

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6950968号
(P6950968)

(45) 発行日 令和3年10月20日(2021.10.20)

(24) 登録日 令和3年9月28日(2021.9.28)

(51) Int. Cl. F I
 GO 1 J 9/00 (2006.01) GO 1 J 9/00
 GO 1 N 21/17 (2006.01) GO 1 N 21/17 A

請求項の数 7 (全 27 頁)

(21) 出願番号	特願2018-534384 (P2018-534384)	(73) 特許権者	504176911 国立大学法人大阪大学 大阪府吹田市山田丘1番1号
(86) (22) 出願日	平成29年8月10日 (2017.8.10)	(74) 代理人	100106909 弁理士 棚井 澄雄
(86) 国際出願番号	PCT/JP2017/029156	(74) 代理人	100161207 弁理士 西澤 和純
(87) 国際公開番号	W02018/034241	(74) 代理人	100188558 弁理士 飯田 雅人
(87) 国際公開日	平成30年2月22日 (2018.2.22)	(74) 代理人	100165179 弁理士 田▲崎▼ 聡
審査請求日	令和2年7月2日 (2020.7.2)	(74) 代理人	100175824 弁理士 小林 淳一
(31) 優先権主張番号	特願2016-159312 (P2016-159312)		
(32) 優先日	平成28年8月15日 (2016.8.15)		
(33) 優先権主張国・地域又は機関	日本国 (JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 電磁波位相振幅生成装置、電磁波位相振幅生成方法及び電磁波位相振幅生成プログラム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

分割された領域ごとに照射される電磁波の状態が決められた空間周波数上においてランダムな照射パターンの前記電磁波を撮像対象に照射する照射部と、

前記照射部が照射する前記照射パターンの前記電磁波を、前記撮像対象が散乱する前記電磁波である散乱電磁波を撮像することにより撮像画像を生成する撮像部と、

前記撮像部が生成する前記撮像画像と、前記照射パターンを示す情報と、前記撮像対象の信号を示す情報と、に基づいて、前記撮像対象のスパーシティに基づくスパーシティ拘束演算を行うことにより、前記撮像対象からの前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成する生成部と、

を備え、

前記照射パターンを示す情報には、前記電磁波の複数距離の波面の状態をそれぞれ示す距離毎波面パターン情報が含まれ、

前記生成部は、前記距離毎波面パターン情報にさらに基づいて、前記撮像対象のスパーシティに基づくスパーシティ拘束演算を行うことにより、前記撮像対象の断層面の位相と振幅とを示す情報を生成する

電磁波位相振幅生成装置。

【請求項2】

前記生成部は、

生成した前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報と前記撮像対象の信号を示す

情報とに基づいて、前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成することを繰り返しおこなうことにより、前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成する請求項1に記載の電磁波位相振幅生成装置。

【請求項3】

前記撮像部の解像度である第1の解像度は、前記生成部によるスパース拘束演算の解像度である第2の解像度よりも解像度が低く、

前記生成部は、前記第1の解像度と前記第2の解像度との対応関係にさらに基づいて前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成することを繰り返しおこなうことにより、前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を前記第1の解像度よりも解像度を高くして生成する

10

請求項2に記載の電磁波位相振幅生成装置。

【請求項4】

前記空間周波数上においてランダムな前記照射パターンとは、

前記空間周波数上において一様にスペクトルが広がるパターンである

請求項1から請求項3のいずれか一項に記載の電磁波位相振幅生成装置。

【請求項5】

前記電磁波とは、可視光線、X線、紫外線、赤外線、テラヘルツ波、ミリ波及びマイクロ波のうち少なくとも1つである

請求項1から請求項4のいずれか一項に記載の電磁波位相振幅生成装置。

【請求項6】

20

分割された領域ごとに照射される電磁波の状態が決められた空間周波数上においてランダムな照射パターンの前記電磁波を撮像対象に照射する照射ステップと、

前記照射ステップから照射される前記照射パターンの前記電磁波を、前記撮像対象が散乱する前記電磁波である散乱電磁波を撮像することにより撮像画像を生成する撮像ステップと、

前記撮像ステップから生成される前記撮像画像と、前記照射パターンを示す情報と、前記撮像対象の信号を示す情報と、に基づいて、前記撮像対象のスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、前記撮像対象からの前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成する生成ステップと

を有し、

30

前記照射パターンを示す情報には、前記電磁波の複数距離の波面の状態をそれぞれ示す距離毎波面パターン情報が含まれ、

前記生成ステップは、前記距離毎波面パターン情報にさらに基づいて、前記撮像対象のスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、前記撮像対象の断層面の位相と振幅とを示す情報を生成する

電磁波位相振幅生成方法。

【請求項7】

コンピュータに、

分割された領域ごとに照射される電磁波の状態が決められた空間周波数上においてランダムな照射パターンの前記電磁波を撮像対象に照射する照射ステップと、

40

前記照射ステップから照射される前記照射パターンの前記電磁波を、前記撮像対象が散乱する前記電磁波である散乱電磁波を撮像することにより撮像画像を生成する撮像ステップと、

前記撮像ステップから生成される前記撮像画像と、前記照射パターンを示す情報と、前記撮像対象の信号を示す情報と、に基づいて、前記撮像対象のスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、前記撮像対象からの前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成する生成ステップと

を実行させるための電磁波位相振幅生成プログラムであって、

前記照射パターンを示す情報には、前記電磁波の複数距離の波面の状態をそれぞれ示す距離毎波面パターン情報が含まれ、

50

前記生成ステップは、前記距離毎波面パターン情報にさらに基づいて、前記撮像対象のスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、前記撮像対象の断層面の位相と振幅とを示す情報を生成する

電磁波位相振幅生成プログラム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、電磁波位相振幅生成装置、電磁波位相振幅生成方法及び電磁波位相振幅生成プログラムに関する。

本願は、2016年8月15日に、日本に出願された特願2016-159312号に
10 基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

【背景技術】

【0002】

従来、電磁波を撮像対象に照射し、照射された電磁波が撮像対象によって散乱した電磁波を、領域毎に電磁波を減衰させる大きさが異なるランダムなパターンを持つ散乱板を介して撮像し、撮像画像とランダムなパターンとから、撮像対象によって散乱した電磁波の位相と振幅とを示す複素振幅を生成する技術が知られている（例えば、非特許文献1）。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献1】Single-shot phase imaging with a coded aperture (OPTICS LETTERS / Vol. 39, No. 22 / November 15, 2014)

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

従来の技術では、一度の撮像によって撮像対象によって散乱した電磁波の位相と振幅とを示す複素振幅を生成することができる。しかし、撮像対象が散乱した電磁波を散乱板が弱めてしまい、信号雑音比が低くなりノイズが増える。また、撮像対象に照射する電磁波の状態を散乱板が弱める分強めると、撮像対象への侵襲性が大きくなり、撮像対象に悪影響が生じるといった問題があった。

本発明の課題は、信号雑音比を高めた、撮像対象への侵襲性が小さい電磁波位相振幅生成装置、電磁波位相振幅生成方法及び電磁波位相振幅生成プログラムを提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0005】

本発明の一態様は、分割された領域ごとに照射される電磁波の状態が決められた空間周波数上においてランダムな照射パターンの前記電磁波を撮像対象に照射する照射部と、前記照射部が照射する前記照射パターンの前記電磁波を、前記撮像対象が散乱する前記電磁波である散乱電磁波を撮像することにより撮像画像を生成する撮像部と、前記撮像部が生成する前記撮像画像と、前記照射パターンを示す情報と、前記撮像対象の信号を示す情報と、に基づいて、前記撮像対象のスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、前記撮像対象からの前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成する生成部と、を備え、前記照射パターンを示す情報には、前記電磁波の複数距離の波面の状態をそれぞれ示す距離毎波面パターン情報が含まれ、前記生成部は、前記距離毎波面パターン情報にさらに基づいて、前記撮像対象のスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、前記撮像対象の断層面の位相と振幅とを示す情報を生成する電磁波位相振幅生成装置である。

【0007】

また、本発明の一態様は、上記の電磁波位相振幅生成装置において、前記生成部は、生
50

成した前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報と前記撮像対象の信号を示す情報とに基づいて、前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成することを繰り返しおこなうことにより、前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成する。

【0008】

また、本発明の一態様は、前記撮像部の解像度である第1の解像度は、前記生成部によるスパース拘束演算の解像度である第2の解像度よりも解像度が低く、前記生成部は、前記第1の解像度と前記第2の解像度との対応関係にさらに基づいて前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成することを繰り返しおこなうことにより、前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を前記第1の解像度よりも解像度を高くして生成する。

10

【0009】

また、本発明の一態様は、上記の電磁波位相振幅生成装置において、前記空間周波数上においてランダムな前記照射パターンとは、前記空間周波数上において一様にスペクトルが広がるパターンである。

【0010】

また、本発明の一態様は、上記の電磁波位相振幅生成装置において、前記電磁波とは、可視光線、X線、紫外線、赤外線、テラヘルツ波、ミリ波及びマイクロ波のうち少なくとも1つである。

【0011】

また、本発明の一態様は、分割された領域ごとに照射される電磁波の状態が決められた空間周波数上においてランダムな照射パターンの前記電磁波を撮像対象に照射する照射ステップと、前記照射ステップから照射される前記照射パターンの前記電磁波を、前記撮像対象が散乱する前記電磁波である散乱電磁波を撮像することにより撮像画像を生成する撮像ステップと、前記撮像ステップから生成される前記撮像画像と、前記照射パターンを示す情報と、前記撮像対象の信号を示す情報と、に基づいて、前記撮像対象のスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、前記撮像対象からの前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成する生成ステップとを有し、前記照射パターンを示す情報には、前記電磁波の複数距離の波面の状態をそれぞれ示す距離毎波面パターン情報が含まれ、前記生成ステップは、前記距離毎波面パターン情報にさらに基づいて、前記撮像対象のスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、前記撮像対象の断層面の位相と振幅とを示す情報を生成する電磁波位相振幅生成方法である。

20

30

【0012】

また、本発明の一態様は、コンピュータに、分割された領域ごとに照射される電磁波の状態が決められた空間周波数上においてランダムな照射パターンの前記電磁波を撮像対象に照射する照射ステップと、前記照射ステップから照射される前記照射パターンの前記電磁波を、前記撮像対象が散乱する前記電磁波である散乱電磁波を撮像することにより撮像画像を生成する撮像ステップと、前記撮像ステップから生成される前記撮像画像と、前記照射パターンを示す情報と、前記撮像対象の信号を示す情報と、に基づいて、前記撮像対象のスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、前記撮像対象からの前記電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成する生成ステップとを実行させるための電磁波位相振幅生成プログラムであって、前記照射パターンを示す情報には、前記電磁波の複数距離の波面の状態をそれぞれ示す距離毎波面パターン情報が含まれ、前記生成ステップは、前記距離毎波面パターン情報にさらに基づいて、前記撮像対象のスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、前記撮像対象の断層面の位相と振幅とを示す情報を生成する電磁波位相振幅生成プログラムである。

40

【発明の効果】

【0013】

本発明によれば、信号雑音比を高めた、撮像対象への侵襲性が小さい電磁波位相振幅生成装置、電磁波位相振幅生成方法及び電磁波位相振幅生成プログラムを提供することができる。

50

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】電磁波位相振幅生成装置の外観構成の一例を示す図である。

