

30

【請求項 4】

前記光学素子における偏光分離領域の境界直下に、光を吸収する障壁を設けたことを特徴とする請求項 1 ~ 3 のいずれか一つに記載の撮像装置。

【請求項 5】

前記光学素子と前記撮像素子との間に設けられ、直下に位置する前記画素が対応する偏光方向と偏光透過軸とを一致させた偏光フィルタをさらに有することを特徴とする請求項 1 ~ 4 のいずれか一つに記載の撮像装置。

【請求項 6】

40

透明基板と、前記透明基板上または前記透明基板内において前記透明基板の面方向に配置された複数の構造体と、を有する光学素子であって、

前記光学素子は、結像機能を有し、

前記光学素子は、波長毎に異なる点拡がり関数を有した状態で光を出力することで各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像を、偏光成分に応じて、各偏光成分に対応する撮像素子の複数の画素にそれぞれ結像し、

前記複数の構造体は、側面視したときに、同じ高さを有し、

前記複数の構造体の各々は、前記透明基板の屈折率よりも高い屈折率を有し、入射した光に対して断面形状に応じた光位相遅延量を与える柱状構造体であり、

前記複数の構造体は、光電変換素子を含む複数の画素が配置された撮像素子の、前記画

50

素に対する前記各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像を偏光成分に応じて各偏光成分に対応する複数の画素にそれぞれ結像するための光位相量遅延分布に従って断面形状が設定され、前記画素に対する前記各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像を偏光成分に応じて各偏光成分に対応する複数の画素にそれぞれ結像するための光位相量遅延分布に従って配置され、

前記複数の構造体の各々の断面形状及び配置は、各波長及び各偏光成分のそれぞれに対応する画素上の各位置に結像するように設計されており、

前記複数の構造体の各々の断面形状は、複数種の2回回転対称形状のいずれかであり、

前記複数の構造体は、式(3)で示す配置周期で配置され、

前記複数の構造体の側面視したときの高さ h は、式(4)のように設定されることを特徴とする光学素子。 10

【数3】

P : 配置周期

λ_{min} : 受光対象の波長帯域における最短波長

n_0 : 透過側の透明基板の屈折率

$$P \leq \lambda_{min}/n_0 \dots (3)$$

【数4】

n_0 : 透明基板の屈折率 20

n_1 : 構造体の屈折率

h : 構造体の高さ

λ_r : 分離する波長域の最も長波長側の波長域における所望の中心波長

$$h \geq \lambda_r/(n_1 - n_0) \dots (4)$$

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、撮像装置及び光学素子に関する。 30

【背景技術】

【0002】

一般に、撮像装置は、取得可能である光学情報がR(赤)、G(緑)、B(青)の3色の2次元画像を取得する。これに対し、近年、より詳細な色情報(波長スペクトル)を取得するカメラとしてハイパースペクトルカメラが実用化されており、より多彩な光学情報から新たな価値のある情報を抽出するような取り組みが進められている。

【0003】

また、波長と同様に重要な光情報である偏光情報を取得する偏光イメージセンサも実用化され、より多彩な光学情報から、新たに価値のある情報を抽出する技術が提案されている。そこで、近年、偏光情報を取得可能であるハイパースペクトル撮像装置の実現が望まれている。 40

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0004】

【文献】Gonzalo R Arce, David J Brady, Lawrence Carin, Henry Arguello, and David S Kittle, "Compressive Coded Aperture Spectral Imaging: An introduction", IEEE Signal Processing Magazine, Vol. 31, No. 1, pp. 105-115, 2013.

【文献】Y. Sogabe, et al. "ADMM-INSPIRED RECONSTRUCTION NETWORK FOR COMPRESSIVE SPECTRAL IMAGING", In: 2020 IEEE International Co 50

ference on Image Processing (ICIP). IEEE, 2020. p. 2865-2869.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

一般に、実用化されているハイパースペクトルカメラは、ラインスキャン型であり、ラインスキャン機構と分光素子とを用いて複数回撮像することで、スペクトル画像を取得する。さらに、これに加えて、偏光情報を同時取得するには、既存のハイパースペクトルカメラに既存の偏光イメージセンサを組み合わせる方法が原理的には可能である。しかしながら、既存のハイパースペクトルカメラに既存の偏光イメージセンサを組み合わせる場合、装置がさらに複雑化するという問題があった。

10

【0006】

本発明は、上記に鑑みてなされたものであって、簡易な装置構成であるとともに偏光情報を取得可能であるハイパースペクトル撮像装置及び簡易な装置構成であるとともに偏光情報を取得可能であるハイパースペクトル撮像装置を実現するための光学素子を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0007】

上述した課題を解決し、目的を達成するために、本発明に係る撮像装置は、透明基板と、透明基板上または透明基板内において透明基板の面方向に配置された複数の構造体と、を有する光学素子と、光電変換素子を含む複数の画素が配置された撮像素子と、撮像素子から得られた電気信号に基づいて画像信号を生成する信号処理部と、を有し、光学素子は、波長毎に異なる点拡がり関数を有した状態で光を出力することで各波長の集光強度分布が畳み込まれている画像を、偏光成分に応じて、各偏光成分に対応する複数の画素にそれぞれ結像し、複数の構造体は、側面視したときに、同じ高さを有し、信号処理部は、偏光成分毎に、各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像を再構成することを特徴とする。

20

【0008】

また、本発明に係る光学素子は、透明基板と、透明基板上または透明基板内において透明基板の面方向に配置された複数の構造体と、を有する光学素子であって、光学素子は、波長毎に異なる集光強度分布を有した状態で光を出力することで各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像を、偏光成分に応じて、各偏光成分に対応する複数の画素にそれぞれ結像し、複数の構造体は、側面視したときに、同じ高さを有することを特徴とする。

30

【発明の効果】

【0009】

本発明によれば、簡易な装置構成であるとともに偏光情報を取得可能であるハイパースペクトル撮像装置を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】図1は、実施の形態に係る撮像装置の概略構成を示した側面図である。

【図2】図2は、図1に示すレンズの構成を説明する図である。

【図3】図3は、図1に示す撮像装置が画像を取得するまでの処理を示す概略図である。

40

【図4】図4は、実施の形態に係る撮像素子及びレンズの断面の一部を模式的に示す図である。

【図5】図5は、信号処理部による画像の再構成処理を説明する図である。

【図6】図6は、平面視したときの形状が正方形形状である構造体の側面図である。

【図7】図7は、図6に示す構造体の底面図である。

【図8】図8は、構造体の底面図である。

【図9】図9は、構造体の側面図である。

【図10】図10は、構造体の側面図である。

【図11】図11は、各偏光における各波長における位相遅延量及び構造体の構造幅の関係を示す図である。

50

【図 1 2】図 1 2 は、各偏光における各波長における位相遅延量及び構造体の構造幅の関係を示す図である。

【図 1 3】図 1 3 は、各偏光における各波長における位相遅延量及び構造体の構造幅の関係を示す図である。

【図 1 4】図 1 4 は、各偏光における各波長における位相遅延量及び構造体の構造幅の関係を示す図である。

【図 1 5】図 1 5 は、各偏光における各波長における位相遅延量及び構造体の構造幅の関係を示す図である。

【図 1 6】図 1 6 は、各偏光における各波長における位相遅延量及び構造体の構造幅の関係を示す図である。

【図 1 7】図 1 7 は、構造体の断面形状の例を示す図である。

【図 1 8】図 1 8 は、フレネルレンズと同等となるように設計した場合の構造体が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。

【図 1 9】図 1 9 は、フレネルレンズと同等となるように設計した場合の構造体が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。

【図 2 0】図 2 0 は、フレネルレンズと同等となるように設計した場合の構造体が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。

【図 2 1】図 2 1 は、フレネルレンズと同等となるように設計した場合の構造体が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。

【図 2 2】図 2 2 は、フレネルレンズと同等となるように設計した場合の構造体が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。

【図 2 3】図 2 3 は、フレネルレンズと同等となるように設計した場合の構造体が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。

【図 2 4】図 2 4 は、P S F がプロペラ形状となるように設計した場合の構造体が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。

【図 2 5】図 2 5 は、P S F がプロペラ形状となるように設計した場合の構造体が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。

【図 2 6】図 2 6 は、P S F がプロペラ形状となるように設計した場合の構造体が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。

【図 2 7】図 2 7 は、P S F がプロペラ形状となるように設計した場合の構造体が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。

【図 2 8】図 2 8 は、P S F がプロペラ形状となるように設計した場合の構造体が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。

【図 2 9】図 2 9 は、P S F がプロペラ形状となるように設計した場合の構造体が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。

【図 3 0】図 3 0 は、図 2 4 ~ 図 2 9 に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めた各偏光及び各波長における P S F 形状を示す図である。

【図 3 1】図 3 1 は、図 2 4 ~ 図 2 9 に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めた各偏光及び各波長における P S F 形状を示す図である。

【図 3 2】図 3 2 は、図 2 4 ~ 図 2 9 に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めた各偏光及び各波長における P S F 形状を示す図である。

【図 3 3】図 3 3 は、図 2 4 ~ 図 2 9 に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めた各偏光及び各波長における P S F 形状を示す図である。

【図 3 4】図 3 4 は、図 2 4 ~ 図 2 9 に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めた各偏光及び各波長における P S F 形状を示す図である。

【図 3 5】図 3 5 は、図 2 4 ~ 図 2 9 に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めた各偏光及び各波長における P S F 形状を示す図である。

【図 3 6】図 3 6 は、図 2 4 ~ 図 2 9 に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めた各偏光及び各波長における P S F 形状を示す図である。

【図 3 7】図 3 7 は、シミュレーション結果を示す図である。

10

20

30

40

50

【図 3 8】図 3 8 は、撮像装置による再構成画像の一例を示す図である。

【図 3 9】図 3 9 は、図 3 8 における再構成画像の x 点における波長スペクトルを示す図である。

【図 4 0】図 4 0 は、レンズの P S F の形状ごとに再構成精度を比較した結果を示す図である。

【図 4 1】図 4 1 は、図 4 0 の P S F の各形状の観測画像に基づいてそれぞれ再構成された再構成画像を示す図である。

【図 4 2】図 4 2 は、図 1 に示すレンズを適用した撮像ユニットの平面図である。

【図 4 3】図 4 3 は、図 4 2 の A - A ' 線で撮像ユニットを切断した場合の断面図である。

【図 4 4】図 4 4 は、実施の形態の変形例 1 に係る撮像ユニットの平面図である。

【図 4 5】図 4 5 は、図 4 4 の B - B ' 線で撮像ユニットを切断した場合の断面図である。

【図 4 6】図 4 6 は、図 1 に示すレンズを適用した撮像ユニットの平面図である。

【図 4 7】図 4 7 は、図 4 6 の C - C ' 線で撮像ユニットを切断した場合の断面図である。

【図 4 8】図 4 8 は、実施の形態の変形例 2 に係る撮像ユニットの平面図である。

【図 4 9】図 4 9 は、図 4 8 の B - B ' 線で撮像ユニットを切断した場合の断面図である。

【図 5 0】図 5 0 は、実施の形態に係る光学素子 1 2 の断面の一部の他の例を模式的に示す図である。

【図 5 1】図 5 1 は、実施の形態に係る光学素子 1 2 の断面の一部の他の例を模式的に示す図である。

【図 5 2】図 5 2 は、実施の形態に係る光学素子 1 2 の断面の一部の他の例を模式的に示す図である。

【図 5 3】図 5 3 は、実施の形態に係る光学素子 1 2 の断面の一部の他の例を模式的に示す図である。

【図 5 4】図 5 4 は、実施の形態に係る光学素子 1 2 の断面の一部の他の例を模式的に示す図である。

【図 5 5】図 5 5 は、実施の形態に係る光学素子 1 2 の断面の一部の他の例を模式的に示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0011】

以下、本発明を実施するための最良の形態を図面とともに詳細に説明する。なお、以下の説明において、各図は本発明の内容を理解でき得る程度に形状、大きさ、及び位置関係を概略的に示してあるに過ぎず、したがって、本発明は各図で例示された形状、大きさ、及び位置関係のみに限定されるものではない。また、図面の記載において、同一部分には同一の符号を付して示している。なお、以下では、A に対し、“ \wedge A” と記載する場合は「“A” の直上に“ \wedge ” が記された記号」と同等であるとする。

