(19)日本国特許庁(JP)

# (12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7704158号
(P7704158)

(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

| | | | |
|---|---|---|---|
| *Ｈ０４Ｎ　25/10　(2023.01)* | | Ｈ０４Ｎ | 25/10 |
| *Ｈ０４Ｎ　23/12　(2023.01)* | | Ｈ０４Ｎ | 23/12 |
| *Ｈ０４Ｎ　23/95　(2023.01)* | | Ｈ０４Ｎ | 23/95 |

ＦＩ

請求項の数　4　（全26頁）

(21)出願番号　特願2022-577891(P2022-577891)
(86)(22)出願日　令和3年1月27日(2021.1.27)
(86)国際出願番号　PCT/JP2021/002910
(87)国際公開番号　WO2022/162801
(87)国際公開日　令和4年8月4日(2022.8.4)
審査請求日　令和5年5月10日(2023.5.10)

(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
(74)代理人　110002147
弁理士法人酒井国際特許事務所
(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
(72)発明者　曽我部 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
(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
(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前記撮像素子に結像し、

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、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の結像を実現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の結像を実現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４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】

$P$:配置周期
$\lambda_{min}$: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
$P \leqq \lambda_{min}/n_0$ ・・・(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
$\lambda_r$: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
$h \geqq \lambda_r/(n_1 - n_0)$ ・・・(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、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。

【請求項４】
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し、各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像を、光電変換素子を含む複数の画素が配置された撮像素子に結像し、
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、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の結像を実現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の結像を実現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４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。

【数３】

$P$:配置周期
$\lambda_{min}$: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
$P \leqq \lambda_{min}/n_0$ ・・・(3)

【数４】
$n_0$:透明基板の屈折率
$n_1$:構造体の屈折率
$h$:構造体の高さ
$\lambda_r$: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
$h \geqq \lambda_r/(n_1 - n_0)$ ・・・(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。
【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。一般に、実用化されているハイパースペクトルカメラとして、ラインスキャン型がある。また、圧縮センシング型のハイパースペクトルカメラの研究が進められている。
【先行技術文献】
【非特許文献】
【０００３】
【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 Conference 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】
【０００４】
ラインスキャン型のハイパースペクトルカメラは、スリットにより、空間１次元の光のみを入射させ、分光素子（プリズムやグレーティング）により波長分離、２次元のイメージセンサで空間１次元×波長１次元を取得する。ラインスキャン型のハイパースペクトルカメラは、スリットの位置（または撮像対象自体）をスキャンしながら複数回撮影することで、空間２次元×波長１次元の画像を生成する。
【０００５】
ラインスキャン型の場合、分光素子による波長分離により直接波長情報を取得するため、波長スペクトルの精度がよいという利点がある。一方、ラインスキャン型のハイパースペクトルカメラは、波長分離に必要な長い光路長とスキャン機構により装置が大型となり、複数撮影により時間分解能が低い（動体を撮像できない）という欠点があった。
【０００６】

圧縮センシング型のハイパースペクトルカメラは、撮像対象に対して、光学的な符号化（光情報の操作・演算）を施し撮像、自然画像がもつスパース性を利用した再構成処理を用いて空間情報と波長情報を復元する。

【０００７】

圧縮センシング型のハイパースペクトルカメラは、少ない情報量から精度よく元の情報を復元するため、上記の他の方法に比べて、情報量の欠如が少ない（空間や時間次元を犠牲にしない）上に、一般的にシングルショット動作であるという利点がある。一方、圧縮センシング型のハイパースペクトルカメラは、光学的な符号化に大規模かつ複雑な光学系が一般的に必要であるため、作製工数が多く、装置も大型化するという欠点があった。なお、多段リソグラフィが必要な多段回折光学素子を用いて簡略化した光学系で符号化することも可能だが、作製工数が多く、また原理的な制約（シャドー効果など）により、光透過率や光学系の開口数（またはＦ値）に制約がある。

【０００８】

本発明は、上記に鑑みてなされたものであって、簡易な装置構成のハイパースペクトル撮像装置及び簡易な装置構成の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】

【０００９】

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し、各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像を撮像素子に結像し、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、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。

【００１０】

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、波長毎に異なる点拡がり関数を有した状態で光を出力し、各波長の点拡がり関数が畳み込まれている画像を撮像素子に結像し、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。

【発明の効果】

【００１１】

本発明によれば、簡易な装置構成の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】

【００１２】

【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。

【図３】図３は、実施の形態に係る撮像素子及び光学素子の断面の一部を模式的に示す図である。

【図４】図４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５】図５は、構造体の概略構成の例を示す図である。