【図2】電磁波位相振幅生成装置の機能構成の一例を示す図である。

【図3】電磁波位相振幅生成装置の動作の一例を示す流れ図である。

【図4】散乱光の振幅を示す情報と散乱光の位相を示す情報との一例を示す図である。

【図5】散乱板と、撮像画像との一例を示す図である。

【図6】生成部が複素振幅情報から生成する情報の一例を示す図である。

【図7】電磁波位相振幅生成装置の構成の一例を示す図である。

【図8】生成部が生成する撮像対象の振幅断層画像の一例である。

10

【図9】生成部が生成する撮像対象の位相断層画像の一例である。

【図10】電磁波位相振幅生成装置の構成の一例を示す図である。

【図11】電磁波位相振幅生成装置の構成の他の一例を示す図である。

【図12】撮像画像の画素数の比較の一例を示す図である。

【図13】撮像素子の画素数が散乱板の散乱区画数と一致している場合の散乱光の振幅画像及び位相画像の一例を示す図である。

【図14】撮像素子の画素数が散乱板の散乱区画数よりも少ない場合における、生成部による散乱光の振幅画像及び位相画像の一例を示す図である。

【図15】従来手法による散乱光の振幅画像及び位相画像の一例を示す図である。

【図16】時系列に生成された振幅画像及び位相画像の一例を示す図である。

20

【図17】振幅画像の解像度の比較結果の一例を示す図である。

【図18】撮像画像の画素数の比較の他の一例を示す図である。

【図19】撮像素子の画素数が散乱板の散乱区画数と一致している場合の散乱光の振幅画像及び位相画像の一例を示す図である。

【図20】撮像素子の画素数が散乱板の散乱区画数よりも少ない場合における、生成部による散乱光の振幅画像及び位相画像の一例を示す図である。

【図21】従来手法による散乱光の振幅画像及び位相画像の一例を示す図である。

【図22】時系列に生成された振幅画像及び位相画像の他の一例を示す図である。

【図23】位相画像の解像度の比較結果の一例を示す図である。

【発明を実施するための形態】

30

【0015】

〔第1の実施形態〕

以下、図面を参照して電磁波位相振幅生成装置の実施形態について説明する。

【0016】

〔電磁波位相振幅生成装置の構成〕

図1は、電磁波位相振幅生成装置100の外観構成の一例を示す図である。

【0017】

電磁波位相振幅生成装置100は、照射部RLと、端末装置10とを備える。

照射部RLから照射される電磁波は、撮像対象OBに照射される。撮像対象OBとは、電磁波位相振幅生成装置100によって観察される試料である。具体的には、撮像対象OBとは、不透明及び無色透明な生体試料、非生体試料である材料及び素材などである。ここで、電磁波とは、可視光線、X線、電子線、紫外線、赤外線、テラヘルツ波、ミリ波及びマイクロ波のうち少なくとも1つである。なお、上述した電磁波は、これに限られず、どのような波長の電磁波であってもよい。この一例では、電磁波が可視光線の場合について説明する。以下の説明では、可視光線を単に光と記載する場合もある。また、以下の説明では、照射部RLから照射される光を、照射光REWとも記載する。端末装置10は、撮像対象OBが散乱した散乱光SLを、撮像画像として撮像する。端末装置10とは、この一例ではスマートフォンなどの撮像装置を備える端末である。

40

【0018】

照射部RLは、照明Lと、散乱板MPとを備える。照射部RLは、分割された領域ごと

50

に照射される電磁波の状態が決められた空間周波数上においてランダムな照射パターンの電磁波を撮像対象に照射する。電磁波の状態とは、電磁波の強度、振幅及び位相の状態である。電磁波の強度及び振幅の状態とは、電磁波の強さの状態のことである。電磁波の位相の状態とは、電磁波の波の遅れや進みの状態のことである。

空間周波数上とは、端末装置10が撮像する撮像画像における空間周波数上である。照明Lから出射される光は、散乱板MPに当たり、散乱板MPの領域ごとに異なる光の散乱率に応じた強さの散乱光を照射光REWとして、散乱板MPから撮像対象OBに対して照射される。

【0019】

具体的には、照明Lは、光を出射する。照明Lから出射される光は、散乱板MPを介して、撮像対象OBに照射される。照明Lとは、位相及び振幅がランダムに変化する光よりも可干渉性が高い光を出射する光源である。つまり、可干渉性が高い光源とは、光源から出射される光の位相及び振幅に相関がある光源である。より具体的には、照明Lとは、レーザー光源、半導体レーザー光源、LED(LIGHT EMITTING DIODE)光源である。

10

【0020】

散乱板MPには、照明Lから出射された光が照射される。散乱板MPは、照明Lから出射された光を散乱する。散乱板MPは、散乱した光を照射光REWとして、撮像対象OBに対して照射する。散乱板MPとは、照明Lから照射される光の強さを、領域ごとに変える板である。散乱板MPとは、電磁波の強度、電磁波の振幅及び電磁波の位相のうち少なくとも1つを変調する光学素子である。この一例では、散乱板MPとは、空間光変調器である。

20

【0021】

散乱板MPは、光を散乱する程度が異なるように分割された領域を備える。ここで、領域とは、撮像対象OBの大きさに応じた大きさの領域である。この一例では、散乱板MPは、領域は正方形に分割された領域である。また、光を散乱する程度が異なるように分割された領域とは、光の散乱率が異なるパターンである。具体的には、散乱板MPとは、電磁波の強さのみをランダムにして電磁波の位相を一定にする散乱板である。なお、散乱板MPは、電磁波の強さを一定にして電磁波の位相のみをランダムにする散乱板であってもよい。散乱板MPは、電磁波の強さと電磁波の位相とをランダムにする散乱板であってもよい。

30

【0022】

ここで、本実施形態の一例では、散乱板MPの光の散乱率が異なるパターンとは、撮像対象OBに照射される光が当たる領域のパターンが、空間周波数上において一様にスペクトルが広がるパターンである。言い換えると、散乱板MPの光の散乱率が異なるパターンとは、撮像対象OBに照射される光が当たる領域のパターンが、空間周波数上において原点以外にピークを持たないパターンである。

具体的には、散乱板MPの光の散乱率が異なるパターンとは、空間周波数上においてホワイトノイズ様のパターンである。ホワイトノイズ様とは、概ね周期性が観測しにくいパターンである。つまり、散乱板MPの光の散乱率が異なるパターンは、空間周波数上において全くピークを持たないパターン又は空間周波数上において、均一にスペクトルが広がっているパターンである必要は無い。

40

【0023】

端末装置10は、表示部13を備える。端末装置10は、照射光REWが照射された撮像対象OBが散乱した散乱光SLを撮像する。撮像対象OBが散乱した散乱光SLとは、撮像対象OBの信号を示す情報である。端末装置10は、散乱光SLを撮像した撮像画像と、散乱板MPのランダムな照射パターンを示す情報とに基づいて、撮像対象OBからの散乱光SLの少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成する。以下の説明では、撮像対象OBからの散乱光SLの少なくとも位相と振幅とを示す情報を、複素振幅情報と記載する場合がある。

50

【 0 0 2 4 】

表示部 1 3 は、端末装置 1 0 が生成する散乱光 S L の少なくとも位相と振幅とを示す情報に基づき、散乱光 S L の強度、位相及び振幅を表示する。具体的には、表示部 1 3 は、生成部 1 2 が生成する複素振幅情報を表示する。また、表示部 1 3 は、生成部 1 2 が複素振幅情報に基づき再構成された画像の情報を表示する。この一例では、具体的には表示部 1 3 とは、液晶ディスプレイである。

【 0 0 2 5 】

[電磁波位相振幅生成装置の構成の一例]

次に、図 2 を参照して、本実施形態に係る電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 の構成の一例について説明する。

10

図 2 は、電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 の機能構成の一例を示す図である。照射部 R L と、撮像対象 O B については、上述した説明と同様である。

【 0 0 2 6 】

端末装置 1 0 は、操作検出部 1 4 と、撮像部 1 1 と、画像取得部 1 5 と、生成部 1 2 と、記憶部 1 6 と、表示部 1 3 と、を備える。

【 0 0 2 7 】

操作検出部 1 4 は、電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 を操作するユーザからの操作を検出する。具体的には、操作検出部 1 4 は、照射部 R L から撮像対象 O B に対して照射光 R E W を照射する場合には、ユーザが照射コマンドを操作したことを検出する。ユーザからの照射コマンド検出した操作検出部 1 4 は、照射部 R L に対して、照射光 R E W を照射する指令を出力する。

20

【 0 0 2 8 】

撮像部 1 1 は、撮像素子（不図示）を備える。撮像素子は、撮像対象 O B が散乱した散乱光 S L を撮像する。具体的には、撮像素子は、複数の画素を有する。撮像素子は、散乱光 S L の振幅又は散乱光 S L の強度に応じた電荷を画素にそれぞれ溜める。撮像部 1 1 は、撮像素子が溜めた電荷に基づいて、散乱光 S L を撮像する。以下の説明では、撮像素子は、横 y ピクセル、縦 x ピクセルの画素を有する。撮像対象 O B と撮像部 1 1 が備える撮像素子との間の距離は、距離 z である。撮像部 1 1 は、散乱光 S L を撮像した撮像画像 I P を生成する。撮像部 1 1 は、散乱光 S L を生成した撮像画像 I P を、画像取得部 1 5 に対して出力する。以下の説明では、撮像画像 I P とは、散乱光 S L の強度を示す情報である。

30

【 0 0 2 9 】

画像取得部 1 5 は、撮像部 1 1 から撮像画像 I P を取得する。画像取得部 1 5 は、撮像部 1 1 から取得した撮像画像 I P を、生成部 1 2 に対して出力する。

記憶部 1 6 には、散乱板 M P のランダムな照射パターンを示すパターン情報 R P I が記憶される。

【 0 0 3 0 】

生成部 1 2 は、撮像部 1 1 から撮像画像 I P を取得する。生成部 1 2 は、記憶部 1 6 に記憶されるパターン情報 R P I を取得する。

生成部 1 2 は、撮像部 1 1 が生成する撮像画像 I P と、パターン情報 R P I と、散乱光 S L を示す情報と、に基づいて、撮像対象 O B からの散乱光 S L の少なくとも位相と振幅とを示す情報を生成する。生成部 1 2 は、撮像対象 O B のスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、位相と振幅とを示す情報を生成する。生成部 1 2 が生成する位相と振幅とを示す情報とは、散乱光 S L の複素振幅情報である。生成部 1 2 は、生成した複素振幅情報に基づいて、散乱光 S L の位相を示す情報 P 及び散乱光 S L の振幅を示す情報 V A を生成する。

40

【 0 0 3 1 】

生成部 1 2 は、生成した位相と振幅とを示す情報、散乱光 S L の位相を示す情報 P 及び散乱光 S L の振幅を示す情報 V A を、表示部 1 3 に出力する。

表示部 1 3 は、生成部 1 2 から取得した位相と振幅とを示す情報、散乱光 S L の位相を

50

示す情報 P 及び散乱光 S L の振幅を示す情報 V A を表示する。

【 0 0 3 2 】

[電磁波位相振幅生成装置の動作の概要]

次に、図 3 を参照して、電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 の動作の概要について説明する。

図 3 は、電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 の動作の一例を示す流れ図である。

照射部 R L は、撮像対象 O B に対してランダムな照射パターンの電磁波を照射する（ステップ S 1 1 0）。撮像部 1 1 は、撮像対象 O B が散乱した散乱光 S L を、撮像画像 I P として撮像する（ステップ S 1 2 0）。