【0012】

[実施の形態]

[撮像装置]

まず、本発明の実施の形態に係る撮像装置について説明する。図 1 は、実施の形態に係る撮像装置の概略構成を示した側面図である。図 2 は、図 1 に示す光学素子 1 2 の構成を説明する図である。図 3 は、図 1 に示す撮像装置 1 0 が画像を取得するまでの処理を示す概略図である。

【0013】

図 1 に示すように、実施の形態に係る撮像装置 1 0 は、光学素子 1 2、撮像素子 1 1 及び信号処理部 1 3 を有する。撮像素子 1 1 は、C C D や C M O S 等の光電変換素子を有する。信号処理部 1 3 は、撮像素子 1 1 から出力される光電変換信号を処理して画像信号を生成する。

【0014】

図 1 及び図 2 に示すように、撮像装置 1 0 で、自然光や照明光等の光が撮像対象（実画像）に照射され、撮像対象 1 により透過 / 反射 / 散乱した光、または、撮像対象 1 から発

する光は、光学素子 1 2 により撮像素子 1 1 上に光学像を形成する。

【 0 0 1 5 】

光学素子 1 2 は、偏光情報に応じて結像位置が異なり、かつ、波長に応じて結像特性が異なる機能を有する。光学素子 1 2 は、微細なバイナリー構造から成る。光学素子 1 2 は、入射光の波長以下の周期で配置された、側面視した際の高さが一定の、複数の微細な柱状の構造体 1 6 0 を有する。

【 0 0 1 6 】

複数の微細な柱状の構造体 1 6 0 の断面は、いずれも 2 回回転対称の形状を有し、この形状により偏光依存性を実現できる。例えば、光学素子 1 2 は、 0° (横) と 90° (縦) との直線偏光を分離する第 1 のレンズパターン領域 1 2 - 1 と、 $+45^\circ$ (斜め) と -45° (斜め) との直線偏光を分離する第 2 のレンズパターン領域 1 2 - 2 (図 2 参照) とが組を形成しており、同時に 4 方向の偏光成分を分離する。光学素子 1 2 は、偏光方向に応じて結像 (集光) 位置が異なる。

10

【 0 0 1 7 】

さらに、光学素子 1 2 は、波長に応じて結像特性が異なる機能を有することで、光学的な符号化を行う。このため、光学素子 1 2 は、波長に応じて明確に異なる形状の P S F (Point spread function: 点拡がり関数) をもつレンズ (波長依存 P S F レンズ) であり、実画像 (被写体) に対して、波長毎に異なる畳み込み演算を施した画像を生成する機能を有する。光学素子 1 2 は、波長依存 P S F レンズであり各波長の P S F が畳み込まれている画像 (取得した観測画像 (符号化画像)) を、偏光方向に応じて、撮像素子 1 1 における、各偏光方向に対応する複数の画素にそれぞれ結像する機能を有する。すなわち、この光学素子 1 2 で物体を撮像すると、偏光変更方向に応じて、実画像に対して波長毎に異なる P S F で畳み込み演算がなされ、その結果が、撮像素子 1 1 における、各偏光方向に対応する領域上でそれぞれ結像する。

20

【 0 0 1 8 】

撮像対象 1 からの光は、光学素子 1 2 によって、偏光成分が分離された状態で異なる位置で結像し、波長に応じて結像特性 (ぼやけ具合) が異なる。光学素子 1 2 によって、偏光成分を分離しながら、波長毎に異なる畳み込み演算が行われることとなる。

【 0 0 1 9 】

撮像素子 1 1 は、偏光分離・波長依存 P S F レンズである光学素子 1 2 により、波長毎に異なる畳み込み演算がなされた観測画像を、偏光方向毎に取得する。例えば、図 3 に示すように、 90° の偏光成分に対応する画像 G 1、 0° の偏光成分に対応する画像 G 2、 -45° の偏光成分に対応する画像 G 3、 45° の偏光成分に対応する画像 G 4 であって、いずれの画像も各波長の P S F が畳み込まれている画像 G 1 ~ G 4 (図 3 参照) が撮像素子 1 1 に結像される。

30

【 0 0 2 0 】

信号処理部 1 3 は、圧縮センシングに基づいて、各波長の P S F が畳み込まれている画像を、偏光成分毎に、再構成する再構成処理により、スペクトル情報を復元した再構成画像を生成する。例えば、信号処理部 1 3 は、再構成処理により、 90° の偏光成分に対応する再構成画像 G 1'、 0° の偏光成分に対応する再構成画像 G 2'、 -45° の偏光成分に対応する再構成画像 G 3'、 45° の偏光成分に対応する再構成画像 G 4' を生成する。

40

【 0 0 2 1 】

なお、撮像装置 1 0 は、赤外光カットの光学フィルタ、電子シャッター、ビューファインダ、電源 (電池)、フラッシュライトなどの公知の構成要素を備え得るが、それらの説明は、本発明の理解に特に必要でないため省略する。また、以上の構成はあくまでも一例であり、実施の形態では、光学素子 1 2、撮像素子 1 1、信号処理部 1 3 を除く構成要素として、公知の要素を適切に組み合わせて用いることができる。

【 0 0 2 2 】

[レンズ及び撮像素子]

50

続いて、実施の形態における光学素子 1 2 及び撮像素子 1 1 の概略を説明する。図 4 は、実施の形態に係る撮像素子 1 1 及び光学素子 1 2 の断面の一部を模式的に示す図である。

【0023】

図 4 では、撮像素子 1 1 及び光学素子 1 2 の一部を、撮像ユニット 1 0 0 として説明する。図 4 の撮像ユニット 1 0 0 は、図 2 に示す光学素子 1 2 を適用し、図 2 に示す A - A' 線で切断した場合の断面図である。また、図 4 以降では、x y z 座標系が示される。x y 平面方向は、撮像素子 1 1、後述する透明基板 1 9 0 等の面方向に相当する。以下、特に説明がある場合を除き、「平面視」は、z 軸方向に（例えば z 軸負方向に）視ることを指し示す。「側面視」は、x 軸方向または y 軸方向（例えば y 軸負方向）に見ることを指し示す。撮像ユニット 1 0 0 では、0°（横）と 90°（縦）との直線偏光を分離する第 1 のレンズパターン領域 1 2 - 1 と、+45°（斜め）と -45°（斜め）との直線偏光を分離する第 2 のレンズパターン領域 1 2 - 2 とが組を形成している。

10

【0024】

図 4 に示すように、撮像ユニット 1 0 0 は、光学素子 1 2 と撮像素子 1 1 とは対向して配置される。撮像素子 1 1 及び光学素子 1 2 は、z 軸正方向にこの順に設けられる。

【0025】

撮像素子 1 1 は、各々が光電変換素子を含む複数の画素 1 3 0 が 2 次元アレイ状に複数配列される。光電変換素子の例は、フォトダイオード（PD：Photo Diode）である。各画素は、赤色（R）、緑色（G）、青色（B）に対応する。赤色の光の波長帯域の例は、波長を λ_0 とすると、 $600\text{ nm} < \lambda_0 < 800\text{ nm}$ である。緑色の光の波長帯域の例は、 $500\text{ nm} < \lambda_0 < 600\text{ nm}$ である。青色の光の波長帯域の例は、 $\lambda_0 < 500\text{ nm}$ 未満である。画素 R、画素 G、画素 B は、ベイヤー配列でもよい。または、画素は、モノクロ画像用であってもよい。

20

【0026】

入射した光は、z 軸負方向に沿って進み、光学素子 1 2 を介して撮像素子 1 1 に到達する。撮像素子 1 1 の各画素 1 3 0 に発生した電荷は、図示しないトランジスタ等によって、画素信号の基礎となる電気信号に変換され、配線層を介して撮像ユニット 1 0 0 の外部に出力される。

【0027】

光学素子 1 2 は、撮像対象からの光が入射する側に配置されている。平面視したとき、光学素子 1 2 は、撮像素子 1 1 を覆うように設けられる。光学素子 1 2 は、透明基板 1 9 0 の底面に、例えば周期的に（周期構造を有して）、複数の構造体 1 6 0 によって構成される。複数の構造体 1 6 0 は、設計を容易にする等のために等間隔配置されてもよいし、不等間隔配置されてもよい。複数の構造体 1 6 0 は、複数の画素を覆うために撮像素子 1 1 上に形成された透明層 1 5 0 内に形成される。

30

【0028】

透明基板 1 9 0 は、例えば、 SiO_2 （屈折率 $n = 1.45$ ）等の材料からなる低屈折率の透明基板である。透明層 1 5 0 は、空気または SiO_2 等の材料からなる低屈折率の透明層である。透明基板 1 9 0 及び透明層 1 5 0 の材料は単一であってもよいし、複数の材料が層状になったものでもよい。複数の構造体 1 6 0 は、側面視したときに、同じ高さを有する。複数の構造体 1 6 0 は、透明層 1 5 0 の屈折率よりも高い屈折率を有する SiN や TiO_2 等の材料から形成された微細構造パターンからなる。

40

【0029】

光学素子 1 2 の例は、メタサーフェスである。メタサーフェスは、平面視したときに光の波長以下の幅を有するとともに、側面視したときに同じ高さを有する複数の微細構造体（構造体 1 6 0 に相当）を含んで構成される。複数の構造体 1 6 0 は、x y 平面と平行な面で切断した際の各々の断面形状が、2 回回転対称形状であり、この形状により偏光依存性を実現できる。なお、メタサーフェスは、2 次元構造を有してもよいし、3 次元構造を有してもよい。光学素子 1 2 は、この構造体 1 6 0 のパラメータを変えるだけで、光の特性（波長、偏波、入射角）に応じて、位相と光強度を制御することができる。3 次元構造

50

の場合、2次元構造よりも設計自由度が向上する。

【0030】

光学素子12は、偏光方向に応じて結像（集光）位置が異なり、それぞれの集光点で波長に応じて異なるPSFを有する。これにより、撮像対象1からの光は、偏光分離・波長依存PSF機能を有する光学素子12により、偏光成分が分離された状態で撮像素子11上の異なる位置で結像し、波長に応じて結像特性（ぼやけ具合）が異なる画像（RGB画像またはモノクロ画像）として取得される。

【0031】

例えば、図2にも示すように、光学素子12は、 0° と 90° との直線偏光を分離する第1のレンズパターン領域12-1と、 $+45^\circ$ と -45° との直線偏光を分離する第2のレンズパターン領域12-2とが組として形成される。 0° 、 90° 、 $+45^\circ$ 、 -45° の4つの偏光成分に対応する画像が形成され、撮像素子11では、各偏光成分に対応する画像が結像される領域がそれぞれ設定される。図4では、撮像素子11の領域11-1に 0° の偏光成分に対応する画像が結像され、領域11-2に $+45^\circ$ の偏光成分に対応する画像が結像される例を示す。

10

【0032】

各取得画像は、撮像対象（実画像）1に対して光学素子12の偏光分離・波長依存PSFによって波長毎に光学的な畳み込み演算がなされ、画素上で波長次元に沿って積分された結果に対応する。撮像ユニット100は、光学的に符号化及び圧縮された状態の画像を取得する。なお、撮像素子11がカラーイメージセンサの場合、畳み込み演算の後に、撮像素子11のR、G、Bそれぞれの画素の波長感度に応じた乗算がなされた後に、画素上で波長次元に沿って積分される。

20

【0033】

このように、撮像装置10では、光学素子12のみで、偏光成分毎に、光学的に符号化された画像を撮像素子11上に結像する。言い換えると、撮像装置10では、光学素子12によって、偏光分離をしながら、スペクトル画像再構成において効果的な符号化を行うことができる。したがって、撮像装置10は、光学素子12と撮像素子11と信号処理部13のみで足りるため、簡易な装置構成であるとともに偏光情報を取得可能であるハイパースペクトル撮像装置を実現することができる。

【0034】

また、撮像装置10では、光学素子12と撮像素子11との間の距離は、通常の撮像装置と同様に、レンズの焦点距離によって決まるため、撮像装置10のサイズは、同じ視野Fナンバーを有する通常のカメラと同等となる。

30

【0035】

そして、光学的に符号化された画像は、観測プロセスが既知の場合（ここでは、光学素子12のPSFとセンサの波長感度特性）、信号処理部13において、適切な信号処理を行うことで実画像の情報を復元することができる。