【図６】図６は、構造体の概略構成の例を示す図である。

【図７】図７は、構造体の構造幅及び各波長における位相遅延量を示す図である。

【図８】図８は、構造体の断面形状の例を示す図である。

【図９】図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位相分布の例を示す図である。

【図１０】図１０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

位相分布の例を示す図である。
【図１１】図１１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位相分布の例を示す図である。
【図１２】図１２は、点拡がり関数（ＰＳＦ）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位相分布の例を示す図である。
【図１３】図１３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が有する位相分布の例を示す図である。
【図１４】図１４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が有する位相分布の例を示す図である。
【図１５】図１５は、図１２～図１４に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めたＰＳＦ形状を示す図である。
【図１６】図１６は、図１２～図１４に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めたＰＳＦ形状を示す図である。
【図１７】図１７は、図１２～図１４に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めたＰＳＦ形状を示す図である。
【図１８】図１８は、図１２～図１４に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めたＰＳＦ形状を示す図である。
【図１９】図１９は、図１２～図１４に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めたＰＳＦ形状を示す図である。
【図２０】図２０は、シミュレーション結果を示す図である。
【図２１】図２１は、撮像装置による再構成画像の一例を示す図である。
【図２２】図２２は、図２１における再構成画像の×点における波長スペクトルを示す図である。
【図２３】図２３は、光学素子１２のＰＳＦの形状による再構成精度を比較した結果を示す図である。
【図２４】図２４は、図２３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像を示す図である。
【図２５】図２５は、実施の形態に係る光学素子の断面の一部の他の例を模式的に示す図である。
【図２６】図２６は、実施の形態に係る光学素子の断面の一部の他の例を模式的に示す図である。
【図２７】図２７は、実施の形態に係る光学素子の断面の一部の他の例を模式的に示す図である。
【図２８】図２８は、実施の形態に係る光学素子の断面の一部の他の例を模式的に示す図である。
【図２９】図２９は、実施の形態に係る光学素子の断面の一部の他の例を模式的に示す図である。
【図３０】図３０は、実施の形態に係る光学素子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】
【００１３】
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、“＾Ａ”と記載する場合は「“Ａ”の直上に“＾”が記された記号」と同等であるとする。
【００１４】
［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に示す撮像装置１０が画像を取得するまでの処理を示す概略図である。

【００１５】

図１に示すように、実施の形態に係る撮像装置１０は、光学素子１２、撮像素子１１及び信号処理部１３を有する。撮像素子１１は、ＣＣＤやＣＭＯＳ等の光電変換素子を有する。信号処理部１３は、撮像素子１１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。

【００１６】

図１及び図２に示すように、撮像装置１０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１２により撮像素子１１上に光学像を形成する。

【００１７】

光学素子１２は、微細なバイナリー構造からなる。言い換えると、光学素子１２は、複数の微細な柱状の構造体１６０を有する。そして、光学素子１２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。光学素子１２は、波長に応じて明確に異なる形状のＰＳＦ（Point spread function：点拡がり関数）をもつレンズ（波長依存ＰＳＦ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１２は、波長依存ＰＳＦレンズであり、この光学素子１２で物体を撮像すると、実画像に対して波長毎に異なるＰＳＦで畳み込み演算がなされ、その結果が撮像素子上で結像する。

【００１８】

撮像素子１１は、波長依存ＰＳＦレンズである光学素子１２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取得する。信号処理部１３は、圧縮センシングに基づいて、被写体の空間情報とスペクトル情報を観測画像から再構成する処理を行うことにより、スペクトル画像を生成する。

【００１９】

なお、撮像装置１０は、赤外光カットの光学フィルタ、電子シャッタ、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１２、撮像素子１１、信号処理部１３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。

【００２０】

［レンズ及び撮像素子］

続いて、実施の形態における光学素子１２及び撮像素子１１の概略を説明する。撮像素子１１は、各々が光電変換素子を含む複数の画素が２次元アレイ状に複数配列される。光学素子１２は、波長毎に異なるＰＳＦを有しており、実画像に対して波長毎に異なるＰＳＦが畳み込まれている画像を撮像素子１１に結像する機能を有する複数の微細な構造体が全面に配列される。

【００２１】

図３は、実施の形態に係る撮像素子及び光学素子の断面の一部を模式的に示す図である。また、図３以降では、ｘｙｚ座標系が示される。ｘｙ平面方向は、後述する撮像素子１１、透明基板１９０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。

【００２２】

図３に示すように、光学素子１２は、撮像素子１１に対向して配置される。撮像素子１１及び光学素子１２　は、ｚ軸正方向にこの順に設けられる。

【００２３】

撮像素子１１は、配線層１８０と、ｘｙ平面方向に配値された複数の画素１３０とを有

する。各画素１３０は、各々が光電変換素子を含んで構成される。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$\lambda_0$とすると、６００ｎｍ＜$\lambda_0$≦８００ｎｍである。緑色の光の波長帯域の例は、５００ｎｍ＜$\lambda_0$≦６００ｎｍである。青色の光の波長帯域の例は、$\lambda_0$≦５００ｎｍ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。

【００２４】

入射した光は、ｚ軸負方向に沿って進み、光学素子１２を介して撮像素子１１に到達する。撮像素子１１の各画素に発生した電荷は、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１８０を介して撮像ユニット１００の外部に出力される。図３では、配線層１８０に含まれる配線のいくつかが図示される。

【００２５】

光学素子１２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１２は、撮像素子１１を覆うように設けられる。光学素子１２は、透明基板１９０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１６０によって構成される。複数の構造体１６０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１６０は、複数の画素を覆うために撮像素子１１上に形成された透明層１５０内に形成される。

【００２６】

透明基板１９０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１５０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１９０及び透明層１５０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１６０は、側面視したときに、同じ高さを有する。複数の構造体１６０は、透明層１５０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。