【 0 0 3 3 】

10

撮像部 1 1 は、生成部 1 2 に対して、撮像画像 I P を出力する。生成部 1 2 は、撮像画像 I P を取得する。生成部 1 2 は、記憶部 1 6 から照射パターンを示すパターン情報 R P I を取得する。生成部 1 2 は、撮像部 1 1 から取得した撮像画像 I P と、記憶部 1 6 から取得したパターン情報 R P I とに基づいて、撮像対象 O B のスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、散乱光 S L の位相と振幅とを示す情報を生成する。

【 0 0 3 4 】

具体的には、生成部 1 2 は、式 (1) 及び式 (2) から、散乱光 S L の位相と振幅とを示す情報を生成する。

【 0 0 3 5 】

【数 1】

20

$$|g|^2 = |P_z M f|^2 \quad \dots(1)$$

【 0 0 3 6 】

式 (1) は順問題すなわち数理モデルを使って予測する問題を示す式である。

【 0 0 3 7 】

【数 2】

$$\hat{f} = \arg \min_f \left\| |g|^2 - |P_z M f|^2 \right\|_{l_2} + \tau R(f) \quad \dots(2)$$

30

【 0 0 3 8 】

式 (2) は逆問題すなわちデータから数理モデルを推定する問題を示す式である。

式 (1) 及び式 (2) に含まれる x 及び y とは、撮像素子が備える画素の数である縦 x ピクセル及び横 y ピクセルと対応する数である。以下の数式における x 及び y も、同様である。

【 0 0 3 9 】

式 (1) 及び式 (2) に含まれる $|g|^2$ とは、撮像素子が撮像した撮像画像 I P である。具体的には、撮像画像 I P とは、散乱光 S L の振幅の絶対値を二乗した情報である。

40

式 (1) 及び式 (2) に含まれる g とは、散乱光 S L の位相と振幅とを示す複素振幅情報である。以下の説明では、散乱光 S L の位相と振幅とを示す複素振幅情報を、単に複素振幅情報 g と記載することがある。より具体的には、g とは、式 (3) に示す行列である。以下の数式における g も同様である。

【 0 0 4 0 】

【数 3】

$$g \in C^{(N_x \times N_y) \times 1} \quad \dots(3)$$

【 0 0 4 1 】

50

式(1)及び式(2)に含まれる P_z とは、撮像対象OBと、撮像素子との距離 z におけるフレネル伝播のテープリッツ行列である。より具体的には、 P_z とは、式(4)に示す行列である。以下の数式における P_z も同様である。

【0042】

【数4】

$$P_z \in C^{(Nx \times Ny) \times (Nx \times Ny)} \quad \dots (4)$$

【0043】

式(1)及び式(2)に含まれる M とは、散乱板MPのパターン情報RPIを示す行列である。具体的には、 M とは、式(5)に示す行列である。以下の数式における M も同様である。この一例では、パターン情報RPIとは、照射された光を散乱しない0から、光の強さをそのままにして散乱する1までの数値によって、散乱板MPのパターンを示す情報である。

10

【0044】

【数5】

$$M \in C^{(Nx \times Ny) \times (Nx \times Ny)} \quad \dots (5)$$

【0045】

20

式(1)及び式(2)に含まれる f とは、撮像対象OBの信号を示す情報である。より具体的には、 f とは、式(6)に示す行列である。以下の数式における f も同様である。

【0046】

【数6】

$$f \in C^{(Nx \times Ny) \times 1} \quad \dots (6)$$

【0047】

ここで、式(2)に含まれる l_2 とは、 l_2 ノルムである。以下の数式における l_2 も、同様である。

30

式(2)に含まれる、 $R(f)$ とは、スパース拘束である。具体的には、 $R(f)$ とは、撮像対象OBの信号を示す情報のスパース性に基づく正則である。式(2)に含まれるとは、正則のためのパラメータである。以下の数式における $R(f)$ 及びも同様である。

つまり、生成部12は、撮像対象OBのスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、散乱光SLの複素振幅情報 g を生成する(ステップS130)。なお、生成部12は、スパース拘束演算を公知の手法によって生成する。例えば、生成部12は、公知のスパースソルバーを用いてスパース拘束演算を行う。

【0048】

生成部12は、生成した複素振幅情報 g に基づいて、散乱光SLの強度を再構成する。

40

具体的には、生成部12は、生成した複素振幅情報 g の絶対値の二乗から散乱光SLの強度を示す情報を再構成する。生成部12は、再構成した散乱光SLの強度を示す情報と、撮像部11が撮像対象OBを撮像した撮像画像とを比較する(ステップS140)。再構成した散乱光SLの強度を示す情報と、撮像部11が撮像対象OBを撮像した撮像画像とが近似する場合には、処理を終了する(ステップS140; YES)。再構成した散乱光SLの強度を示す情報と、撮像部11が撮像対象OBを撮像した撮像画像とが近似しない場合には、生成した複素振幅情報 g を、式(1)及び式(2)に代入して、ステップS130の処理を繰り返す(ステップS140; NO)。なお、生成部12は、再構成した散乱光SLの強度を示す情報と、撮像部11が撮像対象OBを撮像した撮像画像とを比較する方法は、公知の技術を用いてもよい。また、再構成した散乱光SLの強度を示す情報

50

と、撮像部 11 が撮像対象 OB を撮像した撮像画像とを比較する方法は、ユーザの目視によって、近似しているか否かを判断してもよい。

【0049】

[電磁波位相振幅生成装置の動作の具体例]

ここまでは、生成部 12 の動作の概要について説明した。生成部 12 は、式 (1) 及び式 (2) を解くことにより、複素振幅情報 g を生成する。電磁波位相振幅生成装置 100 は、式 (1) 及び式 (2) を解く場合には、式 (1) に示す順問題が非線形問題であり、容易に解くことができない場合がある。

ここで、複素振幅情報 g を生成する方法の一例について説明する。

【0050】

[補助平面による解法]

以下の説明では、生成部 12 は、オルタネイティングプロジェクションによって、複素振幅情報 g を生成する。

生成部 12 は、補助平面 a を、撮像対象 OB と、撮像素子との間に設定する。補助平面 a を仮定すると、式 (1) は、式 (7) 及び式 (8) によって表現することができる。

【0051】

【数 7】

$$|g|^2 = |P_{z_2} P_{z_1} M f|^2 \quad \dots (7)$$

10

20

【0052】

ここで、式 (7) に含まれる z_1 とは、撮像対象 OB と、補助平面 a との距離である。式 (7) に含まれる z_2 とは、補助平面 a と、撮像素子との距離である。距離 z_1 と、距離 z_2 とを加算すると、撮像対象 OB と撮像素子との距離 z である。つまり、補助平面 a とは、撮像対象 OB から距離 z_1 及び撮像素子から距離 z_2 離れた位置に仮定される複素振幅情報である。

【0053】

【数 8】

$$a = P_{z_1} M f \quad \dots (8)$$

30

【0054】

式 (8) とは、撮像対象 OB と、補助平面 a との距離が z_1 の場合の式である。式 (8) に示すように、補助平面 a は、線形問題を解くことにより生成する。

【0055】

なお、補助平面 a は、後程説明する式 (9) から生成される仮置き g を逆フレネル変換することにより、生成される。つまり、生成部 12 は、位相推定問題を解くことにより、複素振幅情報 g を生成することができる。

【0056】

【数 9】

$$\hat{g} = \arg \min_g \left\| |g|^2 - |P_{z_2} a|^2 \right\|_{l_2} \quad \dots (9)$$

40

【0057】

生成部 12 は、初期値として、複素振幅情報 g に仮の値を設定する。初期値としての複素振幅情報 g の仮の値は、どのような値であってもよい。生成部 12 は、仮の値を設定した

50

補助平面 g を、式 (9) に代入する。生成部 1 2 は、式 (9) を、G - S 法によって仮置き g を生成する。G - S 法とは、反復型位相推定法である。

【 0 0 5 8 】

【 数 1 0 】

$$\hat{g} = \left(|g|^2 \otimes |P_{z_2} a|^2 \right)^{\frac{1}{2}} \otimes P_{z_2} a \quad \dots(10)$$

【 0 0 5 9 】

10

式 (1 0) とは、式 (9) を変形した式である。生成部 1 2 は、式 (1 0) によって、仮置き g を生成する。なお、式 (1 0) に示すように、生成部 1 2 は、撮像画像 IP を、距離 z_2 の位置での複素振幅情報及び補助平面 a の強度によって要素単位で除算する。生成部 1 2 は、要素単位で除算した値を $1 / 2$ 乗した値と、距離 z_2 の位置での複素振幅情報及び補助平面 a を要素単位で乗算することにより、仮置き g を生成する。生成部 1 2 は、生成した仮置き g を、逆フレネル変換することにより、仮置き a を生成する。

【 0 0 6 0 】

【 数 1 1 】

$$\hat{f} = \arg \min_f \left\| a - P_{z_1} M f \right\|_{l_2} + \tau R(f) \quad \dots(11)$$

20

【 0 0 6 1 】

生成部 1 2 は、式 (1 0) から生成された仮置き a を、式 (1 1) に代入する。生成部 1 2 は、式 (1 1) を、T w I S T 法によって解くことにより、仮置き f を生成する。T w I S T 法とは、圧縮センシングの一般的な解法である。

生成部 1 2 は、仮置き f を伝播させる。生成部 1 2 は、伝播させた仮置き f を初期値として、式 (1 0) から補助平面 a を生成する。

つまり、生成部 1 2 は複素振幅情報 g の初期値にランダムな値を代入して、G - S 法により補助平面 a を生成する。生成部 1 2 は、生成した補助平面 a を式 (1 1) に代入し、仮置き f を T w I S T 法により生成する。生成部 1 2 は、生成した仮置き f を式 (1 0) に代入し、ランダムな値よりも精度がよい仮置き g を生成する。

30

生成部 1 2 は、上述した処理を、仮置き g から再構成した散乱光 SL の強度を示す情報と、撮像部 1 1 が撮像対象 OB を撮像した撮像画像とが近似するまで繰り返す。

【 0 0 6 2 】

なお、式 (1) 及び式 (2) を解く方法は、上述した G - S 法及び T w I S T 法のオルタネイティングプロジェクションによる方法に限られない。

【 0 0 6 3 】

[電磁波位相振幅生成装置が生成した撮像対象からの散乱光の位相と振幅とを示す情報の一例]

40

次に、図 4 から図 6 を参照して、電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 が生成する複素振幅情報 g の一例について説明する。

図 4 は、散乱光 SL の振幅を示す情報 VA と散乱光 SL の位相を示す情報 P との一例を示す図である。

図 4 (a) は、散乱光 SL の振幅を示す情報 VA の一例である。

図 4 (b) は、散乱光 SL の位相を示す情報 P の一例である。この一例では、実験のため、位相を示す情報 P は、元の位相を 90 度回転させた位相である。

【 0 0 6 4 】

次に、図 5 は、散乱板 MP と、撮像画像 IP との一例を示す図である。

50

図5(a)は、散乱板MPと、散乱板MPの一部を拡大した散乱板MPEとの一例である。散乱板MPは、空間周波数上においてランダムなパターンである。つまり、散乱板MPのパターンを、フーリエ変換すると、空間周波数上でのピークが周期的に発生していないパターンである。

図5(b)は、撮像対象OBが散乱した散乱光SLを撮像部11が撮像した撮像画像IPの一例である。

【0065】

次に、図6は、生成部12が生成する位相と振幅とを示す情報gから生成される情報の一例を示す図である。

図6(a)は、生成部12が生成した振幅を示す情報から生成される強度RVAの一例を示す図である。図6(a)と、図4(a)とを比較すると、生成部12は、散乱光SLの振幅を示す情報VAと近似する振幅情報を生成することがわかる。