【0036】

撮像装置10は、特に、自然画像がもつスパース性を利用することで、少ない情報量から対象を高精度に再構成（復元）する手法である圧縮センシングを用いて信号処理を行う。撮像装置10は、光学素子12が有する波長依存PSFによって、実画像の各波長成分に対して異なる符号化を行うことが可能なため、信号処理部13が圧縮センシングに基づく画像の再構成処理を行うことで、スペクトル画像を復元することができる。

40

【0037】

この処理を、偏光成分毎に分離した各偏光成分の観測画像に適用することで、各偏光成分からなるスペクトル画像（偏光スペクトル画像）（例えば、図3の画像 $G_1' \sim G_4'$ ）を生成することができる。

【0038】

なお、本例の場合、4つの直線偏光成分の情報から偏光状態を記述するストークスパラメータ4つのうち3つのパラメータを、波長毎に導出できる。また、レンズパターンとそ

50

の組によっては、ストークスパラメータ全てを導出可能な4つまたは6つの基底毎に偏光分離し、フルストークスパラメータを波長毎に取得することも可能である。

【0039】

[画像の再構成処理]

信号処理部13は、光学素子12の撮像プロセスによって定義される行列と、撮像素子11に結像された画像、すなわち、各波長のPSFが畳み込まれている画像(符号化画像)とを基に、偏光成分毎にそれぞれ画像を再構成する。図5は、信号処理部13による画像の再構成処理を説明する図である。

【0040】

図5に示すように、再構成処理は、光学系によって定義される観測行列と、取得した符号化画像 g とを入力とする最適化問題(例えば、図5の式(A))を解く処理である。

10

【0041】

式(A)において、右辺の第1項の f は、本来復元したい画像を示す。観測画像のデータ数が復元したい画像(再構成画像)のデータ数より著しく少ないため、 $f - g = 0$ を満たす解は無数に存在するが、正規化項を第2項として加えることで、復元画像として尤もらしい画像(再構成画像 \hat{f})を求めやすくしている。

【0042】

正規化項に関しては、スペクトル画像用に様々なものが提案されており、本実施の形態では、正則化項のいずれについても適用可能である。式(A)の例では、 R がprior(先見情報:画像らしさ)に基づく信号の事前確率に対応しており、隣接画素との差分は小さいなどの一般的に画像がもつスパース性を利用する。なお、 λ はバランシングパラメータである。なお、本実施例では、正規化項として、SSTV(Spatio-Spectral Total Variation)(参考文献1)と呼ばれるものを用いており、画像再構成において空間次元および波長次元の隣接画素の差分を最小化するように最適化される。

20

参考文献1: Aggarwal, H. K., & Majumdar, A. (2016). Hyperspectral image denoising using spatio-spectral total variation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(3), 442-446.

【0043】

最適化問題の解き方も様々な方法が提案されている。本実施の形態では、例えば、ADMM(Alternating Direction Method of Multipliers)(参考文献2)と呼ばれる手法を用いる。そして、近年、機械学習などを使って正則化項と最適化問題のパラメータを同時最適化し、画像再構成を行う方法が提案されている(非特許文献2参照)。信号処理部13は、この方法を適用することも可能である。すなわち、信号処理部13は、ニューラルネットワークで構成されるモデルおよび最適化された再構成アルゴリズムを用いて、スペクトル画像の再構成を行ってもよい。言い換えると、信号処理部13は、機械学習を用いて、正則化項の形と最適化問題の各種パラメータとを様々なスペクトル画像を使って事前に学習し、学習済み(最適化済み)の正則化項と各種パラメータとを使って、画像再構成する。

30

参考文献2: S. Boyd, N. Parikh, E. Chu, B. Peleato, and J. Eckstein, "Distributed optimization and statistical learning via the alternating direction method of multipliers," *Foundations and Trends in Machine Learning*, vol. 3, no. 1, pp. 1-122, 2011.

40

【0044】

このように、撮像装置10では、再構成に効果的な観測行列を、簡易で小型な光学系(光学素子12)で実現することができる。

【0045】

[構造体の一例]

構造体160を実現するには、本実施の形態では、微細な柱状の構造体160の断面形状を設計して任意の空間位相分布を設計することで、偏光情報に応じて結像位置が異なり、かつ、波長に応じて結像特性が異なる、偏光分離・波長依存PSFレンズである光学素

50

子 1 2 を実現する。

【 0 0 4 6 】

図 6 及び図 7 は、構造体 1 6 0 の概略構成の例を示す図である。図 6 は、平面視したときの形状が正方形形状である構造体 1 6 0 の側面図である。図 7 は、図 6 に示す構造体 1 6 0 の底面図である。

【 0 0 4 7 】

構造体 1 6 0 は、z 軸方向に延在する柱状構造体であり、透明基板 1 9 0（例えば SiO₂ 基板（屈折率 1.45））の底面に形成される。構造体 1 6 0 の材料の例は、SiN（屈折率 $n_1 = 2.05$ ）である。構造体 1 6 0 の側方及び下方は、空気（Air（屈折率 $n_0 = 1.0$ ））である。

10

【 0 0 4 8 】

それぞれの構造体 1 6 0 の配置周期を P とする。配置周期 P は、透過側で回折光が生じないように、式 (1) のように設定することが望ましい。

【 0 0 4 9 】

【数 1】

$$P \leq \lambda_{min} / n_0 \quad \cdots (1)$$

【 0 0 5 0 】

λ_{min} は、受光対象の波長帯域における最短波長である。 n_0 は、透過側の透明層の屈折率である。例えば、 λ_{min} を 420 nm とし、 n_0 を 1.0 とし、 $P = 400$ nm とした。

20

【 0 0 5 1 】

構造体 1 6 0 の高さ h（z 軸方向の長さ）は、一定である。高さ h は、構造体 1 6 0 が、入射した光、すなわち z 軸方向に沿って進む光に対して 2 以上の光位相遅延量（位相値）を有していることが好ましいため、分離する波長域の最も長波長側の波長域における所望の中心波長を λ_r とすると、式 (2) のように設定することが望ましい。

【 0 0 5 2 】

【数 2】

$$h \geq \lambda_r / (n_1 - n_0) \quad \cdots (2)$$

30

【 0 0 5 3 】

式 (2) において、 n_1 は、構造体 1 6 0 の屈折率である。構造体 1 6 0 が SiN の場合、 $n_1 = 2.05$ であり、高さ h は例えば 1250 nm である。また、構造体 1 6 0 は、TiN（屈折率 2.40）で形成されてもよい。

【 0 0 5 4 】

構造体 1 6 0 の断面形状を設計（寸法設計を含む）することで、各波長の光に対して異なる光位相遅延量を与えることのできる様々な組み合わせが実現可能である。構造体 1 6 0 の断面形状を多様化させることで、組み合わせが増加し、設計自由度はさらに向上する。

40

【 0 0 5 5 】

偏光依存性を生じさせるため、複数の構造体 1 6 0 は、xy 平面と平行な面で切断した際の各々の断面形状が、2 回回転対称形状であることが望ましい。なお、ここでいう偏光依存性は、直交する直線偏光にそれぞれに対して異なる位相遅延量を与えることが可能な性質を指す。本実施の形態では、構造体 1 6 の断面形状の寸法パラメータに依存する各偏光成分に対する位相値を用いて、偏光分離かつ波長依存 PSF を有するレンズパターンを設計する。

【 0 0 5 6 】

[位相制御の原理]

図 8 は、構造体 1 6 0 の底面図である。図 9 及び図 1 0 は、構造体の側面図である。構

50

構造体 160 は、構造体 160 周囲の材料または空間の屈折率 n_0 よりも高い屈折率 n_1 を有する材料から形成されており、側面視したときの構造体 160 の高さ h は一定である。また、構造体 160 の底面及び上面は、四角形である。

【0057】

構造体 160 は、構造体 160 周囲の材料または空間との屈折率差により、光を構造内に閉じ込めて伝搬させる光導波路として動作することができる。したがって、構造体 160 の片側から光を入射すると、光は構造内に強く閉じ込められながら伝搬する。このとき、入射した光は光導波路の実効的な屈折率 n_{eff} によって決まる位相遅延効果を受けながら伝搬し、最後にもう一方の構造方側から出力される。

【0058】

この場合、構造周囲の材料または空間を構造の厚み分の長さを伝搬した光の位相を基準した際、構造による位相遅延量 ϕ は、光の真空中での波長 λ とすると、式(3)で表される。

【0059】

【数3】

$$\phi = (n_{eff} - n_0) \times 2\pi h / \lambda \quad \dots (3)$$

【0060】

式(3)における n_{eff} は、構造体 160 の寸法の関数であり、かつ、構造体 160 の形状によっては強い偏光依存性が生じることが知られている。構造体 160 は、図8に示すような長方形の構造断面をもつようにすると、直交する入射偏光に対して異なる n_{eff} を独立に与えることができる。

【0061】

ここで、図8の横方向(x軸方向)の偏光成分に対する位相遅延量を ϕ_x 、縦方向(y軸方向)の偏光成分に対する位相遅延量を ϕ_y 、横方向の偏光成分に対する実効的な屈折率を n_{effx} 、縦方向の偏光成分に対する実効的な屈折率を n_{effy} 、横方向に平行な方向の柱の幅を w_1 、縦方向に平行な方向の柱の幅を w_2 とする。

【0062】

この時、 n_{effx} と n_{effy} とは、 w_1 と w_2 との組み合わせによって、それぞれ制御できることが知られており、それぞれ、 $n_0 < n_{effx} < n_1$ 、及び、 $n_0 < n_{effy} < n_1$ の値をとる。

【0063】

したがって、 ϕ_x と ϕ_y とは、 w_1 と w_2 との組み合わせによってそれぞれ任意に制御できる。すなわち、図11～図16(後述)に例示するように、構造体 160 の幅である w_1 と w_2 とを設計することで、各偏光方向に対する位相遅延量の ϕ_x と ϕ_y とを任意に設定することが可能である。

【0064】

以上から、本実施の形態では、平面上の位置に応じて、適した幅を有する柱状の構造体 160 をそれぞれ配置することで、各偏光方向に対して任意の位相遅延空間分布を与えることができる。この結果、本実施の形態では、設計波長において各偏光方向に対して任意の波面制御を行うことが可能となる。

【0065】

[位相遅延量]

次に、構造体 160 の構造幅及び各偏光における位相遅延量について説明する。図11～図16は、各偏光における各波長における位相遅延量及び構造体 160 の構造幅の関係を示す図である。図11～図16は、柱状の構造体 160 の構造パラメータ(幅)を、高さは一定の状態、様々な値に設定した場合の、波長(450, 550, 660 nm)の縦偏光或いは横偏光の位相値を示す。

【0066】

10

20

30

40

50

図 1 1 は、波長 4 5 0 n m における横偏光の位相値を示し、図 1 2 は、波長 4 5 0 n m における縦偏光の位相値を示す。図 1 3 は、波長 5 5 0 n m における横偏光の位相値を示し、図 1 4 は、波長 5 5 0 n m における縦偏光の位相値を示す。図 1 5 は、波長 6 5 0 n m における横偏光の位相値を示し、図 1 6 は、波長 6 5 0 n m における縦偏光の位相値を示す。

【 0 0 6 7 】

図 1 1 ~ 図 1 6 に示すように、構造体 1 6 0 の断面形状を適切に設計（寸法設計を含む）することで、各偏光において 0 ~ 2 π の位相値の様々な組み合わせを、様々な設計波長で実現することが可能である。

【 0 0 6 8 】

なお、図 1 1 ~ 図 1 6 では、横偏光及び縦偏光について位相遅延量と構造体 1 6 0 の構造幅との関係を説明したが、これに限らない。本実施の形態では、任意の直交偏光に対して同様の設計を適用できる。例えば、+ 4 5 ° 及び - 4 5 ° 偏光の制御に対しては、図 6 ~ 図 1 0 に示す構造体 1 6 0 の組成構造を、4 5 °、x y 平面上で回転させればよい。また図 1 1 ~ 図 1 6 では、3 波長のみの特性を示したが、任意の波長でも同様の特性が得られる。

【 0 0 6 9 】

このように、実施の形態では、バイナリ構造のみで任意の直交偏光方向に応じて異なる空間位相分布を設計波長に応じて設計でき、後述するように、偏光を分離しながら波長毎に形状の異なる P S F をもつ光学素子 1 2 を設計できる。