【００２７】

光学素子１２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１６０に相当）を含んで構成される。複数の構造体１６０は、ｘｙ平面と平行な面で切断した際の各々の断面形状が、４回回転対称形状である。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１２は、この構造体１６０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次元構造の場合、２次元構造よりも設計自由度が向上する。

【００２８】

光学素子１２は、波長に応じて異なるＰＳＦを有し、これにより撮像対象１からの光の波長に応じて、結像特性（ぼやけ具合）が異なる。撮像対象１からの光は、波長依存ＰＳＦ機能を有する光学素子１２により、撮像素子１１上に結像され、画像（ＲＧＢ画像またはモノクロ画像）として取得される。

【００２９】

取得画像は、撮像対象（実画像）１に対して光学素子１２の波長依存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。光学素子１２及び撮像素子１１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。

【００３０】

このように、撮像装置１０では、１枚の光学素子１２（光学素子１２　）で、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、１枚の光学素子１２（光学素子１２　）によって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１０の構成要素は、１枚の光学素子１２と撮像素子１１のみでよく、簡易な装置でハイパースペクトル撮像装置を実現することができる。

【００３１】

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。

【００３２】

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。

【００３３】

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。

【００３４】

[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（観測画像）とを基に、画像を再構成する。図４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。

【００３５】

図４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Φ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４の式（Ａ））を解く処理である。

【００３６】

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、Φｆ－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。

【００３７】

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、τ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。

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.

【００３８】

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。

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 andTrends in Machine Learning, vol. 3, no. 1, pp. 1－122, 2011.

【００３９】

このように、撮像装置１０では、再構成に効果的な観測行列Φ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。

【００４０】

［構造体］

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、入射光の波長毎に、形状が異なるＰＳＦ機能を有する光学素子１２を実現する。

【００４１】

図５及び図６は、構造体１６０の概略構成の例を示す図である。図５は、平面視したときの形状が正方形形状である構造体１６０の側面図である。図６は、図５に示す構造体１６０の底面図である。

【００４２】

構造体１６０は、ｚ軸方向に延在する柱状構造体であり、透明基板１９０（例えば$SiO_2$基板（屈折率１．４５））の底面に形成される。構造体１６０の材料の例は、ＳｉＮ（屈折率$n_1$＝２．０５）である。構造体１６０の側方及び下方は、空気（Ａｉｒ（屈折率$n_0$＝１．０））である。

【００４３】

それぞれの構造体１６０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。

【００４４】

【数１】

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

【００４５】

$\lambda_{min}$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、$\lambda_{min}$を４２０ｎｍとし、$n_0$を１．０とし、Ｐ＝４００ｎｍとした。

【００４６】

構造体１６０の高さｈ（ｚ軸方向の長さ）は、一定である。高さｈは、構造体１６０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２π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$\lambda_r$とすると、式（２）のように設定することが望ましい。

【００４７】

【数２】

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

【００４８】

式（２）において、$n_1$は、構造体１６０の屈折率である。構造体１６０がＳｉＮの場合、$n_1$＝２．０５であり、高さｈは、例えば１２５０ｎｍである。また、構造体１６０は、ＴｉＮ（屈折率２．４０）で形成されてもよい。

【００４９】
構造体１６０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１６０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。なお、偏光依存性を生じさせないため、複数の構造体１６０は、ｘｙ平面と平行な面で切断した際の各々の断面形状が、４回回転対称形状であることが望ましい。
【００５０】
［位相遅延量］
次に、構造体１６０の構造幅及び各波長における位相遅延量について説明する。図７は構造体１６０の構造幅及び各波長における位相遅延量の関係を示す図である。
【００５１】
図７では、柱状の構造体１６０の構造パラメータ（幅）を、高さは一定の状態で、様々な値に設定した場合の、各波長（４２０～６６０ｎｍ）の位相値を示す。この図７に示すように、構造体１６０の断面形状を適切に設計することで、全ての設計波長において、０～２π全ての位相値を実現することができる。
【００５２】
これにより、本実施の形態では、バイナリー構造の構造体１６０の断面形状を設計するだけで、設計波長に応じて任意の空間位相分布を設計でき、後述するように波長毎に形状の異なるＰＳＦを有する光学素子１２を設計できる。なお、ここでは、４２０～６６０ｎｍの波長のみについて説明したが、他の任意の波長帯域に対しても同様の設計を適用できる。
【００５３】
なお、構造体１６０の断面形状は、図６に示される形状に限られない。図８は、構造体１６０の断面形状の例を示す図である。図８に例示されるようなさまざまな断面形状を、構造体１６０が有してよい。例示される形状は、例えば正方形形状、十字形状及び円形形状をさまざまに組み合わせることによって得られる４回回転対称形状である。
【００５４】
［レンズの設計例１］
次に、波長依存ＰＳＦレンズである光学素子１２の設計例について説明する。本実施の形態では、波長毎に異なる形状のＰＳＦを有するレンズ位相分布を設計し、この位相分布を基に柱状の構造体１６０を実現する。
【００５５】
ここでは、図５及び図６に示すＳｉＮ組成の構造体１６０を用いて位相分布を設計し、波長依存ＰＳＦレンズを実現した。なお、波長毎に異なる形状のＰＳＦをもつレンズは、様々な位相分布から実現できる。
【００５６】
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ＰＳＦをもつ光学素子１２を設計する場合を説明する。この場合、レンズの位相分布φは、例えば式（３）で表される。
【００５７】
【数３】

$$\varphi(x,y) = -\frac{2\pi}{\lambda_d} n\left(\sqrt{x^2+y^2+f^2} - f\right) + C \qquad \cdots(3)$$