図6(b)は、生成部12が生成した位相を示す情報RPの一例を示す図である。図6(b)と、図4(b)とを比較すると、生成部12は、散乱光SLの位相を示す情報Pと近似する位相情報を生成することがわかる。

【0066】

[まとめ]

以上説明したように、電磁波位相振幅生成装置100は、照射部RLと、撮像部11と、生成部12とを備える。撮像部11は、照射部RLから照射される照射光REWを、撮像対象OBが散乱した散乱光SLを撮像する。生成部12は、撮像部11が撮像した撮像画像IPと、パターン情報RPIと、撮像対象OBの信号を示す情報fとに基づいて、撮像対象OBのスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、複素振幅情報gを生成する。電磁波位相振幅生成装置100は、散乱光SLを直接、撮像素子によって検出することができ、信号雑音比を高めることができる。また電磁波位相振幅生成装置100は、散乱光SLを直接、撮像素子によって検出することができるため、散乱光SLを直接、撮像素子によって検出しなかった場合と比較して、照射部RLから出射される光の強さを抑えることができる。つまり、電磁波位相振幅生成装置100は、撮像対象への侵襲性を小さくすることができる。

【0067】

電磁波位相振幅生成装置100は、複素振幅情報gを生成することができるため、撮像対象OBの厚みや、電磁波の屈折率の分布情報を得ることができる。電磁波位相振幅生成装置100は、撮像対象OBの厚みや電磁波の屈折率の分布情報を得ることができるため、定量性がある情報を、複素振幅情報gから算出できる。

【0068】

電磁波位相振幅生成装置100は、一度の撮像による撮像画像IPと、ランダムな照射パターンを示すパターン情報RPIとに基づいて、複素振幅情報gを生成することができるため、電磁波に弱い撮像対象OBを傷めずに、複素振幅情報gを生成することができる。また、電磁波位相振幅生成装置100は、一度の撮像による撮像画像IPと、ランダムな照射パターンを示すパターン情報RPIとに基づいて、複素振幅情報gを生成することができるため、動く撮像対象OBの場合にも、複素振幅情報gを生成することができる。

【0069】

生成部12は、生成した電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報gと撮像対象OBの信号を示す情報とに基づいて、電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報gを生成することを繰り返しおこなう。生成部12は、複素振幅情報gの生成を繰り返すことにより、非線形問題を、線形問題にすることができ、電磁波の少なくとも位相と振幅とを示す情報gを生成することができる。

【0070】

上述した、照射部RLが照射するランダムなパターンが、空間周波数上において一様にスペクトルが広がるパターンである場合には、電磁波位相振幅生成装置100は、照射部RLから照射光REWが照射される全ての面において、良好に散乱光SLの複素振幅情報

10

20

30

40

50

g を生成することができる。

【 0 0 7 1 】

また、電磁波とは、可視光線、X線、電子線、紫外線、赤外線、テラヘルツ波、ミリ波及びマイクロ波のうち少なくとも1つである。電磁波位相振幅生成装置100は、レンズを必要としない構成のため、従来、レンズを作ることが困難な、X線、電子線、紫外線、赤外線及びテラヘルツ波などの電磁波の位相と振幅とを示す情報を生成することができる。また、電磁波位相振幅生成装置100は、レンズを必要としない構成のため、電磁波位相振幅生成装置100の筐体の大きさを小さく構成することができる。

【 0 0 7 2 】

上述した、散乱板MPが撮像対象OBごとに複数種類存在する場合には、記憶部16には、散乱板MPの種類ごとにパターン情報RPIが記憶される。この場合には、生成部12は、操作検出部14が検出するユーザからの操作によって、読み出すパターン情報RPIを選択する。

10

【 0 0 7 3 】

上述した説明では、生成部12がスパース拘束演算をして複素振幅情報gを生成する場合について説明したが、複素振幅情報gは、他の装置が演算してもよい。他の装置とは、ネットワーク上のサーバが稼働するウェブサービスなどである。この場合には、生成部12は、複素振幅情報gを生成するために必要な情報を他の装置に出力する。生成部12は、他の装置が生成した複素振幅情報gを取得すればよい。

【 0 0 7 4 】

20

[第 2 の 実 施 形 態]

図7を参照して、本実施形態に係る電磁波位相振幅生成装置100-1の構成の一例について説明する。

図7は、電磁波位相振幅生成装置100-1の構成の一例を示す図である。本実施形態に係る電磁波位相振幅生成装置100-1は、撮像対象OBを三次元撮像できる点において、上述した電磁波位相振幅生成装置100と異なる。なお、第1の実施形態と同様の構成については同一の符号を付してその説明を省略する。

【 0 0 7 5 】

電磁波位相振幅生成装置100-1は、散乱光SLの複数距離の波面の状態に基づいて撮像対象OBのスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、散乱光SLの位相と振幅とを示す情報を生成する。ここで、散乱光SLの複数距離の波面とは、散乱光SLの波面のうち、散乱光SLの進行方向に互いに離れている複数の波面をいう。一例として、散乱光SLの複数距離の波面とは、ある瞬間において、撮像部11からの距離が互いに異なる波面をいう。

30

具体的には、記憶部16には、パターン情報RPIが記憶されている。本実施形態のパターン情報RPIは、散乱光SLの複数距離の波面の状態を示す距離毎波面パターン情報を含んでいる。つまり、記憶部16には、距離毎波面パターン情報を含むパターン情報RPIが記憶されている。

生成部12は、撮像部11から取得した撮像画像IPと、記憶部16から取得したパターン情報RPIとに基づいて、撮像対象OBのスパース性に基づくスパース拘束演算を行うことにより、散乱光SLの位相と振幅とを示す情報を生成する。ここで、本実施形態の生成部12は、パターン情報RPIに含まれる距離毎波面パターン情報に基づいて、散乱光SLの波面毎に撮像対象OBのスパース性に基づくスパース拘束演算を行う。

40

【 0 0 7 6 】

ここで、撮像部11が撮像する散乱光SLの各波面には、撮像対象OBの各断面面の情報が含まれている。生成部12は、散乱光SLの波面毎にスパース拘束演算を行うことにより、撮像対象OBの各断面面の位相と振幅とを示す情報を生成する。

電磁波位相振幅生成装置100-1は、生成部12が生成する撮像対象OBの各断面面の位相と振幅とを示す情報、つまり、撮像対象OBの三次元構造を示す情報を生成することができる。

50

【 0 0 7 7 】

電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 - 1 による撮像対象 O B の各断層面の位相と振幅とを示す情報の生成結果の一例を図 8 及び図 9 に示す。

図 8 は、生成部 1 2 が生成する撮像対象 O B の振幅断層画像の一例である。

図 9 は、生成部 1 2 が生成する撮像対象 O B の位相断層画像の一例である。

この図 8 及び図 9 は、撮像対象 O B がボルボックスである場合の一例を示す。図 8 及び図 9 に示すように、電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 - 1 によれば、撮像部 1 1 の光軸 A X 方向の位置を様々に変えた断層画像を生成することができる。また、電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 - 1 によれば、この断層画像を再構成することにより、撮像対象 O B の三次元構造を示す画像を得ることができる。

10

【 0 0 7 8 】

[第 3 の実施形態]

図 1 0 から図 2 3 を参照して、本実施形態に係る電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 - 2 の構成の一例について説明する。本実施形態に係る電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 - 2 は、撮像部 1 1 の解像度が比較的低い場合においても、高解像度の位相と振幅とを示す情報を得ることができる点において、上述した電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 及び電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 - 1 と異なる。なお、上述した各実施形態と同様の構成については同一の符号を付してその説明を省略する。

【 0 0 7 9 】

図 1 0 は、電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 - 2 の構成の一例を示す図である。

20

図 1 1 は、電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 - 2 の構成の他の一例を示す図である。

本実施形態の一例において、撮像部 1 1 の解像度が、生成部 1 2 によるスパース拘束演算の解像度よりも解像度が低いとは、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が比較的小さいことをいう。例えば、撮像部 1 1 の解像度が低いとは、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が、散乱板 M P のパターンの空間周波数を解像可能な程度の画素数よりも少ないことをいう。ここで、散乱率が互いに異なる散乱板 M P 上の各領域 1 つ 1 つを「散乱板 M P の散乱区画 S C」と称するとすると、撮像部 1 1 の解像度が低いとは、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が、散乱板 M P の散乱区画数よりも少ないことをいう。

また、「撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が、散乱板 M P の散乱区画数よりも少ないこと」とは、式 (1) 及び式 (2) に含まれる $|g|^2$ (すなわち、撮像画像 I P) の行列の大きさが、同式に含まれる M (すなわち、散乱板 M P のパターン情報 R P I) の行列の大きさに比べて小さいことを意味する。

30

【 0 0 8 0 】

図 1 0 には、符号化開口型回折イメージングの構成の一例を示す。この一例の構成の場合、撮像対象 O B から出射される物体光 O L が散乱板 M P に入射する。この物体光 O L に応じた散乱光 S L が散乱板 M P から出射され、出射された散乱光 S L が撮像部 1 1 に入射する。つまり、この一例の構成の場合、散乱板 M P が撮像対象 O B と撮像部 1 1 との間に配置される。

同図には、撮像部 1 1 の撮像素子の画素 P X の数と、散乱板 M P の散乱区画 S C の数との比が、1 : 4 である場合を示す。すなわち、同図の例では、撮像部 1 1 の撮像素子の画素 P X の数が、散乱板 M P の散乱区画 S C の数よりも少ない。

40

【 0 0 8 1 】

図 1 1 には、符号化照明型回折イメージングの構成の一例を示す。この一例の構成の場合、散乱板 M P から照射光 R E W が出射され、出射された照射光 R E W が撮像対象 O B に照射される。撮像対象 O B に照射光 R E W が照射されるとこの照射光 R E W に応じた散乱光 S L が撮像対象 O B から出射され、出射された散乱光 S L が撮像部 1 1 に入射する。つまり、この一例の構成の場合、撮像対象 O B が散乱板 M P と撮像部 1 1 との間に配置される。

同図の一例の場合においても、図 1 0 に示す一例と同様に、撮像部 1 1 の撮像素子の画素 P X の数と、散乱板 M P の散乱区画 S C の数との比が、1 : 4 である。すなわち、同図

50

の例においても、撮像部 1 1 の撮像素子の画素 P X の数が、散乱板 M P の散乱区画 S C の数よりも少ない。

【 0 0 8 2 】

なお、撮像部 1 1 の撮像素子の画素 P X の数と、散乱板 M P の散乱区画 S C の数との比は、いわゆるピニングによって可変にされていてもよい。ここで、ピニングとは、撮像素子の画素 P X のうち、いくつかの画素 P X をひとまとめにして 1 画素として撮像動作を行うことである。一例として、撮像部 1 1 の撮像素子の画素 P X について 2×2 ピニングを行うと、ピニング後の画素数がピニング前の $1/4$ になる。例えば、撮像部 1 1 の撮像素子の画素 P X の数と、散乱板 M P の散乱区画 S C の数とが一致している場合において 2×2 ピニングを行うと、撮像素子のピニング後の画素 P X の数と、散乱板 M P の散乱区画 S C の数との比が、 $1 : 4$ になる。本実施形態の撮像部 1 1 は、撮像対象 O B の種類や大きさに応じた、又は得たい解像度や処理速度に応じたピニングが可能にされていてもよい。