【 0 0 7 0 】

なお、構造体 1 6 0 の断面形状は、図 7 及び図 8 に示される長方形の形状に限られない。図 1 7 は、構造体 1 6 0 の断面形状の例を示す図である。図 1 7 に例示されるようなさまざまな断面形状を、構造体 1 6 0 が有してよい。例示される形状は、例えば長方形形状、ひし形形状、十字形状及び楕円形状をさまざまに組み合わせることによって得られる 2 回回転対称形状である。

【 0 0 7 1 】

[レンズの設計例 1]

次に、偏光分離・波長依存 P S F レンズである光学素子 1 2 の設計例について説明する。本実施の形態では、偏光毎に異なる位置を中心に集光し、波長毎に異なる形状の P S F をもつレンズ位相分布を設計し、柱状の構造体 1 6 0 で実現する。

【 0 0 7 2 】

ここでは、図 6 ~ 図 1 0 に示す S i N 組成構造の構造体 1 6 0 を用いて位相分布を設計し、偏光分離・波長依存 P S F 機能を有する光学素子 1 2 を実現した。なお、波長毎に異なる形状の P S F をもつレンズは様々な位相分布から実現できる。

【 0 0 7 3 】

最も簡単な例として、フレネルレンズと同等の位相分布を基に波長毎に異なる P S F をもつ光学素子 1 2 を設計する場合を説明する。この場合、直交する各偏光（ここでは横偏光と縦偏光）に対するレンズの位相分布 ϕ_x 、 ϕ_y は、例えば、式（4）及び式（5）で表される。

【 0 0 7 4 】

【数 4】

$$\phi_x(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda_d} n \left(\sqrt{(x - x_f)^2 + y^2 + z_f^2} - \sqrt{x_f^2 + z_f^2} \right) + C \quad \cdots (4)$$

【 0 0 7 5 】

【数 5】

10

20

30

40

50

$$\varphi_y(x, y) = -\frac{2\pi}{\lambda_d} n \left(\sqrt{(x + x_f)^2 + y^2 + z_f^2} - \sqrt{x_f^2 + z_f^2} \right) + C \quad \dots (5)$$

【 0 0 7 6 】

式(4)及び図(5)において、 (x, y) は、レンズ平面上の空間座標である。 d は、設計波長である。 x_f は、 x 軸に沿った焦点距離(偏芯量)である。 z_f は、 z 軸に沿った焦点距離である。 n は、レンズ透過後の光伝搬空間の屈折率である。 C は、任意の定数である。

【 0 0 7 7 】

図18～図23は、フレネルレンズと同等となるように設計した場合の構造体160が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。図18は、波長450nmにおける横偏光の位相分布を示す。図19は、波長450nmにおける縦偏光の位相分布を示す。図20は、波長550nmにおける横偏光の位相分布を示す。図21は、波長550nmにおける縦偏光の位相分布を示す。図22は、波長650nmにおける横偏光の位相分布を示す。図23は、波長650nmにおける縦偏光の位相分布を示す。

【 0 0 7 8 】

図18～図23に示す例の場合、レンズサイズは0.5mm×1mm、焦点距離 z_f は5.0mm、偏芯量 x_f は0.25mm、設計波長は520nmのパラメータでレンズ設計を行った。 α は、0～2°の範囲に収まるように変換している。例えば、 $\alpha = -0.5^\circ$ 及び 2.5° は、 1.5° 及び 0.5° にそれぞれに変換している。

【 0 0 7 9 】

フレネルレンズと同等の位相分布である偏光分離・波長依存PSFレンズを実現するには、組成構造が有する設計波長における位相遅延量から、式(4)及び式(5)の位相分布に最も適合する構造(各偏光における位相エラーが最小となる構造)の構造体160を、位置毎に選んで配置すればよい。

【 0 0 8 0 】

図18～図23に示すレンズの位相分布の場合、平行光を光学素子12に入射すると、横と縦との偏光成分毎に分離され、焦点距離においてそれぞれ異なる1点を中心として集光する。この場合、設計波長の平行光は、焦点距離においてそれぞれ1点に集光する。すなわち、PSF形状がドット(正確には円レンズの場合ガウス関数、正方形レンズの場合sinc関数)となる。

【 0 0 8 1 】

その他の波長の光は、位相パターンに起因する集光位置の波長依存性、及び、組成構造の位相に対する波長分散により、PSFの大きさが波長に依存して変化する。すなわち、波長に応じて像のぼやけ具合が異なる色収差が生じる。

【 0 0 8 2 】

本実施の形態では、この偏光分離機能と色収差とを利用して、撮像対象に対して偏光成分毎にソートし、それぞれ異なる位置を中心に結像させながら、波長毎に異なる畳み込み演算を施した後、画像取得し、画像再構成によってスペクトル画像を生成することが可能である。

【 0 0 8 3 】

本例では、横偏光及び縦偏光の分離について記述したが、 $+45^\circ / -45^\circ$ 偏光の分離についても同様の設計でよく、横偏光・縦偏光分離パターンと、 $+45^\circ / -45^\circ$ 偏光分離パターン並べて1組とすれば、4つの直線偏光成分の分類および画像化が可能となる(図2参照)。

【 0 0 8 4 】

[レンズの設計例 2]

波長依存PSFレンズである光学素子12の他の設計例について説明する。ここでは、プロペラ形状のPSFをもつ位相分布となるように設計した場合を例に説明する。

10

20

30

40

50

【 0 0 8 5 】

すなわち、PSFの形状が波長に応じて回転するような位相分布を有する光学素子12を設計する。この場合、直交する各偏光（ここでは、横偏光及び縦偏光）に対して異なる集光中心位置をそれぞれ設定すると、レンズの位相分布 ϕ_x 、 ϕ_y は、例えば、式(6)及び式(7)で表される。

【 0 0 8 6 】

【数6】

$$\phi_{x,y}(x,y) = -\frac{\omega(\theta)}{c}n\left(\sqrt{r^2 + f^2} - f\right) + C \quad \dots(6)$$

10

【 0 0 8 7 】

【数7】

$$\left. \begin{aligned} \omega(\theta) &= \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \frac{N}{2\pi} \theta & 0 \leq \theta < \frac{2\pi}{N} \\ \omega(\theta) &= \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \frac{N}{2\pi} \left(\theta - \frac{2\pi}{N}\right) & \frac{2\pi}{N} \leq \theta < \frac{4\pi}{N} \\ &\vdots & \vdots \\ \omega(\theta) &= \omega_{min} + (\omega_{max} - \omega_{min}) \frac{N}{2\pi} \left\{\theta - \frac{2\pi}{N}(N-1)\right\} & \frac{2\pi}{N}(N-1) \leq \theta < 2\pi \end{aligned} \right\} \dots(7)$$

20

【 0 0 8 8 】

式(6)、式(7)において、 r は、レンズ平面上の原点（設計集光中心位置）から距離である。 θ は、レンズ平面上の設計集光中心位置と座標がなす角度である。 c は、真空中の光の速度である。 ω は、 (x,y) の位置での光角周波数である。 ω_{min} は、設計上最小の光角周波数である。 ω_{max} は、設計上最大の光角周波数である。 f は、焦点距離である。 n は、レンズ透過後の光伝搬空間の屈折率である。 C は、任意の定数である。 N は、羽根の数である。

【 0 0 8 9 】

図24～図29は、PSFがプロペラ形状となるように設計した場合の構造体160が有する各偏光に対する位相分布の例を示す図である。図24は、波長450nmにおける横偏光の位相分布を示す。図25は、波長450nmにおける縦偏光の位相分布を示す。図26は、波長550nmにおける横偏光の位相分布を示す。図27は、波長550nmにおける縦偏光の位相分布を示す。図28は、波長650nmにおける横偏光の位相分布を示す。図29は、波長650nmにおける縦偏光の位相分布を示す。

30

【 0 0 9 0 】

図24～図29に示す例の場合、レンズサイズは0.5mm×1mm、焦点距離 f は5.0mm、羽根の数は3、設計波長は420～660nm、集光位置は、横偏光(+0.25mm, 0mm)、縦偏光(-0.25mm, 0mm)のパラメータでレンズ設計を行った。 ϕ_x は、0～2πの範囲に収まるように変換している。例えば、 $\phi_x = -0.5$ 及び 2.5 は、 1.5 及び 0.5 にそれぞれに変換している。

40

【 0 0 9 1 】

プロペラ形状のPSFをもつ位相分布となるような偏光分離・波長依存PSFレンズを実現するには、組成構造がもつ各波長（各角周波数）における位相遅延量から、式(6)、式(7)の位相分布に最も適合する構造（各偏光の位相エラーが最小となる構造）の構造体160を、位置毎に選んで配置すればよい。

【 0 0 9 2 】

図24～図29に示すレンズの位相分布の場合、平行光を光学素子12に入射すると、横と縦との偏光成分毎に分離され、焦点距離においてそれぞれ異なる1点を中心として集光する。さらに、後述するように、PSF形状はプロペラのような形状となり、その羽の

50

数は式(7)中のNに対応する。このPSF形状は、波長に応じて回転し、その大きさはほとんど変化しない。

【0093】

これは、レンズの焦点距離が、波長と回転角 θ とに依存性をもつ位相パターン及び組成構造の位相に対する波長分散に起因する。任意の回転角 θ での設計角周波数 $k(\theta)$ (設計波長 λ) の光のみ設計焦点距離及び焦点位置に集光し、その他の光は焦点距離が前後に変化する。回転角 θ に応じて設計角周波数 $k(\theta)$ が線形的に変化されるため、プロペラ形状のようなPSFが生成され、PSFは、角周波数(波長)に依存して回転する。

【0094】

光学素子12は、以上の偏光分離機能と波長依存PSFを利用して、撮像対象1に対して偏光成分毎にソートし、それぞれ異なる位置を中心に結像させながら、波長毎に異なる畳み込み演算を施すことが可能であり、撮像装置10は、画像取得後、画像再構成によってスペクトル画像を生成することが可能である。

10

【0095】

なお、後述するように、フレネルレンズ型に比べて、PSFの大きさがほぼ一定で、かつ波長依存性が回転という明確な形で生じるプロペラレンズ型の方が再構成において有利であり、より好適である。

【0096】

また、ここでは、横偏光及び縦偏光の分離について記述したが、 $+45^\circ / -45^\circ$ 偏光の分離についても同様の設計でよく、横偏光・縦偏光分離パターンと、 $+45^\circ / -45^\circ$ 偏光分離パターン並べて1組とすれば、4つの直線偏光成分の分類および画像化が可能となる(図2参照)。

20

【0097】

また、式(6)、式(7)は、設計角周波数 $k(\theta)$ がレンズ位置に応じて変化しているが、角周波数を波長に置き換えても同様の効果が得られる。

【0098】

以下、プロペラレンズ型に基づいて設計した光学素子12の実施例を示すが、フレネルレンズ型といったその他の波長依存PSFレンズにおいても同様である。

【0099】

[PSF形状例]

本実施の形態における偏光分離・波長依存PSFレンズのPSF形状の一例を示す。図30~図36は、図24~図29に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めた各偏光及び各波長におけるPSF形状を示す図である。図30~図36に示す例の場合、レンズサイズは1mm×2mm、焦点距離fは10mm、羽根の数は3、設計波長は420~660nm、集光位置は、横偏光(+0.5mm, 0mm)、縦偏光(-0.5mm, 0mm)のパラメータでレンズ設計を行った。

30

【0100】

図30は、波長 $\lambda = 600$ nmにおける横偏光におけるPSF形状である。図31は、波長 $\lambda = 600$ nmにおける縦偏光におけるPSF形状である。図32~図36は、横偏光及び集光点付近(+0.5mm, 0mm)での横偏光におけるPSF形状である。図32は、波長 $\lambda = 450$ nmにおけるPSF形状である。図33は、波長 $\lambda = 500$ nmにおけるPSF形状である。図34は、波長 $\lambda = 550$ nmにおけるPSF形状である。図35は、波長 $\lambda = 600$ nmにおけるPSF形状である。図36は、波長 $\lambda = 650$ nmにおけるPSF形状である。

40

【0101】

図30及び図31に示すように、光学素子12によれば、偏光に応じて集光位置が異なっており、偏光分離が実現できていることがわかる。そして、光学素子12によれば、図32~図36に示すように、羽根が3枚のプロペラ形状のPSFになっており、波長に応じて回転する。図32~図36に示すように、波長の変化によらず、PSF自体の大きさはほぼ変化しない。