【００５８】
式（３）において、（ｘ，ｙ）は、レンズ平面上の空間座標である。$\lambda_d$は、設計波長である。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。
【００５９】

図９～図１１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が有する位相分布の例を示す図である。図９～図１１は、フレネルレンズと同等の位相分布となるように設計した場合の位相分布の例である。図９は、波長λ＝４５０ｎｍの場合であり、図１０は、波長λ＝５５０ｎｍの場合であり、図１１は、波長λ＝６５０ｎｍの場合である。図９～図１１の例では、レンズ径は１．０ｍｍ、焦点距離は５．０ｍｍ、設計波長は５２０ｎｍのパラメータでレンズ設計を行った。φは、０～２πの範囲に収まるように変換している。例えば、－０．５π及び２．５πは、１．５π及び０．５πにそれぞれに変換している。

【００６０】

フレネルレンズと同等の位相分布である波長依存ＰＳＦレンズを実現するには、組成構造がもつ設計波長における位相遅延量から、式（２）の位相分布に最も適合する構造（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。

【００６１】

フレネルレンズの位相分布の場合、設計波長の平行光は、焦点距離において１点に集光される。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。

【００６２】

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。

【００６３】

本実施の形態では、この色収差を利用して、撮像対象に対して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。

【００６４】

［レンズの設計例２］

次に、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。

【００６５】

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、レンズの位相分布φは例えば、式（４）で表される。なお、式（４）のω（θ）は、式（５）で表される。

【００６６】

【数４】

$$\varphi(x,y) = -\frac{\omega(\theta)}{c} n\left(\sqrt{r^2+f^2}-f\right) + C \qquad \cdots(4)$$

【００６７】

【数５】

$$\left.\begin{array}{ll} \omega(\theta) = \omega_{min} + (\omega_{max}-\omega_{min})\dfrac{N}{2\pi}\theta & 0 \leqq \theta < \dfrac{2\pi}{N} \\ \omega(\theta) = \omega_{min} + (\omega_{max}-\omega_{min})\dfrac{N}{2\pi}\left(\theta - \dfrac{2\pi}{N}\right) & \dfrac{2\pi}{N} \leqq \theta < \dfrac{4\pi}{N} \\ \vdots & \vdots \\ \omega(\theta) = \omega_{min} + (\omega_{max}-\omega_{min})\dfrac{N}{2\pi}\left\{\theta - \dfrac{2\pi}{N}(N-1)\right\} & \dfrac{2\pi}{N}(N-1) \leqq \theta < 2\pi \end{array}\right\} \cdots(5)$$

【００６８】

式（４）、式（５）において、ｒは、レンズ平面上の原点から距離である。θは、レン

ズ平面上の原点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(θ)は、θの位置での光角周波数である。$\omega_{min}$は、設計上最小の光角周波数である。$\omega_{max}$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。

【００６９】

図１２～図１４は、構造体１６０が有する位相分布の他の例である。図１２～図１４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が有する位相分布の例を示す図である。図１２は、波長λ＝４５０ｎｍの場合であり、図１３は、波長λ＝５５０ｎｍの場合であり、図１４は、波長λ＝６５０ｎｍの場合である。図１２～図１４の例では、レンズ径は１．０ｍｍ、焦点距離は５．０ｍｍ、翅の数は３、設計波長は４２０～６６０ｎｍのパラメータでレンズ設計を行った。φは、０～２πの範囲に収まるように変換している。例えば、－０．５π及び２．５πは、１．５π及び０．５πにそれぞれに変換している。

【００７０】

プロペラ形状のPSFをもつ位相分布となるような波長依存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、式の位相分布に最も適合する構造（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。

【００７１】

この場合、後述するように、ＰＳＦ形状はプロペラのような形状となり、その羽根の数は式（５）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。

【００７２】

これは、レンズの焦点距離が、波長と回転角θとに依存性を有する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ω（θ）（設計波長）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ω（θ）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。

【００７３】

したがって、光学素子１２は、撮像対象に対して波長毎に異なる畳み込み演算を施すことが可能であり、画像取得後、撮像装置１０は、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。

【００７４】

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。

【００７５】

また、式（４）、式（５）は、設計角周波数ω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。

【００７６】

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。

【００７７】

［ＰＳＦ形状例］

実施の形態における波長依存ＰＦＳレンズのＰＳＦ形状の一例を示す。図１５～図１９は、図１２～図１４に示す位相分布からフレネル回折積分によって求めたＰＳＦ形状を示す図である。図１５は、波長λ＝４５０ｎｍにおけるＰＳＦ形状である。図１６は、波長λ＝５００ｎｍにおけるＰＳＦ形状である。図１７は、波長λ＝５５０ｎｍにおけるＰＳＦ形状である。図１８は、波長λ＝６００ｎｍにおけるＰＳＦ形状である。図１９は、波長λ＝６５０ｎｍにおけるＰＳＦ形状である。