以下、この図 1 0 と図 1 1 とに示す構成例のうち、図 1 1 に示す符号化照明型回折イメージングの場合を一例にして説明する。

【 0 0 8 3 】

第 1 の実施形態において説明したように、生成部 1 2 は、式 (1) 及び式 (2) に示す演算により、すなわち、散乱板 M P のパターン情報 R P I に基づいてスパース拘束演算を行うことにより、散乱光 S L の位相と振幅とを示す情報を生成する。

本実施形態においては、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数よりも少ない。この場合、式 (1) 及び式 (2) に含まれる $|g|^2$ の行列の大きさと、同式に含まれる M の行列の大きさとが一致しない。なお、ここでいう行列の大きさとは、例えば、行列の行数及び列数のことである。このように、式 (1) 及び式 (2) に含まれる $|g|^2$ の行列の大きさと、同式に含まれる M の行列の大きさとが不一致の場合には、2 つの行列の対応関係に基づいて、散乱光 S L の位相と振幅とを生成する演算を行う。これら 2 つの行列の大きさが不一致の場合、例えば、2 つの行列の大きさを一致させることにより、散乱光 S L の位相と振幅とを生成する演算を行う。

【 0 0 8 4 】

このように 2 つの行列の大きさが不一致である場合に、2 つの行列の大きさを一致させる手順には、例えば、

(手順 1 : 従来の手順) 撮像部 1 1 が撮像した撮像画像 I P を補間 (例えば、線形補間) することにより、散乱光 S L の位相と振幅とを生成する。

(手順 2 : 本実施形態の手順) 撮像部 1 1 が撮像した撮像画像 I P を補間せずに、散乱光 S L の位相と振幅とを生成する。

の 2 通りがある。本実施形態の生成部 1 2 は、(手順 2) を採用する。

【 0 0 8 5 】

ここで、(手順 1) の場合には、 $|g|^2$ の行列の要素を補間 (例えば、線形補間) しつつ行列の大きさを拡大することにより、2 つの行列の大きさを一致させる。この (手順 1) の場合には、撮像部 1 1 が撮像した撮像画像 I P には含まれていない情報が、補間によって生成される。

【 0 0 8 6 】

一方、上述した (手順 2) による場合、すなわち本実施形態の生成部 1 2 は、式 (1) 及び式 (2) に含まれる $|g|^2$ の要素を補間せずに演算を行う。具体的には、本実施形態の記憶部 1 6 には、 $|g|^2$ の行列の各要素 (すなわち、撮像部 1 1 の画素) と、M の行列の各要素 (すなわち、散乱板 M P の画素) との対応関係が記憶されている。生成部 1 2 は、記憶部 1 6 に記憶されているこの対応関係に基づいて、撮像画像 I P の画素値を、M の行列の各要素に対応付けることにより、散乱光 S L の位相と振幅とを生成する。この $|g|^2$ の行列の各要素と、M の行列の各要素との対応関係とは、撮像部 1 1 の解像度と生成部 1 2 によるスパース拘束演算の解像度との対応関係の一例である。

この (手順 2) の場合、すなわち本実施形態の生成部 1 2 によれば、撮像画像 I P に対する補間を行わないため、撮像部 1 1 が撮像した撮像画像 I P には含まれていない情報が

10

20

30

40

50

生成されない。

【 0 0 8 7 】

[実験結果の一例]

本実施形態の電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 - 2 による振幅画像及び位相画像の生成実験の結果の一例について、図 1 2 から図 2 3 を参照して説明する。まず、図 1 2 から図 1 7 を参照して振幅画像についての実験結果の一例を説明する。次に、図 1 8 から図 2 3 を参照して位相画像についての実験結果の一例を説明する。

【 0 0 8 8 】

[振幅画像についての実験結果の一例]

図 1 2 は、撮像画像 I P の画素数の比較の一例を示す図である。図 1 2 (A) は、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が、散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合の撮像部 1 1 による撮像画像 I P (画像 P I C 1) の一例を示す。図 1 2 (B) は、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が、散乱板 M P の散乱区画数よりも少ない場合の撮像部 1 1 による撮像画像 I P (画像 P I C 2) の一例を示す。ここでは、撮像対象 O B がワイヤー (細い金属線) である。この一例では、撮像対象 O B であるワイヤーの位置が周期的に移動する。したがって、この一例では撮像画像 I P に撮像されているワイヤーの位置は、撮像タイミングによって互いに異なっている。

この一例に示すように、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数よりも少ない場合 (図 1 2 (B)) には、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合 (同図 (A)) に比べて撮像画像 I P の画素どうしの間隔が大きい。すなわち、撮像素子の画素数が、散乱板 M P の散乱区画数よりも少ない場合には、撮像画像 I P の解像度が低い。

【 0 0 8 9 】

図 1 3 は、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合の散乱光 S L の振幅画像及び位相画像の一例を示す図である。図 1 3 (A) は、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合の、散乱光 S L の振幅画像 (画像 P I C 3) の一例である。図 1 3 (B) は、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合の、散乱光 S L の位相画像 (画像 P I C 4) の一例である。同図は、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が比較的多い場合、すなわち解像度が高い場合における散乱光 S L の振幅画像及び位相画像を示している。

【 0 0 9 0 】

図 1 4 は、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数よりも少ない場合における、生成部 1 2 による散乱光 S L の振幅画像及び位相画像の一例を示す図である。すなわち、同図は、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が比較的少ない場合、つまり解像度が低い場合における散乱光 S L の振幅画像 (画像 P I C 5) 及び位相画像 (画像 P I C 6) を示している。生成部 1 2 は、上述した (手順 2) によって散乱光 S L の振幅画像及び位相画像を生成する。より具体的には、生成部 1 2 は、式 (1) 及び式 (2) に含まれる $|g|^2$ の行列の各要素 (すなわち、撮像部 1 1 の画素) と、M の行列の各要素 (すなわち、散乱板 M P の散乱区画 S C) との対応関係に基づいて撮像画像 I P の画素値を M の行列の各要素に対応付けることにより、散乱光 S L の位相と振幅とを生成する。つまり、生成部 1 2 は、 $|g|^2$ の要素の補間をしない。図 1 4 (A) は、 $|g|^2$ の要素の補間をしなかった場合の散乱光 S L の振幅画像の一例である。図 1 4 (B) は、 $|g|^2$ の要素の補間をしなかった場合の散乱光 S L の位相画像の一例である。

撮像部 1 1 の解像度が比較的低い場合 (図 1 4 に示す場合) であっても、撮像部 1 1 の解像度が比較的高い場合 (図 1 3 に示す場合) と同等の解像度の振幅画像及び位相画像が得られている。

【 0 0 9 1 】

ここで比較対象として、上述した (手順 1) 、すなわち従来手法による演算結果の一例を図 1 5 に示す。

図 1 5 は、従来手法による散乱光 S L の振幅画像 (画像 P I C 7) 及び位相画像 (画像

10

20

30

40

50

FIG 8) の一例を示す図である。従来手法によると、振幅画像及び位相画像ともに、本実施形態の生成部 12 による場合 (図 14 の場合) に比べて解像度が低い。

【0092】

本実施形態の場合、撮像部 11 の撮像素子の画素数が散乱板 MP の散乱区画数よりも少ない。つまり、本実施形態の場合、撮像部 11 の解像度が散乱板 MP の空間周波数に対して低い。このため、仮に、撮像部 11 が撮像した撮像画像 IP を 1 フレームだけ使用して、生成部 12 が振幅画像や位相画像を生成する場合には、生成された画像の解像度は低くなってしまふ。

しかしながら、上述したように、本実施形態の生成部 12 は、複数フレームの撮像画像 IP を使用して、振幅画像や位相画像を繰り返し生成する。これら複数フレームのそれぞれの撮像画像 IP には、撮像対象 OB が撮像されている。これら複数の撮像画像 IP にそれぞれ撮像されている撮像対象 OB は、フレーム毎に互いに異なる。つまり、これら複数の撮像画像 IP には、撮像対象 OB の互いに異なる情報が含まれている。

生成部 12 は、撮像画像 IP に含まれる撮像対象 OB の情報をフレーム毎に繰り返し取得することにより、撮像対象 OB について、1 フレームの撮像画像 IP から得られる情報よりも多くの情報を取得することができる。これにより、生成部 12 は、撮像部 11 の解像度を超える解像度の振幅画像や位相画像を生成することができる。

【0093】

ここで、一般的に、撮像素子は、撮像された画像の画素値を示す信号を画素毎に出力する。この画素値を示す信号の出力時間が画素毎に一定である場合、撮像素子の画素数が少ない場合には、画素数が多い場合に比べて撮像素子の全画素からの信号の出力時間が短い。つまり、画素数が少ない場合には、画素数が多い場合に比べて撮像動作をより高速にすることができる。

【0094】

図 16 は、時系列に生成された振幅画像及び位相画像の一例を示す図である。図 16 (A) は、図 12 (A) に示した条件において、すなわち撮像部 11 の撮像素子の画素数が散乱板 MP の散乱区画数と一致している場合において生成された振幅画像及び位相画像の一例を示す。図 16 (B) 及び図 16 (C) は、いずれも図 12 (B) に示した条件において、すなわち撮像部 11 の撮像素子の画素数が散乱板 MP の散乱区画数よりも少ない場合において生成された振幅画像及び位相画像の一例を示す。ここで、図 16 (B) は、上述した (手順 1) すなわち従来の手順によって生成された振幅画像及び位相画像の一例を示す。図 16 (C) は、上述した (手順 2) すなわち本実施形態の生成部 12 が採用する手順によって生成された振幅画像及び位相画像の一例を示す。

【0095】

上述したように、本実施形態の撮像部 11 の解像度は、生成部 12 によるスパーズ拘束演算の解像度よりも解像度が低い。つまり、本実施形態の撮像部 11 の画素数は、散乱板 MP の散乱区画数よりも少ない。換言すれば、撮像部 11 の撮像素子の画素数は、撮像素子の画素数が散乱板 MP の散乱区画数と一致している場合に比べて少ない。本実施形態の撮像部 11 は、撮像素子の画素数が散乱板 MP の散乱区画数と一致している場合 (図 16 (A)) に比べて、撮像動作が高速化される (図 16 (C))。

【0096】

また、本実施形態の撮像部 11 の解像度は、上述した (手順 2) によって振幅画像及び位相画像を生成する。一方、従来手法である (手順 1) による場合には、上述したように、撮像部 11 が撮像した撮像画像 IP には含まれていない情報が、補間によって生成される。この撮像画像 IP には含まれていない情報は、上述した式 (1) 及び式 (2) による演算においては雑音 (ノイズ) 成分に相当する。したがって、従来手法である (手順 1) によって生成された振幅画像及び位相画像 (図 16 (B)) は、(手順 2) によって生成された振幅画像及び位相画像 (図 16 (C)) に比べて解像度が低い。すなわち、本実施形態の生成部 12 は、従来手法に比べて解像度が高い振幅画像及び位相画像を生成することができる。

10

20

30

40

50

【 0 0 9 7 】

図 1 7 は、振幅画像の解像度の比較結果の一例を示す図である。同図には、振幅画像が示す撮像対象 O B の座標と振幅（強度）との関係を示す。撮像素子が、本実施形態の撮像部 1 1 の撮像素子よりも高解像度である場合の波形を波形 W 1 A 及び波形 W 1 B に示す。

このうち波形 W 1 A は、図 1 6 (A) のうち、撮像対象 O B が停止している場合の振幅画像の解像度を示す。この波形 W 1 A は、振幅画像の解像度の基準例である。

波形 W 1 B は、図 1 6 (A) のうち、撮像対象 O B が移動している場合の振幅画像の解像度を示す。撮像素子が、本実施形態の撮像部 1 1 の撮像素子よりも高解像度である場合には、撮像動作の速度が遅いため、画像にブレが生じる。この波形 W 1 B は、上述した波形 W 1 A よりも座標の広がりが大きく、基準例に比べて解像度が低下していることを示している。

