

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号  
特許第7624552号  
(P7624552)

(45)発行日 令和7年1月30日(2025.1.30)

(24)登録日 令和7年1月22日(2025.1.22)

(51)国際特許分類		F I			
G 0 6 E	3/00 (2006.01)	G 0 6 E	3/00		
G 0 6 G	7/60 (2006.01)	G 0 6 G	7/60		
G 0 2 F	3/00 (2006.01)	G 0 2 F	3/00	5 0 1	

請求項の数 8 (全18頁)

(21)出願番号	特願2024-501299(P2024-501299)	(73)特許権者	000005186 株式会社フジクラ 東京都江東区木場1丁目5番1号
(86)(22)出願日	令和5年2月6日(2023.2.6)	(74)代理人	110000338 弁理士法人 HARAKENZO WOR LD PATENT & TRADEMA RK
(86)国際出願番号	PCT/JP2023/003772	(72)発明者	大竹 守 東京都江東区木場1-5-1 株式会社 フジクラ内
(87)国際公開番号	WO2023/157694	(72)発明者	日下 裕幸 東京都江東区木場1-5-1 株式会社 フジクラ内
(87)国際公開日	令和5年8月24日(2023.8.24)	(72)発明者	柏木 正浩 東京都江東区木場1-5-1 株式会社 最終頁に続く
審査請求日	令和6年7月2日(2024.7.2)		
(31)優先権主張番号	特願2022-25020(P2022-25020)		
(32)優先日	令和4年2月21日(2022.2.21)		
(33)優先権主張国・地域又は機関	日本国(JP)		

(54)【発明の名称】 光演算装置、及び、光演算装置の制御方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

少なくとも1個の受光セルを含むイメージセンサと、  
位相変調量が互いに独立に設定可能な複数のセルを含む光変調素子と、  
信号光を前記イメージセンサに入射するモニタ用信号光と前記光変調素子に入射する演算用信号光とに分岐する光分岐素子と、  
前記光変調素子の各セルの位相変調量を、該セルに対応する前記イメージセンサの受光セルにて検出された前記モニタ用信号光の強度に応じて設定する制御部と、を備えている、  
ことを特徴とする光演算装置。

【請求項2】

前記制御部は、前記光変調素子の各セルの位相変調量  $(P)$  を、  $(P) = P \times +$  に従って設定する(ここで、 $P$  は、該セルに対応する前記イメージセンサの受光セルにて検出された前記モニタ用信号光の強度であり、 $+$  及び  $-$  は、定数である)、  
ことを特徴とする請求項1に記載の光演算装置。

【請求項3】

当該光演算装置は、前記光変調素子として、複数の反射型の光変調素子を備え、  
前記モニタ用信号光は、前記光分岐素子を透過した信号光であり、  
前記演算用信号光は、前記光分岐素子に反射された信号光である、  
ことを特徴とする請求項1又は2に記載の光演算装置。

【請求項4】

前記複数の反射型の光変調素子は、一体化されている、  
ことを特徴とする請求項 3 に記載の光演算装置。

【請求項 5】

当該光演算装置は、前記光変調素子として、複数の透過型の光変調素子を備え、  
前記モニタ用信号光は、前記光分岐素子に反射された信号光であり、  
前記演算用信号光は、前記光分岐素子を透過した信号光である、  
ことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光演算装置。

【請求項 6】

当該光演算装置は、前記光変調素子、前記イメージセンサ、及び前記光分岐素子の組み  
合わせを複数段備え、

2 段目以降の各段の前記光分岐素子には、該段の前段の光変調素子にて生成された信号  
光が入力される、

ことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光演算装置。

【請求項 7】

前記制御部は、前記光変調素子の全てのセルの位相変調量が一定の値に収束した後、正  
しい演算結果を表す信号光が出力されていることを示す信号を出力する、

ことを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の光演算装置。

【請求項 8】

少なくとも 1 個の受光セルを含むイメージセンサと、位相変調量が互いに独立に設定可  
能な複数のセルを含む光変調素子と、信号光を前記イメージセンサに入射するモニタ用信  
号光と前記光変調素子に入射する演算用信号光とに分岐する光分岐素子と、を備えた光演  
算装置の制御方法であって、

前記光変調素子の各セルの位相変調量を、該セルに対応する前記イメージセンサの受光  
セルにて検出された前記モニタ用信号光の強度に応じて設定する工程を含む、

ことを特徴とする光演算装置の制御方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、光変調素子を備えた光演算装置、及び、そのような光演算装置の制御方法に  
関する。