【００７８】
図１５～図１９に示すように、実施の形態における波長依存ＰＦＳレンズによれば、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ことがわかる。図１５～図１９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。
【００７９】
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、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。
【００８０】
[観測画像例]
続いて、図１５～図１９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２０は、シミュレーション結果を示す図である。
【００８１】
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１５～図１９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２０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上で取得される画像（観測画像）である。
【００８２】
これは、図１５～図１９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。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。
【００８３】
図２０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。
【００８４】
[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２１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２１では、図２０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。
【００８５】
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２１には、比較のために実画像も示す。なお、図２１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。
【００８６】
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。
【００８７】
ＰＳＮＲは、式（６）及び式（７）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、波長全体で平均をとることで、スペクトル画像に適用した。
【００８８】

【数６】

$$\mathrm{PSNR} = 10 \cdot \log_{10} \frac{MAX_I^2}{MSE}$$
$$= 20 \cdot \log_{10} \frac{MAX_I}{\sqrt{MSE}} \quad \cdots (6)$$

【００８９】

【数７】

$$\mathrm{MSE} = \frac{1}{mn} \sum_{i=0}^{m-1} \sum_{j=0}^{n-1} [I(i,j) - K(i,j)]^2 \quad \cdots (7)$$

【００９０】

ＳＳＩＭは、構造的類似性であり、式（８）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。

【００９１】

【数８】

$$\mathrm{SSIM}(x,y) = \frac{(2\mu_x\mu_y + c_1)(2\sigma_{xy} + c_2)}{(\mu_x^2 + \mu_y^2 + c_1)(\sigma_x^2 + \sigma_y^2 + c_2)} \quad \cdots (8)$$

【００９２】

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。

【００９３】

再構成画像は、ＰＳＮＲが２９．０９ｄＢであり、ＳＳＩＭが０．９１４２であり、ＳＡＭが、０．１８７２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。

【００９４】

［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２２は、図２１における再構成画像の×点における波長スペクトルを示す図である。図２２には、比較のため、再構成画像（Reconstructed）とともに、実画像（Ground truth）の×点における波長スペクトルも示す。

【００９５】

図２２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。

【００９６】

［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２３は、光学素子１２のＰＳＦの形状ごとに構成精度を比較した結果を示す図である。図２４は、図２３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像を示す図である。図２４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。

【００９７】
図２３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２４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、前記した大きな色収差を利用して再構成を行っている。
【００９８】
図２３及び図２４では、評価指数として、ＰＳＮＲ、ＳＳＩＭ、ＳＡＭを用いた。図２３及び図２４におけるＮは羽根の数である。図２３では、波長依存ＰＳＦである光学素子１２のＰＳＦ形状であって、羽根の数Ｎが１～４である場合のＰＳＦ形状についても示す。なお、レンズのパラメータは、レンズ径が１．０ｍｍ、焦点距離が５．０ｍｍ、設計波長帯域が４２０～６６０ｎｍである。センサパラメータは、ピクセルサイズが２４μｍ、画像サイズが１２８×１２８×２５、パッチサイズが３２×３２×３である。ＡＤＭＭパラメータは、正則化項の重みがλ＝０．０１５、罰則項の重みがρ　＝　０．１、Iteration数が６４である。
【００９９】
図２３及び図２４に示すように、いずれの評価指数も、翅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１２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１２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。
【０１００】
［実施の形態の効果］
このように、実施の形態に係る撮像装置１０では、１枚の光学素子１２で、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、１枚の光学素子１２によって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１０の構成要素は、１枚の光学素子１２と撮像素子１１と信号処理部１３のみでよく、簡易な装置でハイパースペクトル撮像装置を実現することができる。
【０１０１】
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り、従来と比して、装置の小型化が可能である。
【０１０２】
また、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高精度に復元することができる。
【０１０３】
また、撮像装置１０では、撮像自体（符号化された画像の取得）は、シングルショットでよいため、時間次元の犠牲がなく、再構成の処理時間を除くと、通常カメラと同等の時間分解能が可能である。
【０１０４】
また、撮像装置１０では、符号化を担う光学素子１２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。
【０１０５】
また、微細なバイナリー構造からなる光学素子１２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。
【０１０６】

なお、本実施の形態では、撮像素子１１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３ｃｈ（ＲＧＢ：カラー）が１ｃｂ（モノクロ）となる以外は、同様である。

【０１０７】

［レンズ構造例］

光学素子１２は、図２及び図3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。

【０１０８】

図２及び図３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２５～図３０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。

【０１０９】

図２５に示すように、光学素子１２の構造体１６０は、透明基板１９０Ａ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１９０Ａ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。

【０１１０】

また、図２６に示すように、光学素子１２の構造体１６０は、透明基板１９０Ｂ内に埋め込まれていてもよい。透明基板１９０Ｂ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。

【０１１１】

また、図２７に示すように、光学素子１２の構造体１６０は、透明基板１９０Ｃの両面に形成されていてもよい。上述した波長依存ＰＳＦ機能を、透明基板１９０Ｃの両面の構造体１６０で実現してもよい。また、波長依存ＰＳＦ機能を、透明基板１９０Ｃの構造体１６０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１６０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。