10

本実施形態の撮像部 1 1 の解像度の場合において、上述の（手順 2）すなわち本実施形態の生成部 1 2 が採用する手法によって振幅画像を生成した場合（つまり、図 1 6 (C) の場合）の波形を波形 W 1 C に示す。波形 W 1 C は、図 1 6 (C) のうち、撮像対象 O B が移動している場合の振幅画像の解像度を示す。この波形 W 1 C は、上述した波形 W 1 B よりも座標の広がりが小さく、解像度が向上しており、撮像対象 O B が移動している場合であっても、基準例と同等の解像度が得られていることを示している。

【 0 0 9 8 】

[位相画像についての実験結果の一例]

図 1 8 は、撮像画像 I P の画素数の比較の他の一例を示す図である。図 1 8 (A) は、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が、散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合の撮像部 1 1 による撮像画像 I P (画像 P I C 9) の一例を示す。図 1 8 (B) は、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が、散乱板 M P の散乱区画数よりも少ない場合の撮像部 1 1 による撮像画像 I P (画像 P I C 1 0) の一例を示す。ここでは、撮像対象 O B の周囲（例えば、空気 A I R）の位相とは異なる位相を有する物体の一例として、薄いガラス（例えば、カバーガラス C G）を撮像対象 O B にした。この一例に示すように、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数よりも少ない場合（図 1 8 (B)）には、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合（同図 (A)）に比べて撮像画像 I P の画角が狭い。すなわち、撮像素子の画素数が、散乱板 M P の散乱区画数よりも少ない場合には、撮像画像 I P の解像度が低い。

20

30

【 0 0 9 9 】

図 1 9 は、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合の散乱光 S L の振幅画像及び位相画像の一例を示す図である。図 1 9 (A) は、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合の、散乱光 S L の振幅画像（画像 P I C 1 1）の一例である。図 1 9 (B) は、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合の、散乱光 S L の位相画像（画像 P I C 1 2）の一例である。同図は、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が比較的多い場合、すなわち解像度が高い場合における散乱光 S L の振幅画像及び位相画像を示している。

【 0 1 0 0 】

図 2 0 は、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数よりも少ない場合における、生成部 1 2 による散乱光 S L の振幅画像及び位相画像の一例を示す図である。すなわち、同図は、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が比較的少ない場合、つまり解像度が低い場合における散乱光 S L の振幅画像（画像 P I C 1 3）及び位相画像（画像 P I C 1 4）を示している。生成部 1 2 は、上述した（手順 2）によって散乱光 S L の振幅画像及び位相画像を生成する。この（手順 2）による場合、上述したように、生成部 1 2 は、 $|g|^2$ の要素の補間をしない。図 2 0 (A) は、 $|g|^2$ の要素の補間をしなかった場合の散乱光 S L の振幅画像の一例である。図 2 0 (B) は、 $|g|^2$ の要素の補間をしなかった場合の散乱光 S L の位相画像の一例である。

40

撮像部 1 1 の解像度が比較的低い場合（図 2 0 に示す場合）であっても、撮像部 1 1 の解像度が比較的高い場合（図 1 9 に示す場合）と同等の解像度の振幅画像及び位相画像が

50

得られている。

【 0 1 0 1 】

ここで比較対象として、上述した（手順 1）、すなわち従来手法による演算結果の一例を図 2 1 に示す。

図 2 1 は、従来手法による散乱光 S L の振幅画像（画像 P I C 1 5）及び位相画像（画像 P I C 1 6）の一例を示す図である。従来手法によると、振幅画像及び位相画像ともに、本実施形態の生成部 1 2 による場合（図 2 0 の場合）に比べて解像度が低い。

【 0 1 0 2 】

図 2 2 は、時系列に生成された振幅画像及び位相画像の他の一例を示す図である。図 2 2（A）は、図 1 8（A）に示した条件において、すなわち撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合において生成された振幅画像及び位相画像の一例を示す。図 2 2（B）及び図 2 2（C）は、いずれも図 1 8（B）に示した条件において、すなわち撮像部 1 1 の撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数よりも少ない場合において生成された振幅画像及び位相画像の一例を示す。ここで、図 2 2（B）は、上述した（手順 1）すなわち従来の手順によって生成された振幅画像及び位相画像の一例を示す。図 2 2（C）は、上述した（手順 2）すなわち本実施形態の生成部 1 2 が採用する手順によって生成された振幅画像及び位相画像の一例を示す。

【 0 1 0 3 】

上述したように、本実施形態の撮像部 1 1 の解像度は、生成部 1 2 によるスパース拘束演算の解像度よりも解像度が低い。つまり、本実施形態の撮像部 1 1 の画素数は、散乱板 M P の散乱区画数よりも少ない。換言すれば、撮像部 1 1 の撮像素子の画素数は、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合に比べて少ない。本実施形態の撮像部 1 1 は、撮像素子の画素数が散乱板 M P の散乱区画数と一致している場合（図 2 2（A））に比べて、撮像動作が高速化される（図 2 2（C））。

【 0 1 0 4 】

従来手法である（手順 1）によって生成された振幅画像及び位相画像（図 2 2（B））は、（手順 2）によって生成された振幅画像及び位相画像（図 2 2（C））に比べて解像度が低い。すなわち、本実施形態の生成部 1 2 は、従来手法に比べて解像度が高い振幅画像及び位相画像を生成することができる。

【 0 1 0 5 】

図 2 3 は、位相画像の解像度の比較結果の一例を示す図である。同図には、位相画像が示す撮像対象 O B の座標と位相との関係を示す。撮像素子が、本実施形態の撮像部 1 1 の撮像素子よりも高解像度である場合の波形を波形 W 2 A 及び波形 W 2 B に示す。

このうち波形 W 2 A は、図 2 2（A）のうち、撮像対象 O B が停止している場合の位相画像の解像度を示す。この波形 W 2 A は、位相画像の解像度の基準例である。

波形 W 2 B は、図 2 2（A）のうち、撮像対象 O B が移動している場合の位相画像の解像度を示す。撮像素子が、本実施形態の撮像部 1 1 の撮像素子よりも高解像度である場合には、撮像動作の速度が遅いため、画像にブレが生じる。この波形 W 2 B は、上述した波形 W 2 A よりも基準座標（この一例では、0（ゼロ））における位相の変化が明確ではなく、基準例に比べて解像度が低下していることを示している。

本実施形態の撮像部 1 1 の解像度の場合において、上述の（手順 2）すなわち本実施形態の生成部 1 2 が採用する手法によって位相画像を生成した場合（つまり、図 2 2（C）の場合）の波形を波形 W 2 C に示す。波形 W 2 C は、図 2 2（C）のうち、撮像対象 O B が移動している場合の位相画像の解像度を示す。この波形 W 2 C は、上述した波形 W 2 B よりも位相の変化が明確、すなわち解像度が向上しており、撮像対象 O B が移動している場合であっても、基準例と同等の解像度が得られていることを示している。

【 0 1 0 6 】

以上説明したように、本実施形態の電磁波位相振幅生成装置 1 0 0 - 2 は、撮像部 1 1 の画素数の低減により動作を高速化するとともに、画素値を補間せずに振幅画像及び位相画像の生成を行うことにより振幅画像及び位相画像の解像度を向上させることができる。

つまり、本実施形態の電磁波位相振幅生成装置 100 - 2 は、動作の高速化と、生成される振幅画像及び位相画像の解像度を向上させることとを両立させることができる。

【0107】

以上、本発明の実施形態を、図面を参照して詳述してきたが、具体的な構成はこの実施形態に限られるものではなく、本発明の趣旨を逸脱しない範囲で適宜変更を加えることができる。

【0108】

なお、上述の電磁波位相振幅生成装置 100 は内部にコンピュータを有している。そして、上述した装置の各処理の過程は、プログラムの形式でコンピュータ読み取り可能な記録媒体に記憶されており、このプログラムをコンピュータが読み出して実行することによって、上記処理が行われる。ここでコンピュータ読み取り可能な記録媒体とは、磁気ディスク、光磁気ディスク、CD-ROM、DVD-ROM、半導体メモリ等をいう。また、このコンピュータプログラムを通信回線によってコンピュータに配信し、この配信を受けたコンピュータが当該プログラムを実行するようにしてもよい。

10

【0109】

また、上記プログラムは、前述した機能の一部を実現するためのものであってもよい。さらに、前述した機能をコンピュータシステムにすでに記録されているプログラムとの組み合わせで実現できるもの、いわゆる差分ファイル(差分プログラム)であってもよい。

【符号の説明】

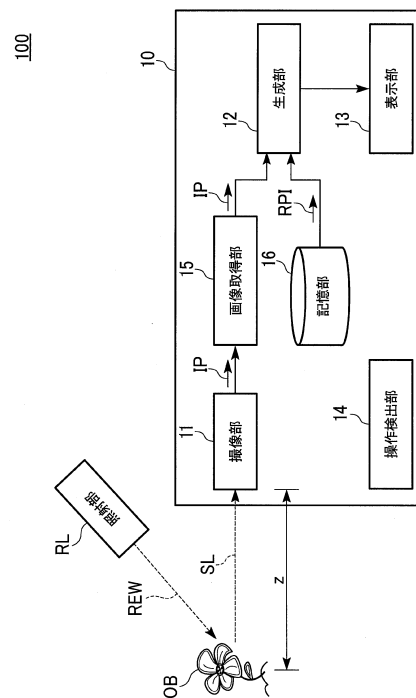
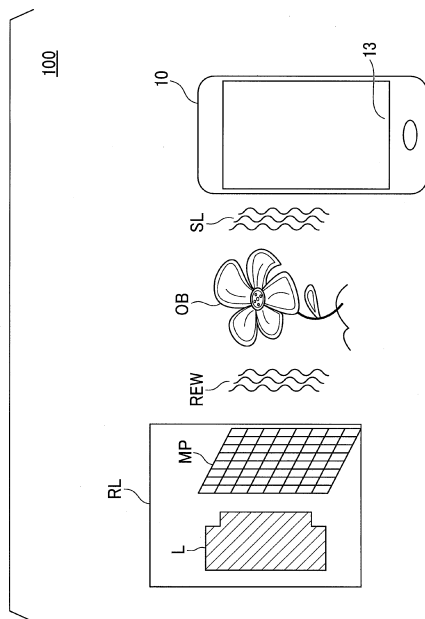
【0110】

10...端末装置、11...撮像部、12...生成部、13...表示部、14...操作検出部、15...画像取得部、16...記憶部、100...電磁波位相振幅生成装置、RL...照射部、REW...照射光、SL...散乱光、MP...散乱板