【背景技術】

【0002】

複数のセルを有し、各セルを透過した信号光を相互に干渉させることによって、予め定  
められた演算を光学的に実行するように設計された光変調素子が知られている。このよう  
な光変調素子を用いた光学的な演算には、プロセッサを用いた電氣的な演算と比べて高速  
且つ低消費電力であるという利点がある。また、並べて配置された 2 つ以上の光変調素子  
を信号光に順に作用させることによって、複数段光演算を実現することができる。

【0003】

特許文献 1 には、入力層、中間層、及び出力層を有する光ニューラルネットワークが開  
示されている。上述した光変調素子は、例えば、このような光ニューラルネットワークの  
中間層として利用することが可能である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【文献】米国特許第 7 8 4 7 2 2 5 号明細書

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、光変調素子の各セルにて行われる位相変調は、変調前の信号光の位相  
に予め定められた位相 を加える線形な位相変調 ( + ) である。したがって

10

20

30

40

50

、光変調素子にて実現できる光演算は、限定的なものに過ぎなかった。例えば、ニューラルネットワークを構成する各ニューロンでは活性化関数による閾値演算が行われるが、このような閾値演算を光変調素子により実現することは困難であった。

【 0 0 0 6 】

本発明の一態様は、上記の問題に鑑みてなされたものであり、その目的は、光変調素子の各セルにおいて線形な位相変調を行う従来の光演算装置よりも多様な光演算を行うことが可能な光演算装置を実現することにある。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 0 7 】

本発明の一態様に係る光演算装置は、少なくとも1個の受光セルを含むイメージセンサと、位相変調量が互いに独立に設定可能な複数のセルを含む光変調素子と、信号光を前記イメージセンサに入射するモニタ用信号光と前記光変調素子に入射する演算用信号光とに分岐する光分岐素子と、前記光変調素子の各セルの位相変調量を、該セルに対応する前記イメージセンサの受光セルにて検出された前記モニタ用信号光の強度に応じて設定する制御部と、を備えている。

10

【 0 0 0 8 】

本発明の別の態様に係る制御方法は、少なくとも1個の受光セルを含むイメージセンサと、位相変調量が互いに独立に設定可能な複数のセルを含む光変調素子と、信号光を前記イメージセンサに入射するモニタ用信号光と前記光変調素子に入射する演算用信号光とに分岐する光分岐素子と、を備えた光演算装置の制御方法であって、前記光変調素子の各セルの位相変調量を、該セルに対応する前記イメージセンサの受光セルにて検出された前記モニタ用信号光の強度に応じて設定する工程を含む。

20

【発明の効果】

【 0 0 0 9 】

本発明の一態様によれば、光変調素子の各セルにおいて線形な位相変調を行う従来の光演算装置よりも多様な光演算を行うことが可能な光演算装置を実現することができる。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 1 0 】

【図1】本発明の一実施形態に係る光演算装置の構成を示すブロック図である。

【図2】図1に示す光演算装置の変形例を示すブロック図である。

30

【図3】(a)は、図1に示す光演算装置が備える反射型の光変調素子の平面図である。(b)は、その光変調素子を構成するセルの断面図である。

【図4】(a)は、図2に示す光演算装置が備える透過型の光変調素子の平面図である。(b)は、その光変調素子を構成するセルの断面図である。

【図5】図1に示す光演算装置が備える別の反射型の光変調素子の断面図である。

【図6】図2に示す光演算装置が備える別の透過型の光変調素子の断面図である。

【図7】(a)及び(b)は、図1に示す制御部としてマイクロコンピュータの代わりに集積回路を用いる構成のブロック図である。なお、(a)では、光変調素子の各セルとイメージセンサの各受光セルとが1対1対応しており、(b)では、光変調素子の各セルとイメージセンサの各受光セルとが1対4対応している。

40

【図8】図7の(b)に示す加算回路を示す回路図である。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 1 1 】

(光演算装置の構成)