50

【0102】

これらのPSFをもつ光学素子12で撮像対象1を撮像すると、偏光成分毎にソートされ、対応する波長のPSFで画像を畳み込んだ結果がイメージセンサ上に結像することになる。なお、本例では、横偏光及び縦偏光の分離について記述したが、 $+45^\circ / -45^\circ$ 偏光の分離についても同様の結果が得られた。

【0103】

[観測画像例]

続いて、図30～図36のPSFを有する光学素子12で自然画像を撮像したシミュレーション結果について説明する。図37は、シミュレーション結果を示す図である。

【0104】

シミュレーションは、公開されているスペクトル画像(ICVL, Boaz Arad and Ohad Ben-Shahar, Sparse recovery of hyperspectral signal from natural rgb images, In European Conference on Computer Vision, pp. 19 - 34, Springer, 2016., [online], [令和2年12月28日検索], インターネット<URL: <http://icvl.cs.bgu.ac.il/hyperspectral/>>)(波長420nm～660nm:25バンド)に対して図30～図36のPSFで波長毎に畳み込み演算し、一般的なカラーイメージセンサのRGB画素の感度を考慮して波長次元に沿って積分することで実施した。なお、図37は、RGBカラー画像をモノクロ表示したものであり、左側の画像が入力スペクトル画像(実画像)であり、右側の画像が、撮像素子11上に結像される畳み込み後の画像(観測画像)である。

【0105】

これは、図30～図36のPSFをもつレンズとカラーイメージセンサとを用いて撮像し、センサから出力されるRGBカラー画像(観測画像)をシミュレートしていることに対応する。

【0106】

なお、Bの光の波長域は420～500nm、Gの光の波長域は、500～600nmであり、Rの光の波長域は、600～660nmとしている。図37では、任意の1つ偏光成分のみ(横偏光)の画像を観測画像として示し、以降では、この横偏光の観測画像に対応する再構成処理について示すが、その他の偏光成分においても同様である。

【0107】

図37に示すように、観測画像は光学素子12のPSFによる畳み込み演算によりぼやけていることがわかる。なお、観測した情報量は実画像の12%(25波長バンドから3色)に圧縮されていることになり、圧縮センシングに基づく画像再構成により、情報を、3色から25波長バンドに復元する。

【0108】

[再構成画像]

次に、撮像装置10による再構成画像の一例について説明する。図38は、撮像装置10による再構成画像の一例を示す図である。図38では、図37に示す観測画像から圧縮センシングに基づく再構成処理を用いてスペクトル画像を生成した例について示す。

【0109】

ここでは、正則化項としてSSTV、最適化問題の解き方としてADMMを用いた。また、図38には、比較のために実画像も示す。なお、図38に示す再構成画像及び実画像は、25バンドのスペクトル画像だが、可視化のためRGB画像で表示したものをモノクロ表示したものである。

【0110】

再構成画像に対し、PSNR(Peak Signal-to-Noise Ratio)、SSIM(Structural Similarity)、SAM(Spectral Angle Mapping)の評価指数で評価を行った。

【0111】

PSNRは、式(8)及び式(9)に示すように、1画素毎の差を評価する指数であり、大きな値(dB)ほど高画質である。各波長の画像のPSNRを計算し、波長全体で平均

10

20

30

40

50

をとることで、スペクトル画像に適用した。

【 0 1 1 2 】

【数 8】

$$\begin{aligned} \text{PSNR} &= 10 \cdot \log_{10} \frac{\text{MAX}_I^2}{\text{MSE}} \\ &= 20 \cdot \log_{10} \frac{\text{MAX}_I}{\sqrt{\text{MSE}}} \end{aligned} \quad \dots(8)$$

10

【 0 1 1 3 】

【数 9】

$$\text{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad \dots(9)$$

【 0 1 1 4 】

SSIMは、構造的類似性であり、式(10)に示すように、周囲ピクセルとの相関を含めた指標である。SSIMが1に近いほど高画質である。各波長の画像のSSIMを計算し、波長全体で平均をとることで、スペクトル画像に適用した。

20

【 0 1 1 5 】

【数 10】

$$\text{SSIM}(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad \dots(10)$$

【 0 1 1 6 】

SAMは、波長スペクトル類似度であり、0に近いほどスペクトルが類似する。各画素のSAMを計算し、画像全体で平均をとることで、スペクトル画像に適用した。

30

【 0 1 1 7 】

再構成画像は、PSNRが29.10dBであり、SSIMが0.9176であり、SAMが、0.1874であった。したがって、撮像装置10により、精度よく画像が再構成されていることがわかる。

【 0 1 1 8 】

[再構成した波長スペクトル]

次に、再構成した波長スペクトルの例について説明する。図39は、図38における再構成画像のx点における波長スペクトルを示す図である。図39には、比較のため、再構成画像(Reconstructed)とともに、実画像(Ground truth)のx点における波長スペクトルも示す。

40

【 0 1 1 9 】

図39に示すように、再構成画像では、実画像とよく一致するスペクトルが得られており、画像再構成により、高精度な情報の復元が実行可能であることがわかる。なお、再構成精度は、光学素子12のPSFの形状のほか、正則化項や最適化問題の解き方によって変化する。

【 0 1 2 0 】

[PSFの形状による再構成精度の比較]

次に、光学素子12におけるPSFの形状による再構成精度を比較した結果を示す。図40は、光学素子12のPSFの形状ごとに再構成精度を比較した結果を示す図である。図41は、図40のPSFの各形状の観測画像に基づいてそれぞれ再構成された再構成画

50

像を示す図である。図 4 1 に示す再構成画像、実画像及びフレネルレンズ画像は、RGB 画像で表示したものをモノクロ表示したものである。

【0121】

図 4 0 では、比較のため、フレネルレンズ型の PSF によるものについても示す。また、図 4 1 には、比較のために、実画像と、フレネルレンズ型とによる再構成画像についても示す。フレネルレンズ型による画像については、大きな色収差を利用して再構成を行っている。

【0122】

図 4 0 及び図 4 1 では、評価指数として、PSNR、SSIM、SAM を用いた。図 4 0 及び図 4 1 における N は羽根の数である。図 4 0 及び図 4 1 は、1 つの偏光成分のみを仮定して計算、評価を行った結果である。なお、レンズのパラメータは、レンズサイズが $0.5 \text{ mm} \times 1.0 \text{ mm}$ 、焦点距離 z_f が 5.0 mm 、偏芯量 x_f が 0.25 mm 、設計波長帯域が $420 \sim 660 \text{ nm}$ である。

10

【0123】

図 4 0 及び図 4 1 に示すように、いずれの評価指数も、羽根の数による大きな違いはなく、フレネルレンズ PSF よりも高い精度を示した。言い換えると、光学素子 1 2 は、羽根の数によらず、フレネルレンズ PSF よりも、高い精度を示した。このため、本実施の形態に係る光学素子 1 2 は、フレネルレンズ型よりもより好適であり、再構成に有利な観測行列を構成するものといえる。

【0124】

[実施の形態の効果]

このように、本実施の形態に係る撮像装置 1 0 では、光学素子 1 2 のみで、偏光成分毎に、光学的に符号化された画像を撮像素子 1 1 上に結像する。本実施の形態では、ハイパースペクトルカメラ光学系と偏光情報取得光学系がメタサーフェスである光学素子 1 2 により一体の光学素子として実現されている。言い換えると、撮像装置 1 0 では、光学素子 1 2 のみによって、偏光分離をしながら、スペクトル画像再構成において効果的な符号化を行うことができる。このため、撮像装置 1 0 の構成要素は、光学素子 1 2 と撮像素子 1 1 と信号処理部 1 3 のみでよく、簡易な装置構成であるとともに偏光情報を取得可能であるハイパースペクトル撮像装置を実現することができる。

20

【0125】

また、撮像装置 1 0 では、光学素子 1 2 と撮像素子 1 1 との間の距離は、通常の撮像装置と同様に、レンズの焦点距離によって決まるため、撮像装置 1 0 のサイズは、同じ視野 F ナンバーを有する通常のカメラと同等となる。

30

【0126】

そして、光学的に符号化された画像は、観測プロセスが既知の場合（ここでは、光学素子 1 2 の PSF とセンサの波長感度特性）、信号処理部 1 3 において、適切な信号処理を行うことで実画像の情報を復元することができる。

【0127】

また、撮像装置 1 0 では、撮像自体（各偏光成分に分離され、符号化された画像の取得）は、シングルショットでよいいため、時間次元の犠牲がなく、再構成処理を除くと、通常カメラと同等の時間分解能が可能である。

40

【0128】

また、撮像装置 1 0 では、偏光分離及び符号化を担う光学素子 1 2 は、微細なバイナリー構造から構成されるため、多段リソグラフィが必要な一般的な回折光学素子に比べ、作製工数の削減が可能であり、厚さも薄く、重さも軽く、作製が容易である。

【0129】

また、微細なバイナリー構造からなる光学素子 1 2 は、一般的な回折光学素子で生じるシャドー効果（回折光学素子による回折光が自身の多段構造によって反射・散乱してしまう現象）に起因する光透過率低下や最大レンズ開口数（NA）の制限がないため、より高い NA のレンズ（光利用効率が高い明るいレンズ）を実現できる。

50

【 0 1 3 0 】

なお、本実施の形態では、撮像素子 1 1 がカラーイメージセンサの場合に基づく実施例を示したが、モノクロイメージセンサの場合においても、符号化された画像取得の際に 3 c h (R G B : カラー) が 1 c b (モノクロ) となる以外は、同様である。

【 0 1 3 1 】

[実施の形態の変形例 1]

本変形例 1 では、撮像素子 1 1 の画素上における像の重なり (クロストーク) を軽減可能な変形例について説明する。

【 0 1 3 2 】

本変形例 1 では、撮像素子 1 1 及び光学素子 1 2 の一部を、撮像ユニットとして説明する。図 4 2 は、図 1 に示す光学素子 1 2 を適用した撮像ユニットの平面図である。なお、透明基板 1 9 0 は省略している。図 4 3 は、図 4 2 の A - A ' 線で撮像ユニットを切断した場合の断面図である。

10

【 0 1 3 3 】

図 4 2 及び図 4 3 に示すように、隣接する各レンズパターンにおいて、撮像素子 1 1 の各像の境界付近 (領域 1 1 - 1 及び領域 1 1 - 2 の境界付近) で、像の重なり (クロストーク) が生じる懸念がある。この像の重なりは、再構成後の画像の劣化や偏光消光比 (所望の偏光成分 / その他の偏光成分) の劣化に繋がる可能性がある。

【 0 1 3 4 】

図 4 4 は、実施の形態の変形例 1 に係る撮像ユニットの平面図である。なお、透明基板 1 9 0 は省略している。図 4 5 は、図 4 4 の B - B ' 線で撮像ユニットを切断した場合の断面図である。

20

【 0 1 3 5 】

図 4 4 及び図 4 5 に示すように、撮像ユニット 2 0 0 では、像の重なりを避けるために、光学素子 1 2 の第 1 のレンズパターン領域 1 2 - 1 及び第 2 のレンズパターン領域 1 2 - 2 (偏光分離領域) の境界直下に障壁 2 4 0 を設けた構成を有する。

【 0 1 3 6 】

この障壁 2 4 0 は、光を吸収し迷光が生じない材料によって構成されたもの、または、同様の機能を付加する表面加工が施されたものが望ましい。

【 0 1 3 7 】

この障壁 2 4 0 は偏光分離・波長依存 P S F レンズである光学素子 1 2 と、撮像素子 1 1 との間に設けられている。障壁 2 4 0 によって第 1 のレンズパターン領域 1 2 - 1 及び第 2 のレンズパターン領域 1 2 - 2 間の影響を完全に遮断すれば、像の重なりは完全に除去できる。

30

【 0 1 3 8 】

なお、部分的な障壁であっても、像の重なりの影響を軽減できる効果をもっており、用途や作製や実装プロセスに合わせて、障壁高さおよび位置を決定すればよい。

【 0 1 3 9 】

[実施の形態の変形例 2]

本変形例 2 では、撮像素子 1 1 の画素上における像の重なり (クロストーク) の軽減が可能であり、かつ、偏光消光比の向上が可能である変形例について説明する。