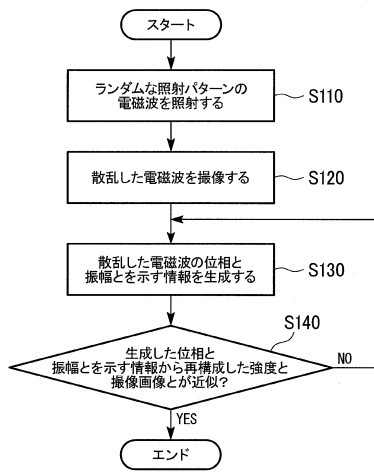
20

【図1】

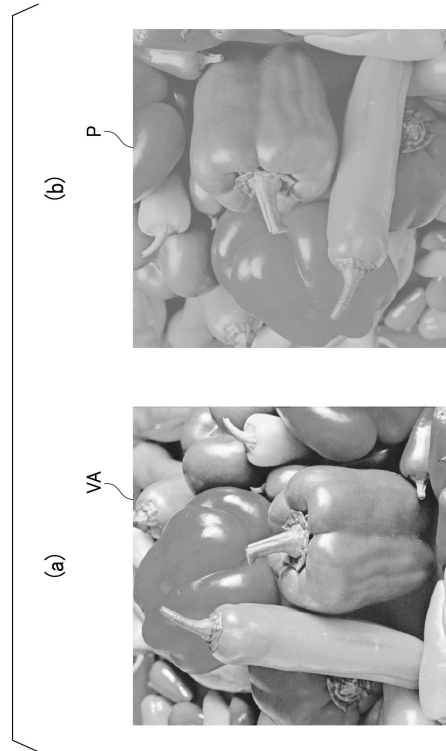
【図2】



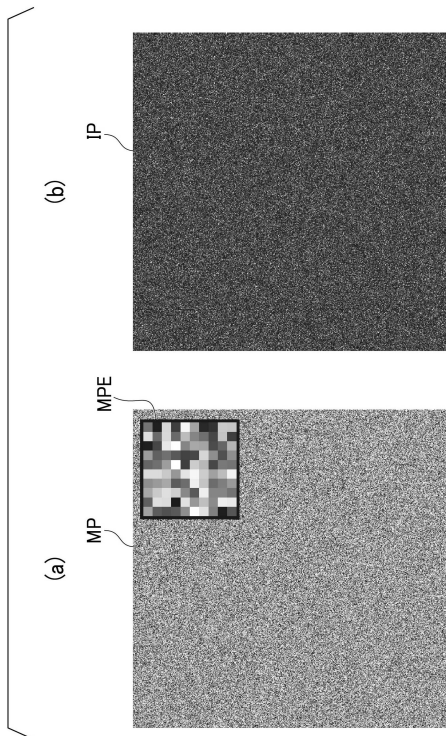
【図3】



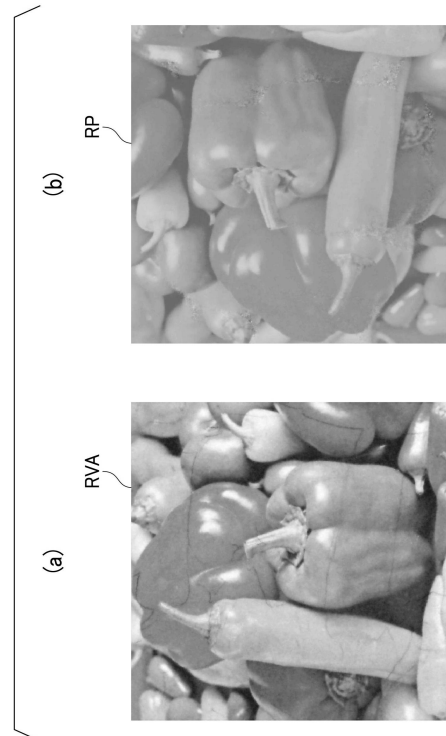
【図4】



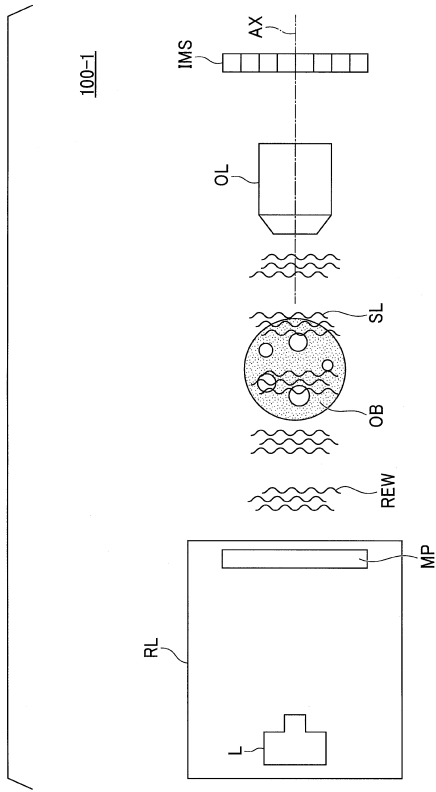
【図5】



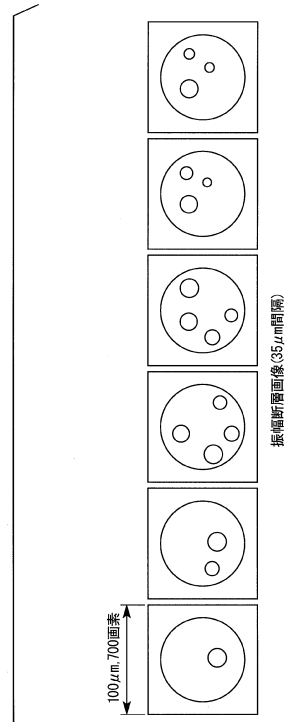
【図6】



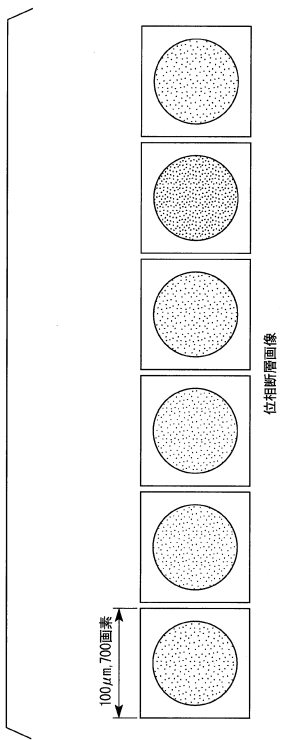
【 図 7 】



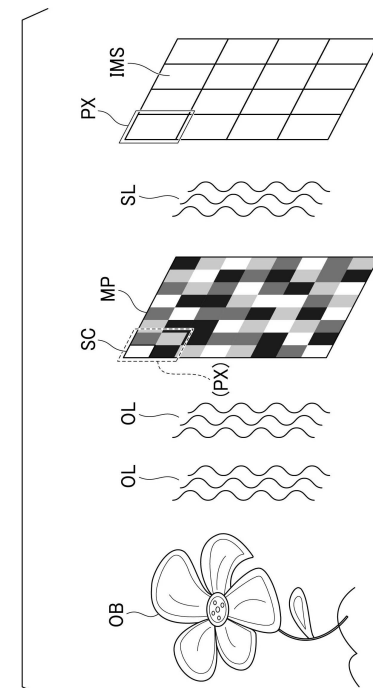
【 図 8 】



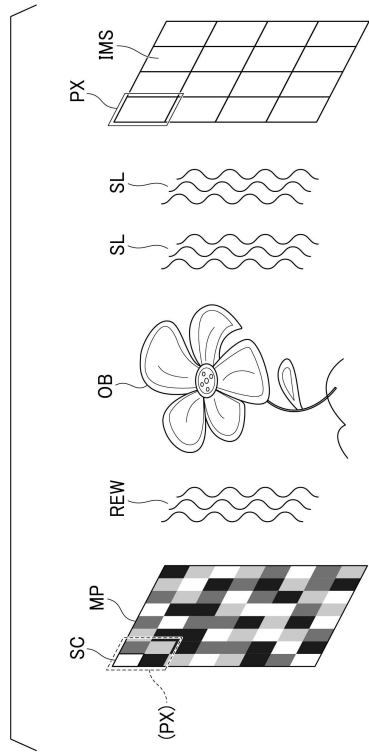
【 図 9 】



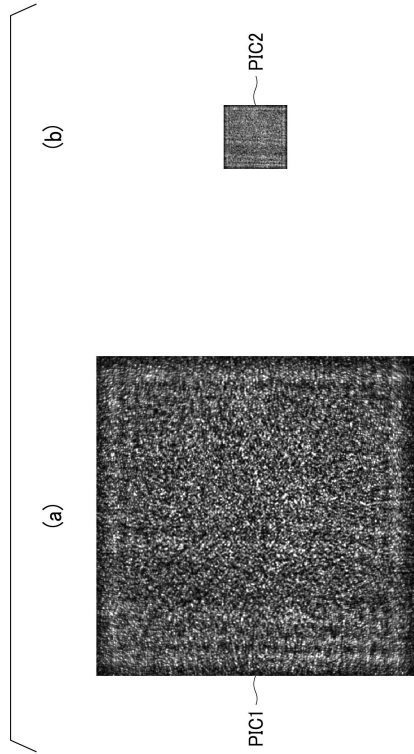
【 図 10 】



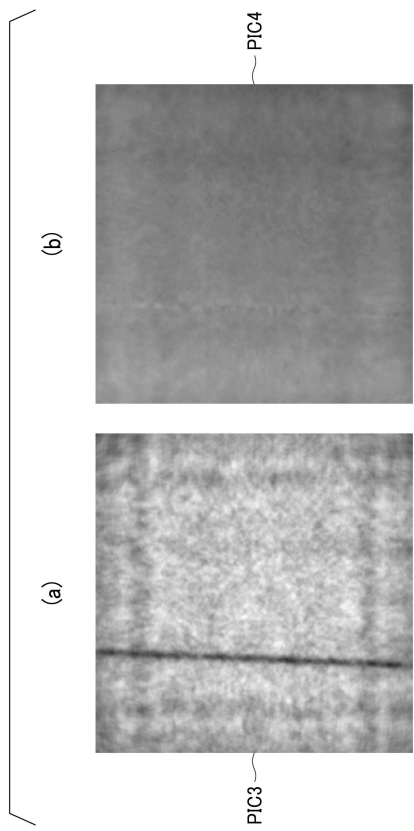
【 図 1 1 】



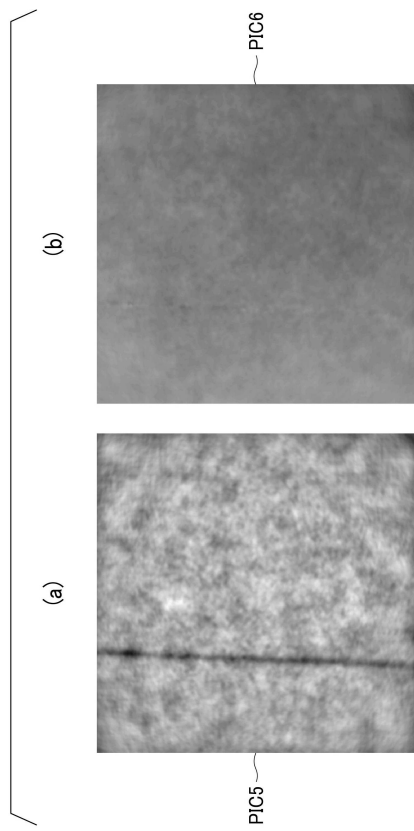
【 図 1 2 】



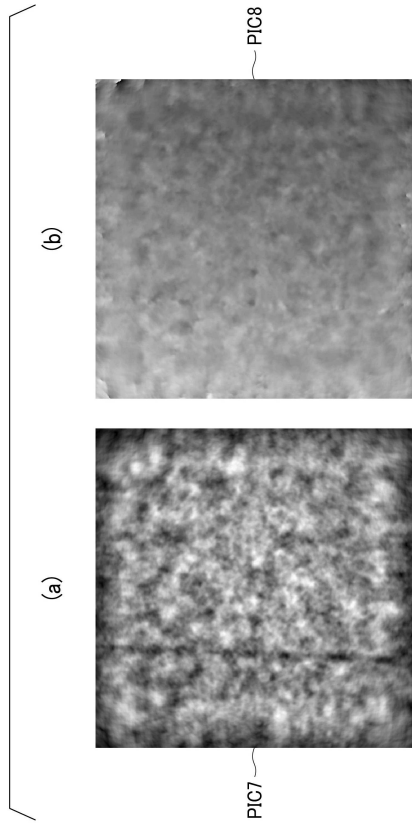
【 図 1 3 】



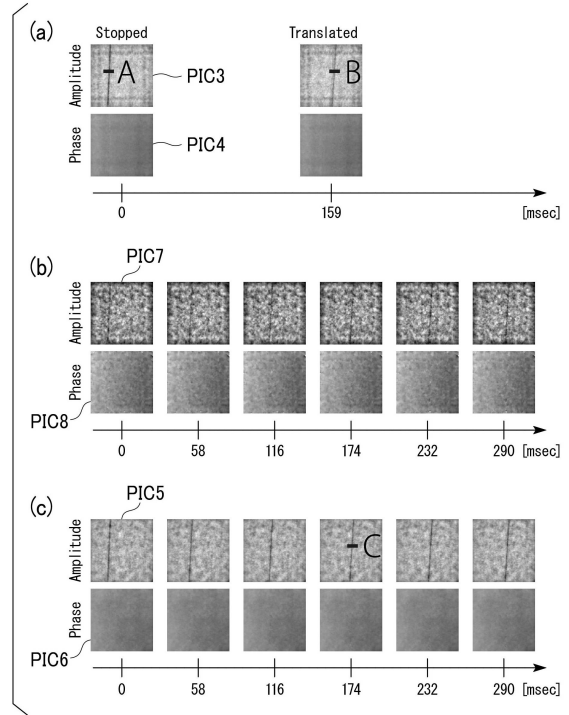
【 図 1 4 】



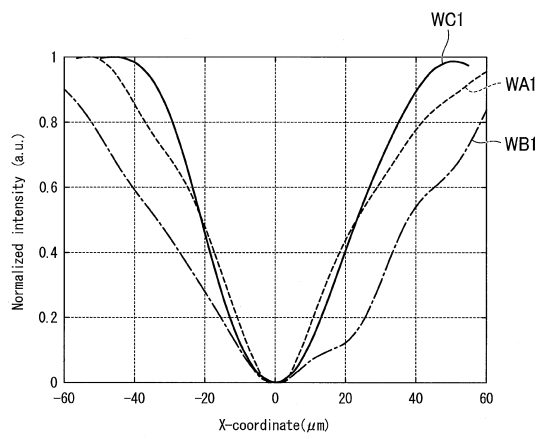
【 図 1 5 】



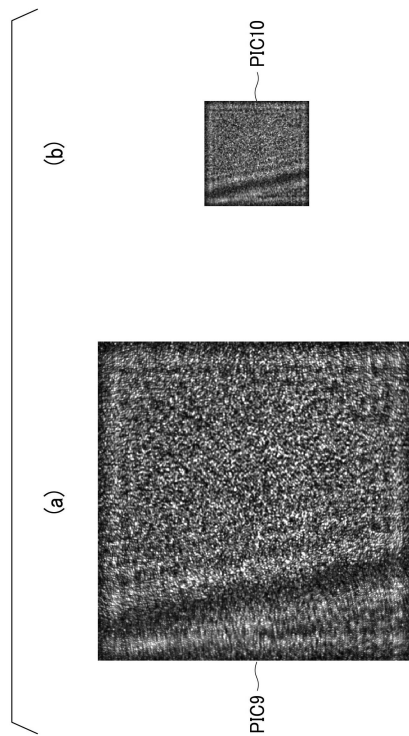
【 図 1 6 】



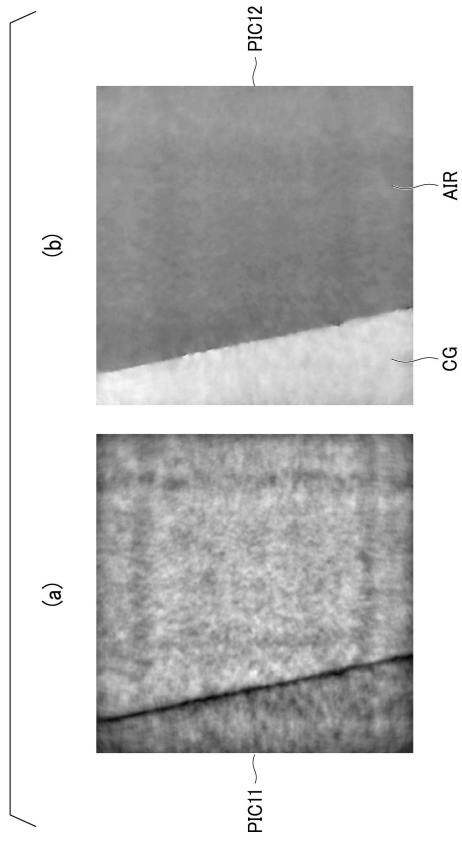
【 図 1 7 】



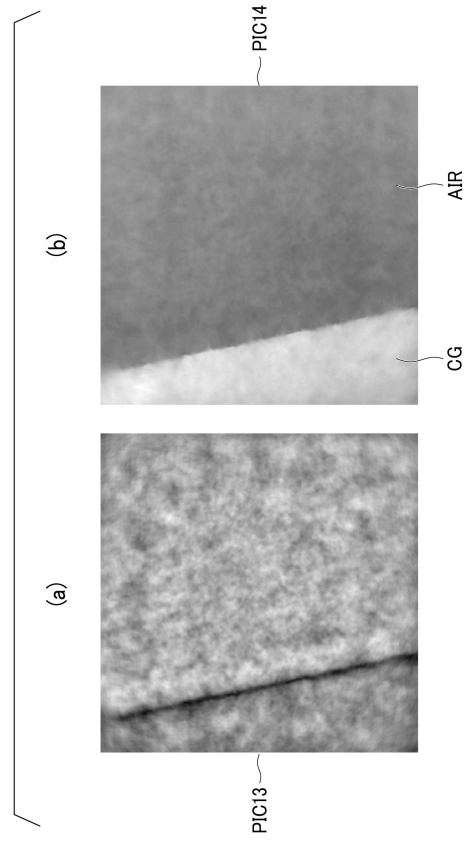
【 図 1 8 】



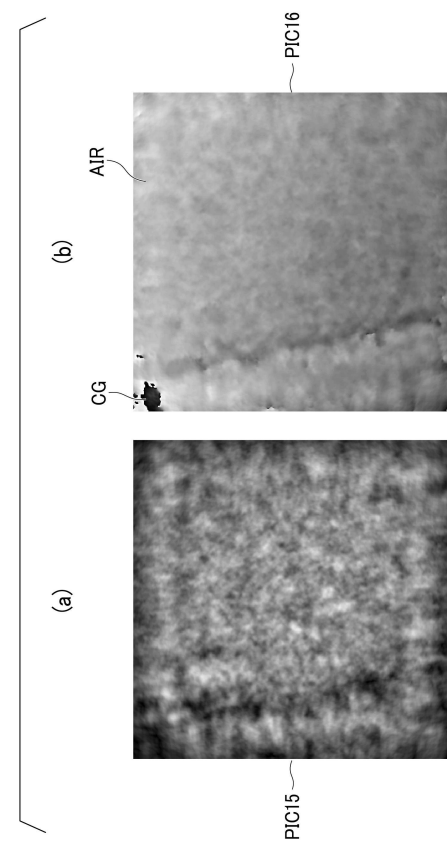
【図 19】



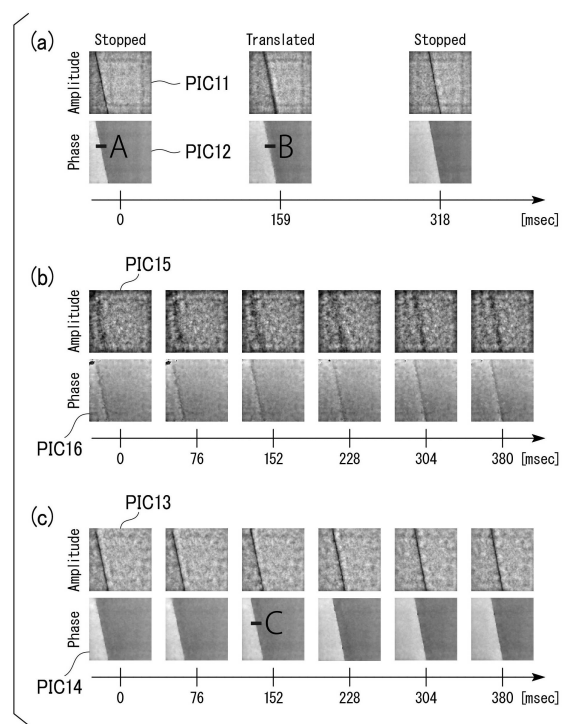
【図 20】



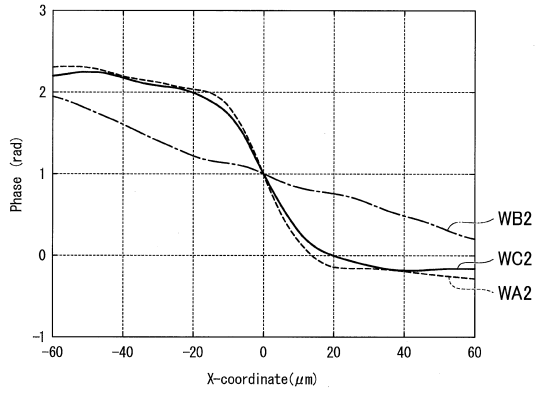
【図 21】



【図 22】



【 2 3 】



 フロントページの続き