本発明の一実施形態に係る光演算装置1の構成について、図1を参照して説明する。図1は、光演算装置1の構成を示すブロック図である。

【 0 0 1 2 】

光演算装置1は、図1に示すように、光変調素子群11と、イメージセンサ群12と、光分岐素子群13と、制御部14と、を備えている。

【 0 0 1 3 】

50

光変調素子群 11 は、少なくとも 1 つの反射型の光変調素子  $11a_1 \sim 11a_n$  ( $n$  は 1 以上の任意の自然数) の集合である。本実施形態においては、多段の光演算を実現するべく、光変調素子群 11 として、3 つの光変調素子  $11a_1 \sim 11a_3$  の集合を用いている。反射型の光変調素子  $11a_i$  ( $i$  は 1 以上  $n$  以下の各自然数) は、位相変調量が互いに独立に設定可能な複数のセルにより構成された板状素子であり、位相変調されながら各セルにて反射された信号光を干渉させることによって、光演算を行う。ここで、光演算を行うとは、信号光の 2 次元強度分布を、演算前の情報を表す 2 次元強度分布から、演算後の情報を表す 2 次元強度分布へと、変換することを指す。反射型の光変調素子  $11a_i$  の構成例については、参照する図面を代えて後述する。

#### 【0014】

本実施形態において、光変調素子  $11a_1 \sim 11a_n$  は、各光変調素子  $11a_i$  の一方の主面 (信号光の入射面) が同一の平面  $P$  上に位置するように、並べて配置されている。なお、光変調素子  $11a_1 \sim 11a_n$  は、一体化されていてもよい。例えば、光変調素子  $11a_1 \sim 11a_n$  は、単一の基板に埋め込まれていてもよいし、単一の光変調素子の  $n$  個の領域を、光変調素子  $11a_1 \sim 11a_n$  として用いてもよい。或いは、乾燥ゲルなど、信号光を透過する構造体の中に形成された  $n$  個の光回折層を、光変調素子  $11a_1 \sim 11a_n$  として用いてもよい。

#### 【0015】

イメージセンサ群 12 は、光変調素子  $11a_1 \sim 11a_n$  と同数のイメージセンサ  $12a_1 \sim 12a_n$  の集合である。図 1 においては、イメージセンサ群 12 の一例として、3 つのイメージセンサ  $12a_1 \sim 12a_3$  の集合を図示している。各イメージセンサ  $12a_i$  は、少なくとも 1 個の受光セルを含む板状素子であり、信号光の 2 次元強度分布を検出する。本実施形態においては、光変調素子  $11a_i$  の各セルとイメージセンサ  $12a_i$  の各受光セルとが 1 対 1 対応している。例えば、光変調素子  $11a_i$  がマトリクス状に配置された  $200 \times 200$  個のセルにより構成される場合、イメージセンサ  $12a_i$  もマトリクス状に配置された  $200 \times 200$  個の受光セルにより構成される。このため、光変調素子  $11a_i$  の各セルに入射する信号光の強度が、そのセルに対応するイメージセンサ  $12a_i$  の受光セルによって検出されることになる。なお、イメージセンサ  $12a_1 \sim 12a_n$  の具体例としては、例えば、CCD (Charge Coupled Device) カメラ及び CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) カメラが挙げられる。

#### 【0016】

本実施形態において、イメージセンサ  $12a_1 \sim 12a_n$  は、各イメージセンサ  $12a_i$  の一方の主面 (信号光の入射面) が同一の平面  $Q$  上に位置するように、並べて配置されている。ここで、平面  $Q$  は、上述した平面  $P$  と平行な平面である。なお、イメージセンサ  $12a_1 \sim 12a_n$  は、一体化されていてもよい。例えば、イメージセンサ  $12a_1 \sim 12a_n$  は、単一の基板に埋め込まれていてもよいし、単一のイメージセンサの  $n$  個の領域を、イメージセンサ  $12a_1 \sim 12a_n$  として用いてもよい。

#### 【0017】

光分岐素子群 13 は、光変調素子  $11a_1 \sim 11a_n$  と同数の光分岐素子  $13a_1 \sim 13a_n$  の集合である。図 1 においては、光分岐素子群 13 の一例として、3 つの光分岐素子  $13a_1 \sim 13a_3$  の集合を図示している。各光分岐素子  $13a_i$  は、信号光をモニタ用信号光と演算用信号光とに分岐する。各光分岐素子  $13a_i$  は、ハーフミラーであってもよいし、ビームスプリッタであってもよい。

#### 【0018】

本実施形態において、光分岐素子  $13a_1 \sim 13a_n$  は、各光分岐素子  $13a_i$  の反射面が同一の平面  $R$  上に位置するように、並べて配置されている。ここで、平面  $R$  は、上述した平面  $P$  及び平面  $Q$  の間に位置する、上述した平面  $P$  及び平面  $Q$  と平行な平面である。