40

【 0 1 4 0 】

本変形例 2 では、撮像素子 1 1 及び光学素子 1 2 の一部を、撮像ユニットとして説明する。図 4 6 は、図 1 に示す光学素子 1 2 を適用した撮像ユニットの平面図である。なお、透明基板 1 9 0 は省略している。図 4 7 は、図 4 6 の C - C ' 線で撮像ユニットを切断した場合の断面図である。

【 0 1 4 1 】

図 4 6 及び図 4 7 に示すように、同一レンズパターン (例えば、第 1 のレンズパターン領域 1 2 - 1) において、偏光分離後、撮像素子 1 1 の、 0° の偏光成分に対応する画像が結像される領域 1 1 - 1 a と 90° の偏光成分に対応する画像が結像される領域 1 1 -

50

1 b とに形成された 2 つの像において、像の重なり（クロストーク）が生じる懸念がある。この像の重なりは、再構成後の画像の劣化や偏光消光比（所望の偏光成分 / その他の偏光成分）の劣化に繋がる可能性がある。

【0142】

図 4 8 は、実施の形態の変形例 2 に係る撮像ユニットの平面図である。なお、透明基板 190 は省略している。図 4 9 は、図 4 8 の B - B' 線で撮像ユニットを切断した場合の断面図である。

【0143】

図 4 8 及び図 4 9 に示すように、撮像ユニット 200 A では、像の重なりを避けるために、光学素子 12 と撮像素子 11 との間に、複数の偏光フィルタ 250 を設けた構成となっており、それぞれが光学素子 12 によって空間的に偏光分離される光の結像位置に対応している。

10

【0144】

したがって、レンズによって分離された各偏光成分からなる光は、対応する偏光フィルタを必ず透過する。その後、撮像素子 11 上においてそれぞれの光は結像する。この際、分離された光の偏光方向と対応する偏光フィルタ 250 の偏光透過軸とを一致させる。

【0145】

このように、撮像ユニット 200 A では、光学素子 12 と撮像素子 11 との間に、直下に位置する前記画像が対応する偏光方向と偏光透過軸とを一致させた偏光フィルタを設ける。これによって、撮像ユニット 200 A では、所望の偏光成分以外の成分をカットした状態で、撮像素子 11 の画素 130 上に光を導くことができるため、異なる偏光成分からなる像の境界付近における像の重なりを完全に除去することができる。したがって、撮像ユニット 200 A によれば、像のクロストークを大きく軽減することができる。

20

【0146】

さらに、撮像ユニット 200 A では、光学素子 12 と偏光フィルタ 250 とによる二重の偏光フィルタリングを行うこととなる。これは、偏光消光比を向上させることに繋がることから、撮像ユニット 200 A では、偏光画像の質の向上も実現することができる。

【0147】

なお、偏光フィルタ 250 を併用する撮像ユニット 200 A では、高い光利用効率を保持したまま、上記の効果を付加できる。これは、偏光分離後に偏光フィルタリングを行うため、画素アレイ上に到達する総光量をほとんど減らすことがないためである。

30

【0148】

なお、撮像ユニット 200 A は、図 4 4 及び図 4 5 に示す障壁 240 をさらに設けることも可能である。偏光フィルタ 250 と障壁 240 とを併用することによって、各偏光画像のクロストークをほぼなくし、より高画質な偏光スペクトル画像を生成できる。

【0149】

[レンズ構造例]

光学素子 12 は、図 3 及び図 4 に示す構成に制限されることはなく、構造体 160 の数や間隔、構造形状、配列パターンにおいて様々な形態をとり得る。また、構造体 160 は、それぞれが接続されていてもよく、また透明材料内に埋め込まれた形態でもよい。

40

【0150】

図 3 及び図 4 では、光学素子 12 が透明基板 190 の底面に形成されているがこれに限らない。図 5 0 ~ 図 5 5 は、実施の形態に係る光学素子 12 の断面の一部の他の例を模式的に示す図である。

【0151】

図 5 0 に示すように、光学素子 12 の構造体 160 は、透明基板 190 A の上面に形成されてもよい。この場合、構造体 160 は、透明基板 190 A に支持されている。構造体 160 の上方の透明層は、空気でも樹脂などの保護層でもよく、透明層の材料は単一でよいし、複数の材料が層状になったものでもよい。

【0152】

50

また、図 5 1 に示すように、光学素子 1 2 の構造体 1 6 0 は、透明基板 1 9 0 B 内に埋め込まれていてもよい。透明基板 1 9 0 B の材料は単一でもよいし、複数の材料が層状になったものでもよい。

【 0 1 5 3 】

また、図 5 2 に示すように、光学素子 1 2 の構造体 1 6 0 は、透明基板 1 9 0 C の両面に形成されていてもよい。上述した偏光分離・波長依存 P S F 機能を、透明基板 1 9 0 C の両面の構造体 1 6 0 で実現してもよい。また、波長依存 P S F 機能を、透明基板 1 9 0 C の構造体 1 6 0 で実現してもよく、もう片面でフィルタやスプリッタ、遮光層などその他の光学機能を実現してもよい。構造体 1 6 0 上方の透明層は空気でも樹脂などの保護層でもよく、透明層の材料は単一でもよいし、複数の材料が層状になったものでもよい。

10

【 0 1 5 4 】

また、図 5 3 に示すように、光学素子 1 2 の構造体 1 6 0 は、屈折レンズ 1 9 0 D 上に形成されていてもよい。構造体 1 6 0 は、屈折レンズ 1 9 0 D 上に支持されている。屈折レンズ 1 9 0 D は、波長依存集光特性の集光性能向上（高い N A 化など）において有益である。なお、以降で説明する屈折レンズ 1 9 0 E , 1 9 0 F でも同様である。構造体 1 6 0 上方の透明層は、空気でも樹脂などの保護層でもよい。屈折レンズ 1 9 0 D の材料は単一でもよい、複数の材料が層状になったものでもよい。

【 0 1 5 5 】

また、図 5 4 に示すように、光学素子 1 2 の構造体 1 6 0 は、屈折レンズ 1 9 0 E 内に埋め込まれていてもよい。屈折レンズ 1 9 0 E の材料は、単一でもよいし、複数の材料が層状になったものでもよい。

20

【 0 1 5 6 】

また、図 5 5 に示すように、光学素子 1 2 の構造体 1 6 0 は、屈折レンズ 1 9 0 F の両面に形成されていてもよい。上述した波長依存 P S F 機能を、屈折レンズ 1 9 0 F の両面の構造体 1 6 0 で実現してもよい。また、波長依存 P S F 機能を、屈折レンズ 1 9 0 F の構造体 1 6 0 で実現してもよく、もう片面でフィルタやスプリッタ、遮光層などその他の光学機能を実現してもよい。構造体 1 6 0 上方の透明層は空気でも樹脂などの保護層でもよい。屈折レンズ 1 9 0 F の材料は単一でもよいし、複数の材料が層状になったものでもよい。

【 0 1 5 7 】

また、図 5 0 ~ 図 5 5 では省略しているが、遮光膜パターンなどを同一平面上または裏面に施してもよい。

30

【 0 1 5 8 】

なお、実施の形態では、構造体 1 6 0 の材料として、T i O₂ 及び S i N を例に挙げて説明した。ただし、構造体 1 6 0 の材料はそれらに限定されない。例えば、波長が 3 8 0 n m ~ 1 0 0 0 n m の光（可視光 ~ 近赤外光）の光に対しては、S i N の他に、S i C、T i O₂、G a N 等が構造体 6 の材料として用いられてよい。屈折率が高く、吸収損失が少ないため適している。波長が 8 0 0 ~ 1 0 0 0 n m の光（近赤外光）で用いる場合は、S i、S i C、S i N、T i O₂、G a A s、G a N 等が構造体 6 の材料として用いられてよい。低損失であるため適している。長波長帯の近赤外領域（通信波長である 1 . 3 μ m や 1 . 5 5 μ m 等）の光に対しては、上述の材料に加えて、I n P 等を構造体 1 6 0 の材料として用いることができる。

40

【 0 1 5 9 】

また、構造体 1 6 0 が、貼り付け、塗布等によって形成される場合、フッ素化ポリイミド等のポリイミド、B C B（ベンゾシクロブテン）、光硬化性樹脂、U V エポキシ樹脂、P M M A 等のアクリル樹脂、レジスト全般などのポリマー等が材料として挙げられる。

【 0 1 6 0 】

また、実施の形態では、透明層 1 5 0 の材料として S i O₂ 及び空気層を想定した例を示したが、これらに限定されない。一般的なガラス材料等も含め、構造体 1 6 0 の材料の屈折率より低い屈折率を有し、入射光の波長に対して低損失なものであればよい。透明層

50

150は、対応する画素に到達すべき光の波長に対して十分に低損失であればよいため、カラーフィルタと同様の材質であってもよく、例えば樹脂などの有機材料であってもよい。この場合、単に透明層150がカラーフィルタと同様の材質であるばかりでなく、カラーフィルタと同様の構造を持ち、対応する画素に導かれるべき光の波長に応じた吸収特性を持つよう設計されていてもよい。

【0161】

また、実施の形態では、画素の対応する色として、RGBの3原色を例に挙げて説明したが、画素は、近赤外光及び3原色以外の波長の光（例えば、赤外光、紫外光等）にも対応してよい。

【0162】

また、実施の形態では、構造体160の形状として、長方形形状、ひし形形状、十字形状及び楕円形状の断面形状を有する構造体を用いられる例について説明した。この形状は一例であり、1種類の構造体（例えば長方形形状のみ）が用いられてもよいし、2種類以上の構造体（例えば長方形形状と十字形状のみ）が用いられてもよい。

【0163】

以上、本発明を具体的な実施の形態に基づいて説明したが、本発明は前記実施の形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲において種々変更可能であることは言うまでもない。

【符号の説明】

【0164】

- 1 撮像対象
- 10 撮像装置
- 11 撮像素子
- 12 光学素子
- 13 信号処理部
- 130 画素
- 150 透明層
- 160 構造体
- 190, 190A ~ 190C 透明基板
- 190D ~ 190F 屈折レンズ