特許法第30条第2項適用 1 ウェブサイトの掲載日 :平成28年2月16日 ウェブサイトのアドレス :<https://www.osapublishing.org/viewmedia.cfm?uri=oe-24-4-3765&seq=0> 2 ウェブサイトの掲載日 :平成28年3月10日 ウェブサイトのアドレス <https://www.osapublishing.org/ao/abstract.cfm?uri=ao-55-8-1830> 3 集会名:3D Image Acquisition and Display:Technology, Perception and Applications 2016 開催日 :平成28年7月25日 開催場所:Kongresshaus Stadthalle Heidelberg(Heidelberg Germany) 4 ウェブサイトの掲載日 :平成28年7月25日 ウェブサイトのアドレス:<https://www.osapublishing.org/abstract.cfm?uri=3D-2016-TW3A.2>

- (72)発明者 堀 崎 遼一
大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内
- (72)発明者 谷田 純
大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内
- (72)発明者 江上 力貴
大阪府吹田市山田丘1番1号 国立大学法人大阪大学内

審査官 横尾 雅一

- (56)参考文献 特開2014-013234(JP,A)
国際公開第2013/066896(WO,A1)
特開2016-057172(JP,A)
特開2015-052663(JP,A)
KATKOVNIK V, ASTOLA J, Phase retrieval via spatial light modulator phase modulation in 4f optical setup: numerical inverse, J. Opt. Soc. Am. A, 2011年12月19日, Vol. 29, No. 1, p.105-116
KATKOVNIK V, ASTOLA J, Compressive sensing computational ghost imaging, J. Opt. Soc. Am. A, 2012年08月01日, Vol. 29, No. 8, p.1556-1567, ISSN 1084-7529

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01J 3/00-3/52
G01J 9/00-9/04
G01N 21/00-21/61
G01M 11/00-11/02
G02F 1/13
G02B 19/00-21/00
G02B 21/06-21/36
JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)