#### 【0019】

制御部 14 は、各光変調素子  $11a_i$  の各セルの位相変調量を、そのセルに対応するイメージセンサ  $12a_i$  の各受光セルにて検出された信号光の強度に応じて制御するための

10

20

30

40

50

構成である。本実施形態においては、制御部 14 として、コンピュータの一態様であるマイクロコンピュータを用いる。ただし、本発明の一態様においては、制御部 14 として、コンピュータの別の態様であるパーソナルコンピュータを用いることもできるし、集積回路を用いることもできる。また、制御部 14 として集積回路を用いる場合、当該集積回路は、その論理回路を書き換え可能なもの（例えば F P G A ( F i e l d - P r o g r a m m a b l e G a t e A r r a y ) ) であってもよいし、書き換え不可能なものであってもよい。書き換え不可能な集積回路は、抵抗やアンプなどで構成された電子回路の集合体、すなわち集積回路である。このような集積回路により構成された制御部 14 については、図 7 及び図 8 を参照して後述する。

#### 【 0 0 2 0 】

光演算装置 1 に入力された信号光  $L_0$  は、光分岐素子 13 a 1 によって、モニタ用信号光  $L_0^m$  と演算用信号光  $L_0^c$  とに分岐される。ここで、モニタ用信号光  $L_0^m$  は、光分岐素子 13 a 1 を透過した信号光であり、演算用信号光  $L_0^c$  は、光分岐素子 13 a 1 によって反射された信号光である。モニタ用信号光  $L_0^m$  は、イメージセンサ 12 a 1 に入射する。一方、演算用信号光  $L_0^c$  は、光変調素子 11 a 1 に入射する。この際、制御部 14 は、演算用信号光  $L_0^c$  に作用する光変調素子 11 a 1 の各セルの位相変調量を、そのセルに対応するイメージセンサ 12 a 1 の受光セルによって検出されたモニタ用信号光  $L_0^m$  の強度に応じて設定する。

#### 【 0 0 2 1 】

光変調素子 11 a 1 によって反射された信号光  $L_1$  は、光分岐素子 13 a 2 によって、モニタ用信号光  $L_1^m$  と演算用信号光  $L_1^c$  とに分岐される。ここで、モニタ用信号光  $L_1^m$  は、光分岐素子 13 a 2 を透過した信号光であり、演算用信号光  $L_1^c$  は、光分岐素子 13 a 2 によって反射された信号光である。モニタ用信号光  $L_1^m$  は、イメージセンサ 12 a 2 に入射する。一方、演算用信号光  $L_1^c$  は、光変調素子 11 a 2 に入射する。この際、制御部 14 は、演算用信号光  $L_1^c$  に作用する光変調素子 11 a 2 の各セルの位相変調量を、そのセルに対応するイメージセンサ 12 a 2 の受光セルによって検出されたモニタ用信号光  $L_1^m$  の強度に応じて設定する。

#### 【 0 0 2 2 】

光変調素子 11 a 2 によって反射された信号光  $L_2$  は、光分岐素子 13 a 3 によって、モニタ用信号光  $L_2^m$  と演算用信号光  $L_2^c$  とに分岐される。ここで、モニタ用信号光  $L_2^m$  は、光分岐素子 13 a 3 を透過した信号光であり、演算用信号光  $L_2^c$  は、光分岐素子 13 a 3 によって反射された信号光である。モニタ用信号光  $L_2^m$  は、イメージセンサ 12 a 3 に入射する。一方、演算用信号光  $L_2^c$  は、光変調素子 11 a 3 に入射する。この際、制御部 14 は、演算用信号光  $L_2^c$  に作用する光変調素子 11 a 3 の各セルの位相変調量を、そのセルに対応するイメージセンサ 12 a 3 の受光セルによって検出されたモニタ用信号光  $L_2^m$  の強度に応じて設定する。

#### 【 0 0 2 3 】

光変調素子 11 a 3 に反射された信号光  $L_3$  は、光演算装置 1 による演算結果を表す信号光として、外部に出力される。

#### 【 0 0 2 4 】

なお、本実施形態においては、入力情報を表す信号光  $L_0$  が光演算装置 1 に入力される構成を採用しているが、本発明は、これに限定されない。例えば、入力情報を表す電気信号と搬送光とが光演算装置 1 に入力される構成を採用することもできる。この場合、例えば、入力情報を表す電気信号で搬送光を光変調することによって、入力信号を表す信号光  $L_0$  を生成する光変調素子 11 a 0 ( 図 1 において点線で図示 ) を、光変調素子 11 a 1 の前段に追加するとよい。