【０１１２】

また、図２８に示すように、光学素子１２の構造体１６０は、屈折レンズ１９０Ｄ上に形成されていてもよい。構造体１６０は、屈折レンズ１９０Ｄ上に支持されている。屈折レンズ１９０Ｄは、波長依存ＰＳＦ機能の集光性能向上（高いＮＡ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１９０Ｅ，１９０Ｆでも同様である。構造体１６０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１９０Ｄ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。

【０１１３】

また、図２９に示すように、光学素子１２の構造体１６０は、屈折レンズ１９０Ｅ内に埋め込まれていてもよい。屈折レンズ１９０Ｅ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。

【０１１４】

また、図３０に示すように、光学素子１２の構造体１６０は、屈折レンズ１９０Ｆの両面に形成されていてもよい。上述した波長依存ＰＳＦ機能を、屈折レンズ１９０Ｆの両面の構造体１６０で実現してもよい。また、波長依存ＰＳＦ機能を、屈折レンズ１９０Ｆの構造体１６０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１６０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１９０Ｆ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。

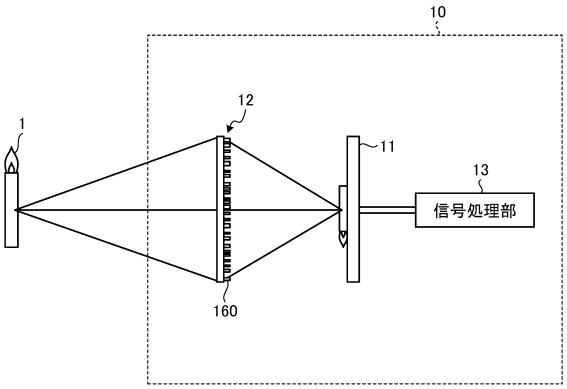
【０１１５】

また、図２５～図３０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。

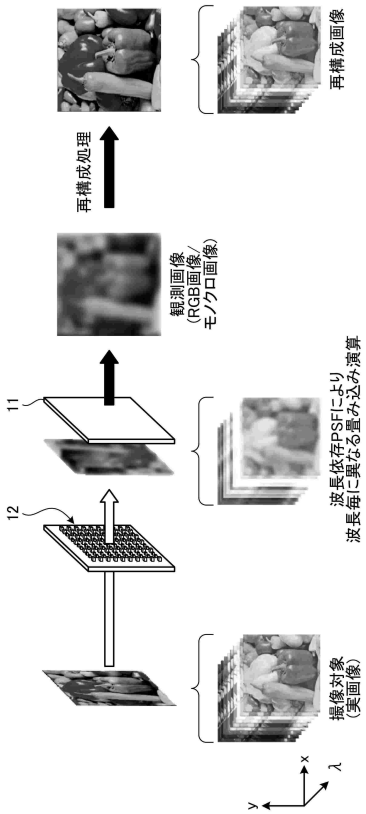
【０１１６】
なお、実施の形態では、構造体１６０の材料として、$TiO_2$及びＳｉＮを例に挙げて説明した。ただし、構造体１６０の材料はそれらに限定されない。例えば、波長が３８０ｎｍ～１０００ｎｍの光（可視光～近赤外光）の光に対しては、ＳｉＮの他に、ＳｉＣ、$TiO_2$、ＧａＮ等が構造体６の材料として用いられてよい。屈折率が高く、吸収損失が少ないため適している。波長が８００～１０００ｎｍの光（近赤外光）で用いる場合は、Ｓｉ、ＳｉＣ、ＳｉＮ、$TiO_2$、ＧａＡｓ、ＧａＮ等が構造体６の材料として用いられてよい。低損失であるため適している。長波長帯の近赤外領域（通信波長である１．３μｍや１．５５μｍ等）の光に対しては、上述の材料に加えて、ＩｎＰ等を構造体１６０の材料として用いることができる。
【０１１７】
また、構造体１６０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、ＢＣＢ（ベンゾシクロブテン）、光硬化性樹脂、ＵＶエポキシ樹脂、ＰＭＭＡ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。
【０１１８】
また、実施の形態では、透明層１５０の材料として$SiO_2$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１６０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。
【０１１９】
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。
【０１２０】
また、実施の形態では、構造体１６０の形状として、正方形形状の断面形状を有する構造体が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（例えば正方形形状のみ）が用いられてもよいし、２種類以上の構造体（例えば正方形形状と×字形状のみ）が用いられてもよい。
【０１２１】
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】
【０１２２】
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
１８０　配線層
１９０，１９０Ａ～１９０Ｃ　透明基板
１９０Ｄ～１９０Ｆ　屈折レンズ