10

20

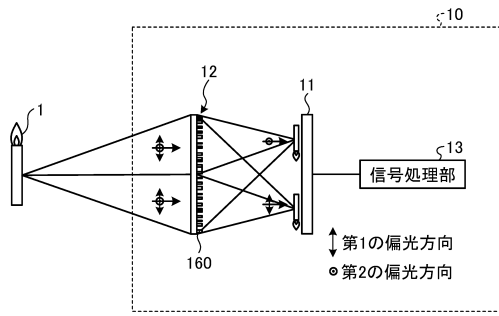
30

40

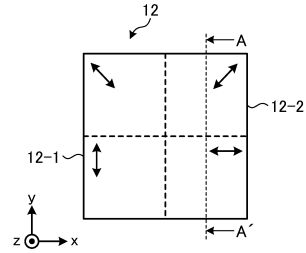
50

【図面】

【図 1】

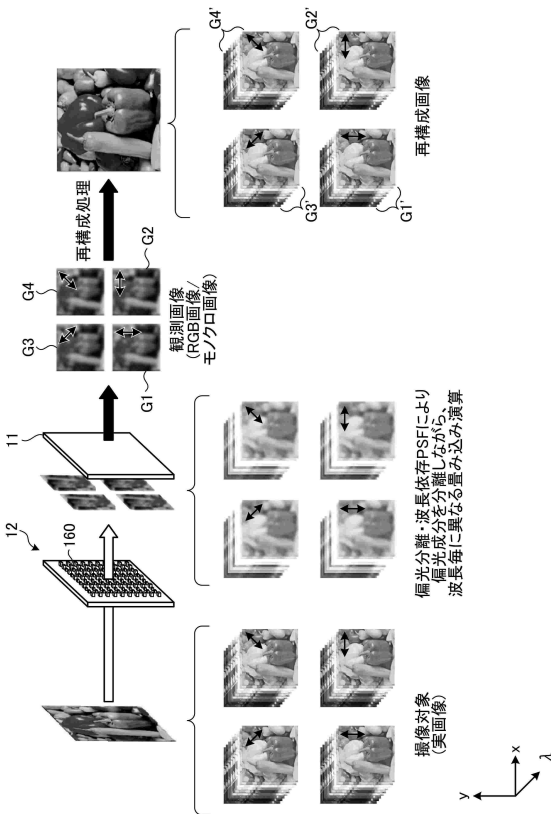


【図 2】

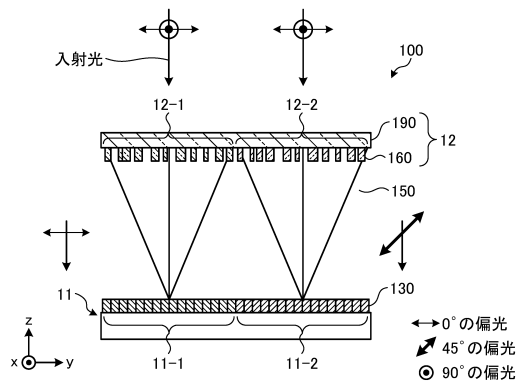


10

【図 3】



【図 4】



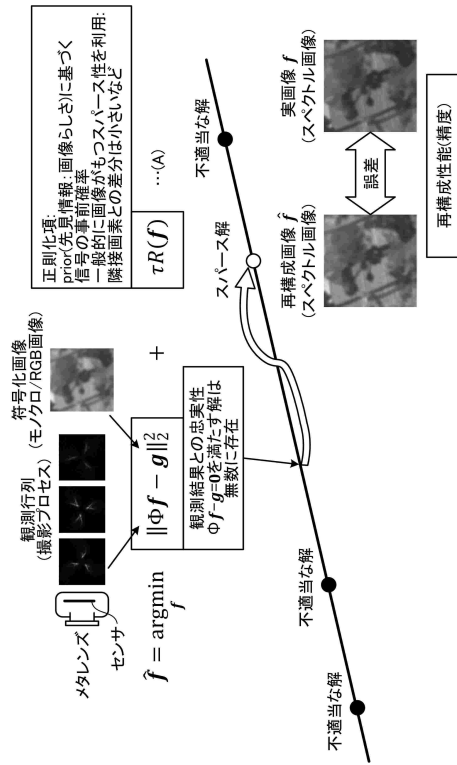
20

30

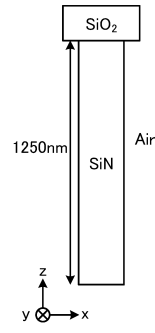
40

50

【 図 5 】



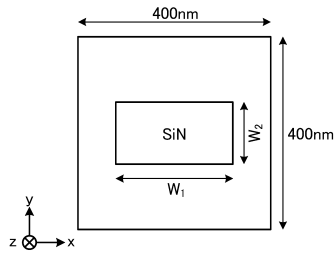
【 図 6 】



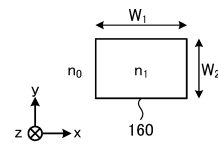
10

20

【 図 7 】



【 図 8 】

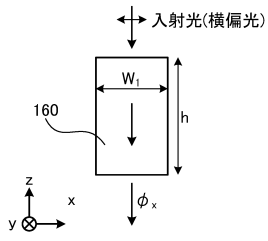


30

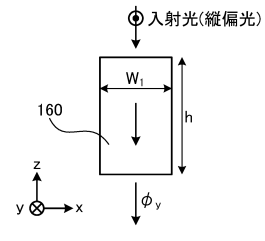
40

50

【 図 9 】

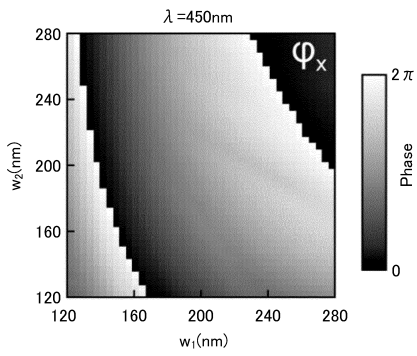


【 図 1 0 】

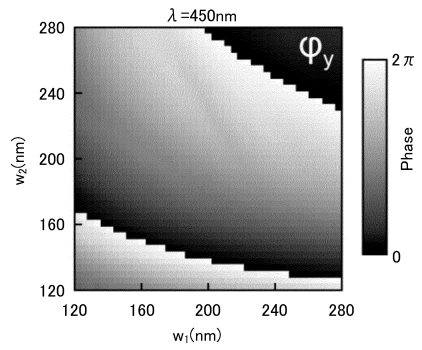


10

【 図 1 1 】



【 図 1 2 】



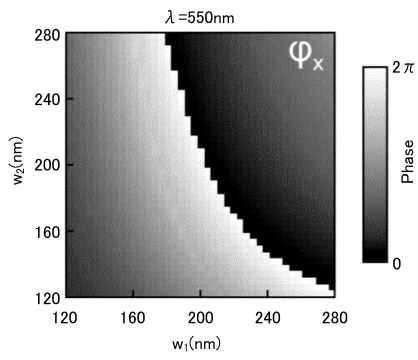
20

30

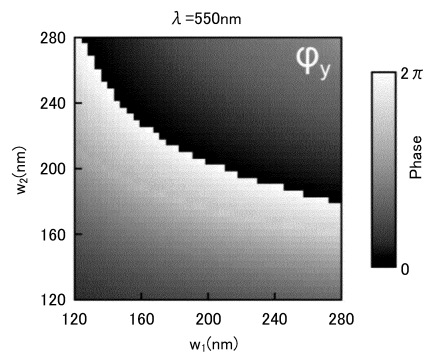
40

50

【 1 3 】

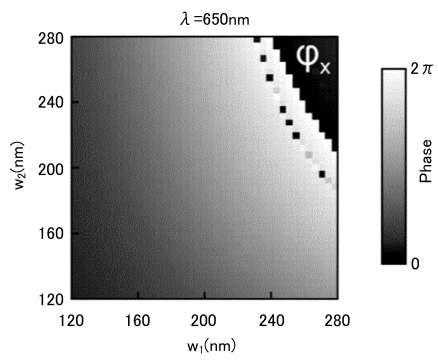


【 1 4 】

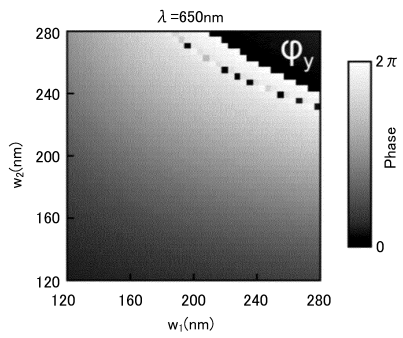


10

【 1 5 】



【 1 6 】



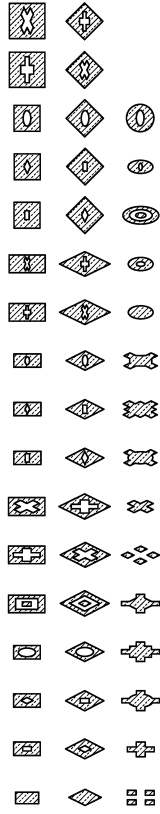
20

30

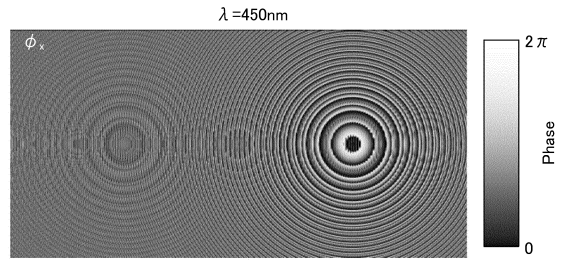
40

50

【 図 1 7 】

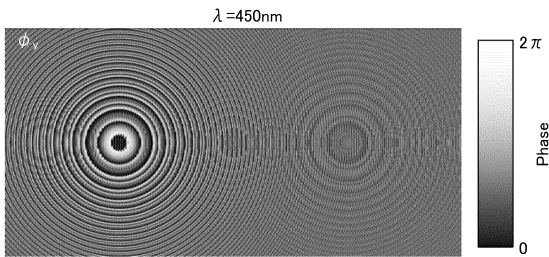


【 図 1 8 】

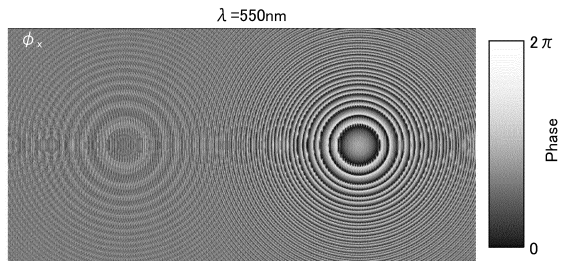


10

【 図 1 9 】



【 図 2 0 】

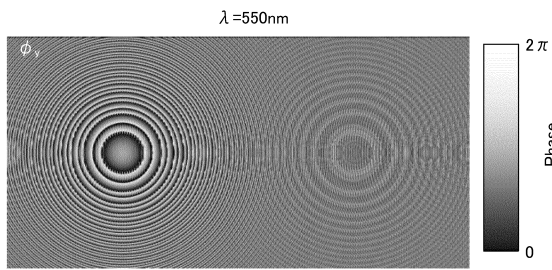


30

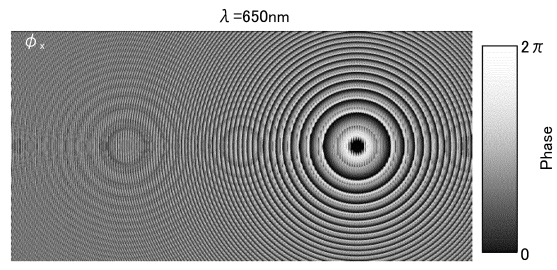
40

50

【 2 1 】

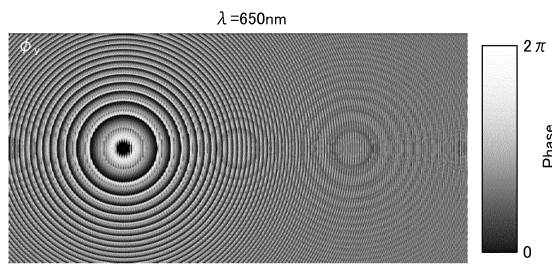


【 2 2 】

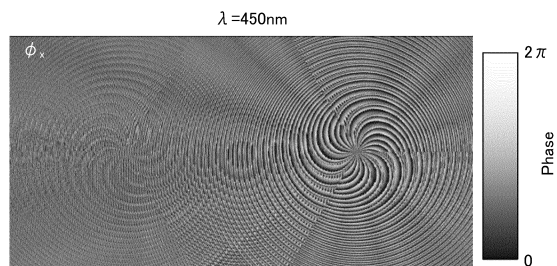


10

【 2 3 】



【 2 4 】



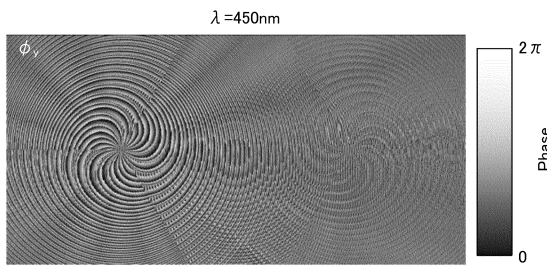
20

30

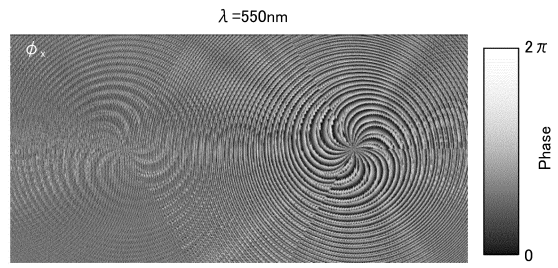
40

50

【 2 5 】

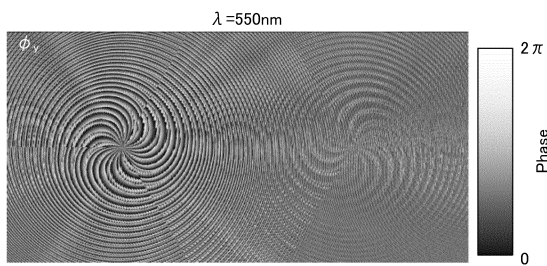


【 2 6 】

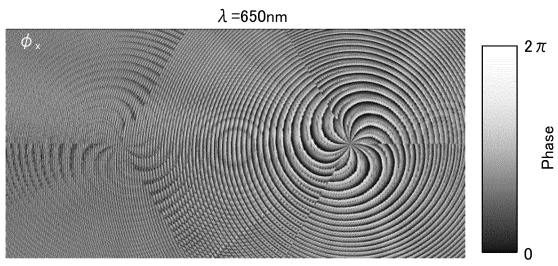


10

【 2 7 】



【 2 8 】



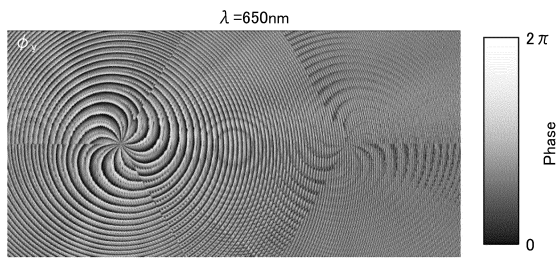
20

30

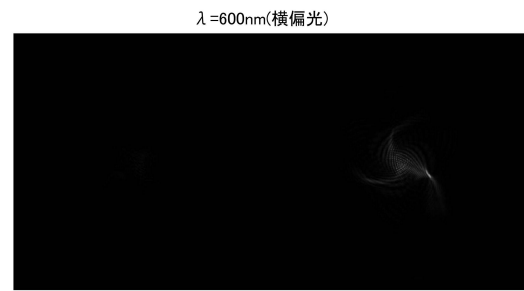
40

50

【 図 2 9 】

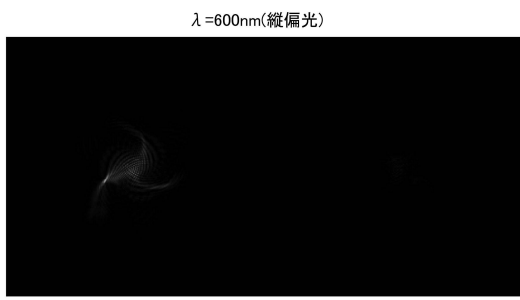


【 図 3 0 】

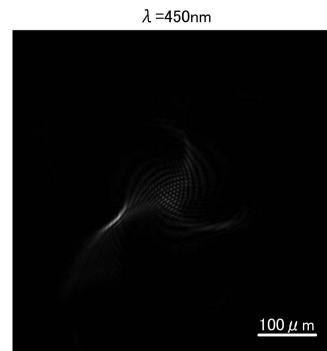


10

【 図 3 1 】



【 図 3 2 】



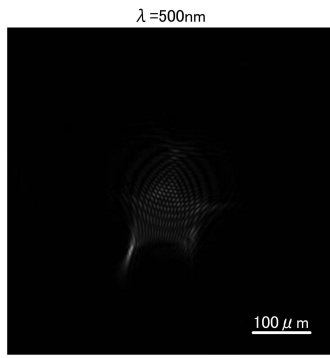
20

30

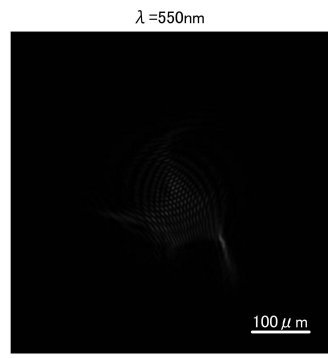
40

50

【 図 3 3 】

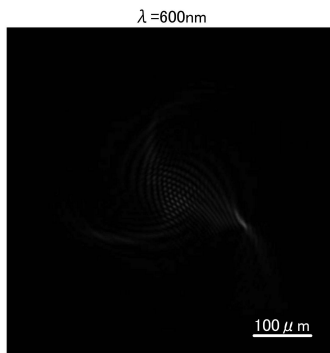


【 図 3 4 】

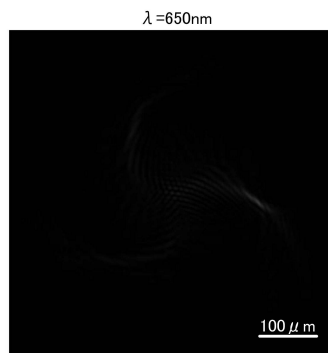


10

【 図 3 5 】



【 図 3 6 】



20

30

40

50

【図 3 7】



入力スペクトル画像: 実画像
(128 × 128 × 25)