#### 【 0 0 2 5 】

従来の光演算装置が備える光変調素子の各セルの位相変調量は、そのセルに入射する信号光の強度 ( 光強度 )  $P$  に依らず一定である。したがって、そのセルに入射する信号光の位相を  $\phi$ 、そのセルにおける位相変調量を  $\theta$  とすると、そのセルから出射する信号光の

10

20

30

40

50

位相  $\theta$  は、 $\theta = \theta_0 + \theta_1$  (定数) により与えられる。換言すると、セルに入射する信号光を複素数  $P \times e^{i \times \theta}$  により表現する場合、そのセルから出射する信号光は、複素数  $P \times e^{i \times \theta} \times e^{i \times \theta_1}$  により表現される。

#### 【0026】

一方、本実施形態に係る光演算装置 1 が備える光変調素子 11 a i の各セルの位相変調量は、そのセルに入射する演算用信号光  $L_{i-1}^c$  の強度  $P$ 、すなわち、そのセルに対応するイメージセンサ 12 a i の受光セルが検出したモニタ用信号光  $L_{i-1}^m$  の強度  $P$  に応じて決まる。したがって、そのセルに入射する演算用信号光  $L_{i-1}^c$  の位相を  $\theta$ 、そのセルにおける位相変調量を  $\theta_1(P)$  とすると、そのセルから出射する信号光  $L_i$  の位相を  $\theta'$  は、 $\theta' = \theta + \theta_1(P)$  により与えられる。換言すると、各セルに入射する演算用信号光  $L_{i-1}^c$  を複素数  $P e^{i \theta}$  により表現する場合、そのセルから出射する信号光  $L_i$  は、複素数  $P \times e^{i \theta} \times e^{i \theta_1(P)}$  により表現される。このため、本実施形態に係る光演算装置 1 によれば、光変調素子の各セルにおいて線形な位相変調を行う従来の光演算装置よりも多様な光演算を行うことができる。

#### 【0027】

なお、演算用信号光  $L_{i-1}^c$  の強度  $P^c$  とモニタ用信号光  $L_{i-1}^m$  の強度  $P^m$  とは、一致することもあれば、一致しないこともある。ただし、後者の場合であっても、これらの強度の間には比例関係  $P^c = k P^m$  が存在するので、演算用信号光  $L_{i-1}^c$  の強度  $P^c$  に応じた位相変調量の制御を行うことができる。ここで、 $k$  は、光分岐素子 13 a i の分岐比 (透過率及び反射率) などに応じて定まる定数である。

#### 【0028】

なお、本実施形態において、制御部 14 は、光変調素子 11 a i の各セルの位相変調量  $\theta_1(P)$  を、 $\theta_1(P) = P \times \theta_1$  に従って設定する。ここで、 $\theta_1$  及び  $\theta_2$  は、光変調素子 11 a i のセル毎に定まる定数である。ただし、本発明は、これに限定されない。すなわち、各セルの位相変調量  $\theta_1(P)$  と、そのセルに対応するイメージセンサ 12 a i の受光セルが検出したモニタ用信号光  $L_{i-1}^m$  の強度  $P$  との関係は任意である。例えば、制御部 14 は、光変調素子 11 a i の各セルの位相変調量  $\theta_1(P)$  を、 $P < P_0$  であれば  $\theta_1(P) = 0$  となり、 $P \geq P_0$  であれば  $\theta_1(P) = \theta_1$  となるように設定してもよい。ここで、 $\theta_1$  は、光変調素子 11 a i のセル毎に定まる定数である。

#### 【0029】

なお、光変調素子 11 a i の各セルの位相変調量の定数部分の設定は、例えば、機械学習を用いて実現することができる。この機械学習において用いられるモデルとしては、例えば、光変調素子 11 a 1 に入力される信号光  $L_0$  の 2 次元強度分布を入力とし、光変調素子 11 a n から出力される信号光  $L_n$  の 2 次元強度分布を出力とするモデルであって、各セルにおける位相変調量の定数部分 (上述した例では、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ 、及び  $\theta_3$ ) をパラメータとして含むモデルを用いることができる。ここで、光変調素子 11 a 1 に入力される信号光  $L_0$  の 2 次元強度分布とは、例えば、光変調素子 11 a 1 を構成する各セルに入力される信号光の強度の集合のことを指す。また、光変調素子 11 a n から出力される信号光  $L_n$  の 2 次元強度分布とは、例えば、光変調素子 11 a n の後段に配置された 2 次元イメージセンサを構成する各セルに入力される信号光の強度の集合のことを指す。