【図面】

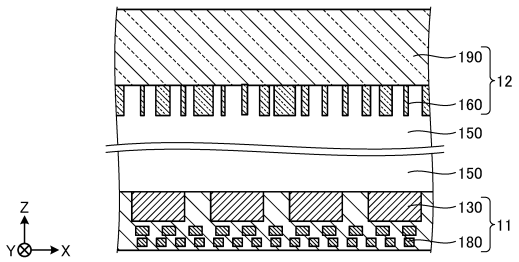
【図１】


10
1
12
11
13
信号処理部
160

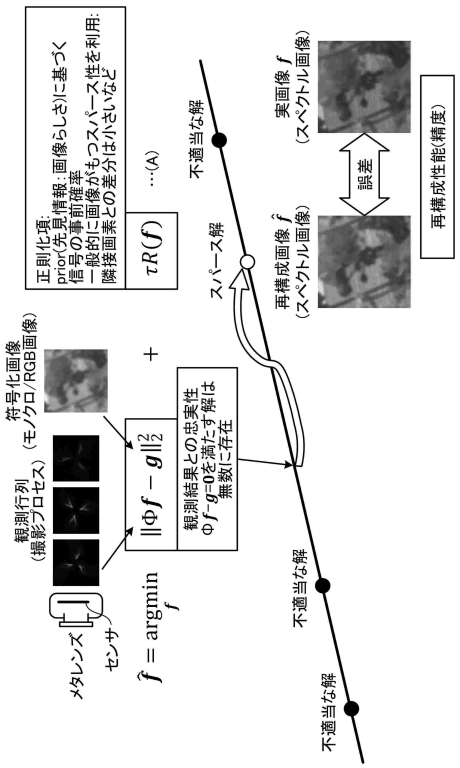
【図２】


再構成画像
再構成処理
観測画像
(RGB画像/
モノクロ画像)
11
波長依存PSFにより
波長毎に異なる畳み込み演算
12
撮像対象
(実画像)
x
λ
y

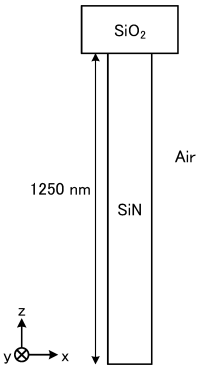
【図３】


190
12
160
150
150
130
11
180
Z
Y
X

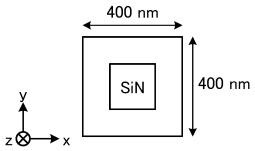
【図４】


正則化項:
prior(先見情報:画像らしさ)に基づく
信号の事前確率
一般的に画像がもつスパース性を利用:
隣接画素との差分は小さいなど
$\tau R(f)$
…(A)
不適当な解
スパース解
実画像 $f$
(スペクトル画像)
誤差
再構成画像 $\hat{f}$
(スペクトル画像)
再構成性能(精度)
符号化画像
(モノクロ/RGB画像)
観測行列
(撮影プロセス)
+
$\|\Phi f - g\|_2^2$
観測結果との忠実性
$\Phi f - g = 0$を満たす解は
無数に存在
$\hat{f} = \underset{f}{\operatorname{argmin}}$
メタレンズ
センサ
不適当な解
不適当な解

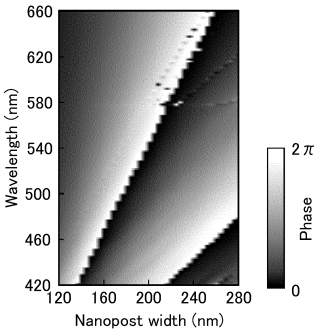
【図５】


SiO2
Air
1250 nm
SiN
z
y
x

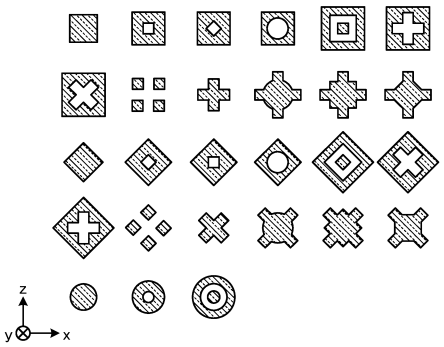
【図６】


400 nm
400 nm
SiN
y
z
x

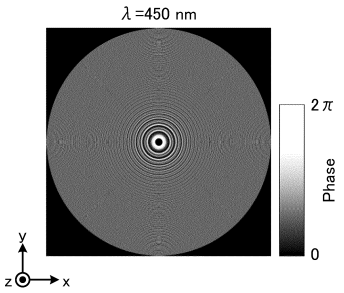
【図７】


660
620
580
540
500
460
420
Wavelength (nm)
120
160
200
240
280
Nanopost width (nm)
2π
Phase
0