畳み込み後の画像: 観測画像
(128 × 128 × 3: 圧縮比12%)

【図 3 8】



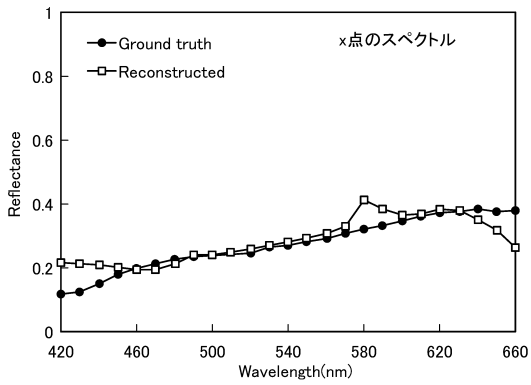
実画像



再構成画像
(PSNR=29.10dB/SSIM=
0.9176/SAM=0.1874)

10

【図 3 9】



【図 4 0】

	N=1	N=2	N=3	N=4	Fresnel
PSNR(dB)	29.13	28.90	29.11	28.87	28.55
SSIM	0.9212	0.9190	0.9187	0.9165	0.9070
SAM	0.1926	0.1863	0.1877	0.1929	0.2199

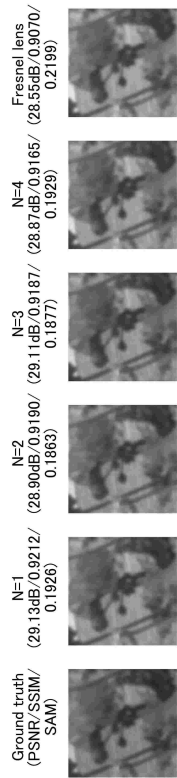
20

30

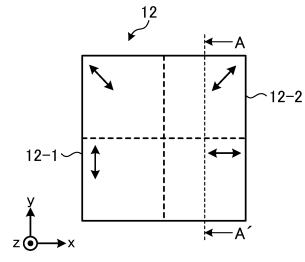
40

50

【 図 4 1 】



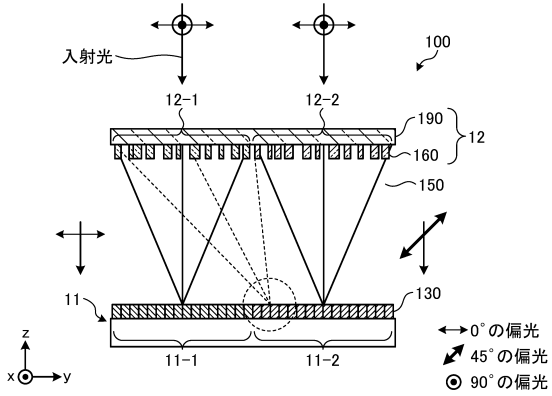
【 図 4 2 】



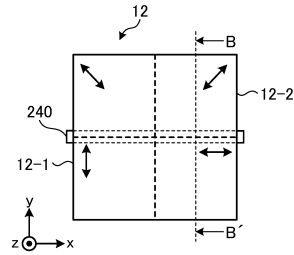
10

20

【 図 4 3 】



【 図 4 4 】

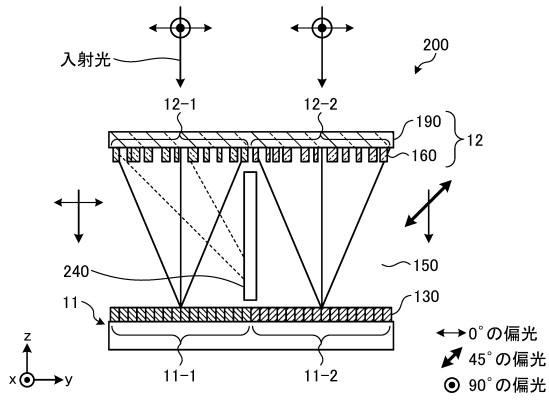


30

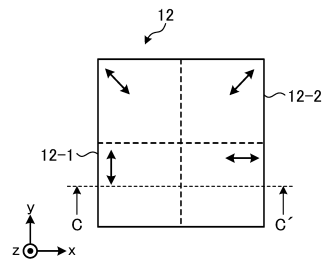
40

50

【図 4 5】

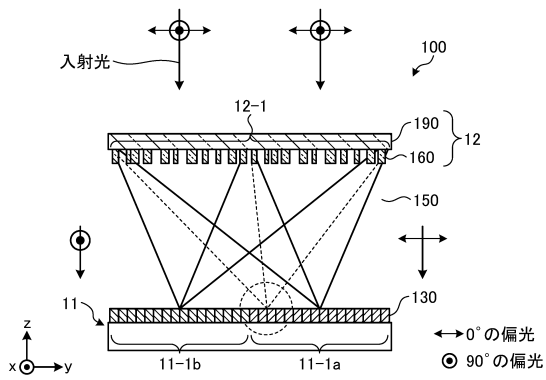


【図 4 6】

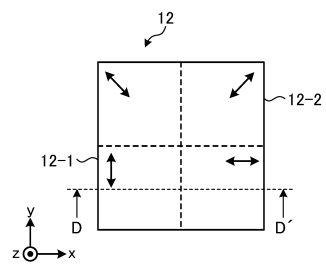


10

【図 4 7】



【図 4 8】



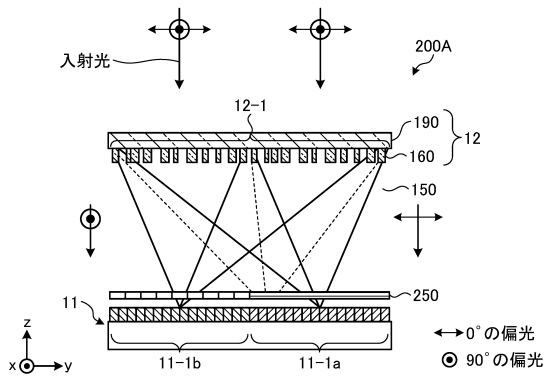
20

30

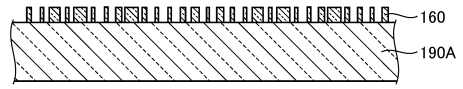
40

50

【図 49】



【図 50】

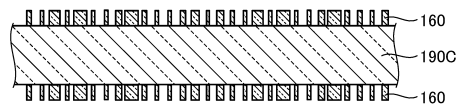


10

【図 51】



【図 52】



20

30

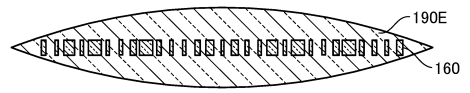
40

50

【 5 3 】

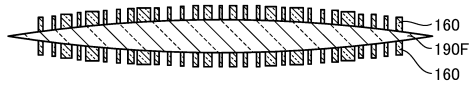


【 5 4 】



10

【 5 5 】



20

30

40

50

フロントページの続き

- 東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 根本 成
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 橋本 俊和
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- 審査官 辻本 寛司
- (56)参考文献 特開2018-107794(JP,A)
国際公開第2019/148200(WO,A1)
国際公開第2020/066738(WO,A1)
Daniel S. JEON et al., " Compact snapshot hyperspectral imaging with diffracted rotation " ,
ACM Transactions on Graphics , 2019年07月12日 , Vol. 38, No. 4 , p.1-13 , DOI: 10.1145/
/3306346.3322946
Vincent SITZMANN et al. , " End-to-end optimization of optics and image processing for achromatic extended depth of field and super-resolution imaging " , ACM Transactions on Graphics , 2018年07月30日 , Vol. 37, No. 4 , p.1-13 , DOI: 10.1145/3197517.3201333
Masashi MIYATA et al. , " Compound-eye metasurface optics enabling a high-sensitivity, ultra-thin polarization camera " , Optics Express , 2020年03月23日 , Vol. 28, No. 7 , p.9996 , DOI: 10.1364/OE.389591
- (58)調査した分野 (Int.Cl. , DB名)
H04N 25 / 10
H04N 23 / 12
H04N 23 / 95
JSTPlus / JMEDPlus / JST7580 (J Dream III)