#### 【0030】

なお、各イメージセンサ 12 a i によるモニタ用信号光  $L_{i-1}^m$  の検出、制御部 14 による各光変調素子 11 a i の制御、及び、各光変調素子 11 a i による演算用信号光  $L_{i-1}^c$  に対する光演算は、それぞれ、時間を要する処理である。したがって、各光変調素子 11 a i の全てのセルの位相変調量が一定の値に収束し、光演算装置 1 から期待される信号光  $L_n$  が出力されるようになるまでには、時間が掛かる。この点を考慮すると、制御部 14 は、各光変調素子 11 a i の全てのセルの位相変調量が一定の値に収束した後、正しい演算結果を表す信号光  $L_n$  が出力されていることを示す信号 (光信号であってもよいし、電気信号であってもよい) を出力することが好ましい。これにより、この信号の出力先において、各光変調素子 11 a i の全てのセルの位相変調量が一定の値に収束する前に光

演算装置 1 から出力され得る、正しくない演算結果を表す信号光  $L_n$  が参照されるリスクを低減することができる。なお、この信号の出力先としては、例えば、信号光  $L_n$  が表す情報を利用する装置の制御部（その装置に接続されたコンピュータであってもよいし、その装置に内蔵されたマイコン又は集積回路であってもよい）などが挙げられる。

#### 【0031】

また、本実施形態においては、光変調素子 11 a i の各セルとイメージセンサ 12 a i の各受光セルとが 1 対 1 対応する構成を採用しているが、本発明はこれに限定されない。例えば、光変調素子 11 a i の各セルとイメージセンサ 12 a i の各受光セルとが 1 対 K 対応する構成を採用してもよい（K は 2 以上の自然数）。この場合、制御部 14 は、光変調素子 11 a i の 1 個のセルの位相変調量（P）を、そのセルに対応するイメージセンサ 12 a i の K 個の受光セルにて検出されたモニタ用信号光  $L_{i-1}^m$  の強度 P に応じて設定することになる。K = 4 の場合について、図 7 の（b）を参照して後述する。或いは、光変調素子 11 a i の各セルとイメージセンサ 12 a i の各受光セルとが L 対 1 対応する構成を採用してもよい（L は 2 以上の自然数）。この場合、制御部 14 は、光変調素子 11 a i の L 個のセルの位相変調量（P）を、それらのセルに対応するイメージセンサ 12 a i の 1 個の受光セルにて検出されたモニタ用信号光  $L_{i-1}^m$  の強度 P に応じて設定することになる。なお、L は、光変調素子 11 a i を構成するセルの総数であってもよい。この場合、光変調素子 11 a i の全てのセルの位相変調量（P）が、それらのセルに対応するイメージセンサ 12 a i の 1 個の受光セルにて検出されたモニタ用信号光  $L_{i-1}^m$  の強度 P に応じて設定することになる。

#### 【0032】

また、乾燥ゲル中に形成された n 個の光回折層を光変調素子 11 a 1 ~ 11 a n として用いる場合、脱水収縮を行うことにより相似形を保ったまま収縮するゲル、例えば、Implosion Fabrication 法において用いられるゲルを用いることが好ましい。これにより、n 個の光回折層を形成した膨潤ゲルを乾燥させることによって、光変調素子 11 a 1 ~ 11 a n が精度良く配置された光変調素子群 11 を容易に製造することができる。

#### 【0033】

（反射型の光変調素子の構成例）

光演算装置 1 が備える反射型の光変調素子 11 a i の構成例について、図 3 を参照して説明する。図 3 の（a）は、本具体例に係る光変調素子 11 a i の平面図である。図 3 の（b）は、本具体例に係る光変調素子 11 a i を構成するマイクロセル C の断面図である。

#### 【0034】

光変調素子 11 a i は、図 3 の（a）に示すように、位相変調量が互いに独立に設定された複数のマイクロセル C により構成されている。光変調素子 11 a i に演算用信号光  $L_{i-1}^c$  が入射すると、位相変調されながら各マイクロセル C で反射された演算用信号光  $L_{i-1}^c$  が相互に干渉することによって、演算結果を表す信号光  $L_i$  が形成される。