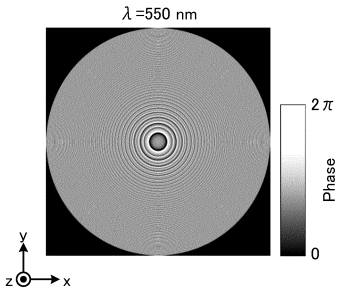
【図８】


z
y
x

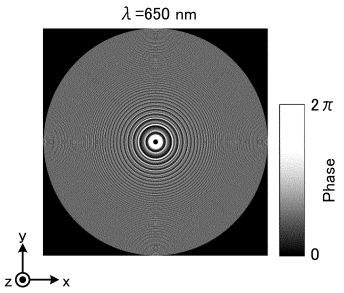
【図９】



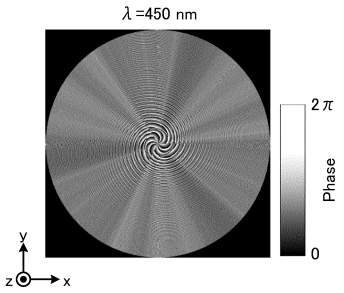

【図１０】



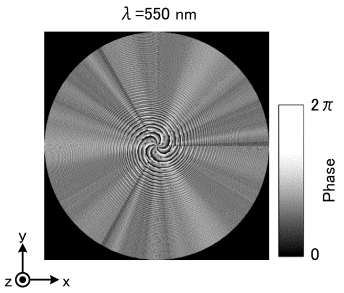

【図１１】



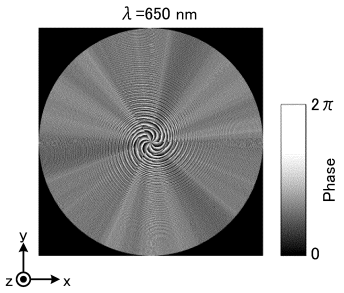

【図１２】



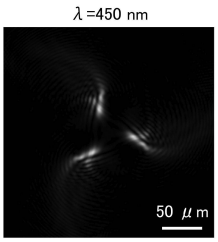
【図１３】



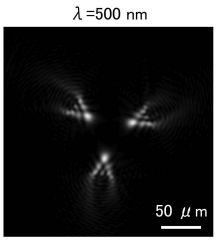

【図１４】



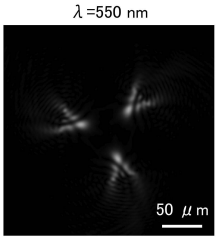

【図１５】



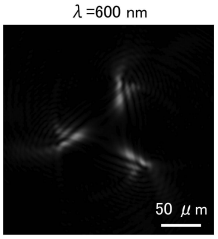

【図１６】



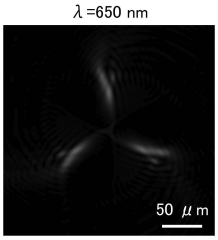
【図１７】




【図１８】




【図１９】




【図２０】

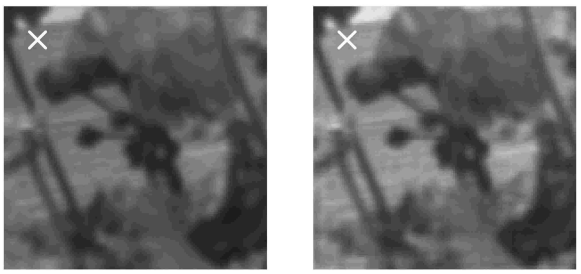


入力スペクトル画像: 実画像
（128×128×25）

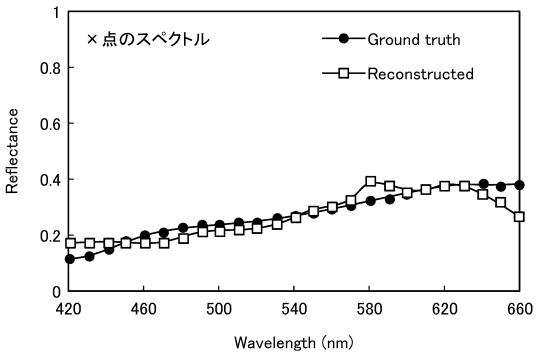


畳み込み後の画像: 観測画像
（128×128×3: 圧縮比12%）

【図２１】




【図２２】

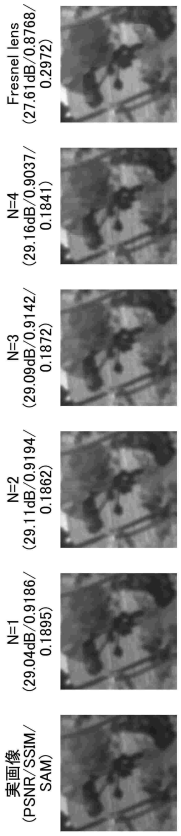



【図２３】

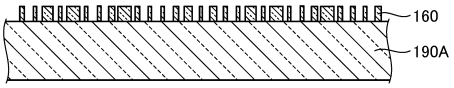


| | Fresnel | N=4 | N=3 | N=2 | N=1 |
|---|---|---|---|---|---|
| PSNR(dB) | 27.61 | 29.16 | 29.09 | 29.11 | 29.04 |
| SSIM | 0.8768 | 0.9037 | 0.9142 | 0.9194 | 0.9186 |
| SAM | 0.2972 | 0.1841 | 0.1872 | 0.1862 | 0.1895 |

【図２４】



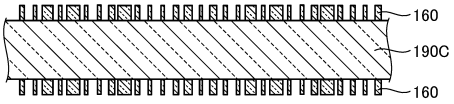
【図２５】




【図２６】



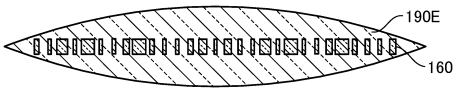

【図２７】




【図２８】



【図２９】




【図３０】



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）
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

(58)調査した分野 (Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｈ０４Ｎ ２５／１０
Ｈ０４Ｎ ２３／１２
Ｈ０４Ｎ ２３／９５
ＪＳＴＰｌｕｓ／ＪＭＥＤＰｌｕｓ／ＪＳＴ７５８０（ＪＤｒｅａｍＩＩＩ）