#### 【0035】

なお、本明細書において、「マイクロセル」とは、例えば、セルサイズが  $10 \mu\text{m}$  未満のセルのことを指す。また、「セルサイズ」とは、セルの面積の平方根のことを指す。例えば、マイクロセル C の平面視形状が正方形である場合、マイクロセル C のセルサイズとは、マイクロセル C の一辺の長さである。マイクロセル C のセルサイズの下限は、例えば、 $1 \text{ nm}$  である。

#### 【0036】

図 3 の（a）に例示した光変調素子 11 a i は、マトリックス状に配置された  $200 \times 200$  個のマイクロセル C により構成されている。各マイクロセル C の平面視形状は、 $500 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$  の正方形であり、光変調素子 11 a i の平面視形状は、 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  の正方形である。

#### 【0037】

光変調素子 11 a i を構成する各マイクロセル C は、例えば図 3 の（b）に示すように、偏光板 C11 と、反射板 C12 と、第 1 電極 C13 と、磁化自由層 C14 と、絶縁層 C

15と、磁化固定層C16と、第2電極C17と、により構成することができる。

【0038】

偏光板C11及び反射板C12は、互いに対向するように配置されている。第1電極C13、磁化自由層C14、絶縁層C15、磁化固定層C16、及び第2電極C17は、この順に積層され、偏光板C11と反射板C12との間に挟みこまれている。ここで、第1電極C13、磁化自由層C14、絶縁層C15、磁化固定層C16、及び第2電極C17の積層方向は、偏光板C11及び反射板C12の積層方向と直交する。このため、磁化自由層C14の第1の側面が偏光板C11の一方の主面と面接触し、第1の側面に対向する磁化自由層C14の第2の側面が反射板C12の一方の主面と面接触する。演算用信号光 $L_{i-1}^c$ は、(1)偏光板C11を介して磁化自由層C14の内部に入射し、(2)反射板C12により反射され、(3)偏光板C11を介して磁化自由層C14の外部に出射する。

10

【0039】

磁化自由層C14は、例えば、導電性及び透光性を有する軟磁性材料(例えば、CoFeB)により構成される。また、磁化固定層C16は、例えば、導電性を有する硬磁性材料(例えば、パーマロイ)により構成される。また、偏光板C11としては、偏光方向Pが磁化固定層C16の磁化方向Mと平行な偏光成分を選択的に透過する偏光板が選択される。図3の(b)においては、磁化方向M及び偏光方向Pが、偏光板C11の主面及び磁化固定層C16の主面の両方と平行になる場合を例示している。

【0040】

20

第1電極C13と第2電極C17との間に電位差を与えると、トンネル効果によりスピンの流れ(スピン偏極した電子の流れ)が絶縁層C15を介して磁化固定層C16から磁化自由層C14に注入され、磁化自由層C14に磁化が生じる。ここで、磁化自由層C14に生じる磁化は、磁化固定層C16の磁化方向Mと平行な磁化、すなわち、偏光板C11を介して磁化自由層C14に入射する演算用信号光 $L_{i-1}^c$ の偏光方向Pと平行な磁化である。このため、演算用信号光 $L_{i-1}^c$ の位相は、磁化自由層C14を伝搬する過程で横一効果により遅延する。

【0041】

ここで、セルCにおける演算用信号光 $L_{i-1}^c$ の位相変化量は、磁化自由層C14に生じる磁化の大きさに応じて決まる。また、磁化自由層C14に生じる磁化の大きさは、磁化自由層C14に注入されるスピンの大きさに応じて決まる。また、磁化自由層C14に注入されるスピンの大きさは、第1電極C13と第2電極C17との間に与える電位差に応じて決まる。したがって、第1電極C13と第2電極C17との間に与える電位差を制御することによって、セルCの位相変調を所望の値に設定することができる。

30

【0042】

なお、本構成例においては、STT(Spin Transfer Torque)方式のMRAM(Magneto-resistive Random Access Memory)と同様の構成を有するマイクロセルCについて説明したが、これに限定されない。例えば、SOT(Spin Orbit Torque)方式のMRAMと同様の構成を有するマイクロセルCを用いてもよい。なお、このようなマイクロセルCは、例えば、図3の(b)に示した構造から、絶縁層C15、磁化固定層C16、及び第2電極C17を取り去ることにより実現することができる。この場合、例えば、第1電極C13に重金属を含め、第1電極C13にパルス電圧又はパルス電流を与えることにより、磁化自由層C14に効率よくスピン流を注入することができる。

40

【0043】

また、セルCは、LCOS(Liquid Crystal On Silicon)のセルと同様に構成されていてもよい。この場合、セルCは、例えば図5に示すように、ガラス基板C21、透明電極C22、液晶層C23、及び反射電極C24により構成される。ガラス基板C21、透明電極C22、液晶層C23、及び反射電極C24は、演算用信号光 $L_{i-1}^c$ の入射側からこの順に積層されている。

【0044】

50

演算用信号光  $L_{i-1}^c$  は、(1) ガラス基板  $C_{21}$  及び透明電極  $C_{22}$  を透過し、(2) 液晶層  $C_{23}$  を透過し、(3) 反射電極  $C_{24}$  により反射され、(4) 液晶層  $C_{23}$  を透過し、(5) 透明電極  $C_{22}$  及びガラス基板  $C_{21}$  を透過する。液晶層  $C_{23}$  は、ガラス基板  $C_{21}$  の主面と平行な方向に配向した液晶分子により構成されており、透明電極  $C_{22}$  と反射電極  $C_{24}$  との間の電位差に応じた屈折率を有する。このため、演算用信号光  $L_{i-1}^c$  は、液晶層  $C_{23}$  を透過する際に、位相変調を受ける。セル  $C$  の位相変調量は、透明電極  $C_{22}$  と反射電極  $C_{24}$  との間に与える電位差を制御することによって、所望の値に設定することができる。

【0045】

(光演算装置の変形例)

光演算装置 1 の一変形例 (以下、光演算装置 1A と記載する) について、図 2 を参照して説明する。図 2 は、光演算装置 1A の構成を示すブロック図である。

【0046】

光演算装置 1A は、光演算装置 1 と同様、光変調素子群 11 と、イメージセンサ群 12 と、光分岐素子群 13 と、制御部 14 と、を備えている。光演算装置 1 と光演算装置 1A との相違点は、(1) 光変調素子群 11 が透過型の光変調素子  $11b_1 \sim 11b_n$  により構成されている点と、(2) 光変調素子群 11 に含まれる光変調素子  $11b_1 \sim 11b_n$ 、及び、光分岐素子群 13 に含まれる光分岐素子  $13a_1 \sim 13a_n$  の配置である。

【0047】

透過型の光変調素子  $11b_i$  は、位相変調量が互いに独立に設定可能な複数のセルにより構成されており、位相変調されながら各セルを透過した信号光を干渉させることによって、光演算を行う。透過型の光変調素子  $11b_i$  の構成例については、参照する図面を代えて後述する。

【0048】

本変形例において、光変調素子  $11b_1 \sim 11b_n$  は、各光変調素子  $11b_i$  の主面 (信号光の入射面及び出射面) が平面  $Q$  と直交するように、直線  $S$  上に並べて配置されている。ここで、平面  $Q$  は、各イメージセンサ  $12a_i$  の一方の主面 (信号光の入射面) が配置される平面であり、直線  $S$  は、平面  $Q$  と平行な直線である。

【0049】

光分岐素子  $13a_1$  は、光変調素子  $11b_1$  の前段において、直線  $S$  上に配置される。また、光分岐素子  $13a_j$  ( $j$  は 2 以上  $n$  以下の各自然数) は、光変調素子  $11b_j$  の後段かつ光変調素子  $11b_j$  の前段において、直線  $S$  上に配置される。光分岐素子  $13a_i$  の向きは、光分岐素子  $13a_i$  の反射面の法線が平面  $T$  に含まれ、かつ、光分岐素子  $13a_i$  の反射面と直線  $S$  とが  $45^\circ$  を成し、かつ、モニタ用信号光  $L_{i-1}^m$  がイメージセンサ  $12a_i$  に向かうように決められている。ここで、平面  $T$  は、直線  $S$  を含み平面  $Q$  と直交する平面である。

【0050】

光演算装置 1A に入力された信号光  $L_0$  は、光分岐素子  $13a_1$  によって、モニタ用信号光  $L_0^m$  と演算用信号光  $L_0^c$  とに分岐される。ここで、モニタ用信号光  $L_0^m$  は、光分岐素子  $13a_1$  によって反射された信号光であり、演算用信号光  $L_0^c$  は、光分岐素子  $13a_1$  を透過した信号光である。モニタ用信号光  $L_0^m$  は、イメージセンサ  $12a_1$  に入射する。一方、演算用信号光  $L_0^c$  は、光変調素子  $11b_1$  に入射する。この際、制御部 14 は、演算用信号光  $L_0^c$  に作用する光変調素子  $11b_1$  の各セルの位相変調量を、そのセルに対応するイメージセンサ  $12a_1$  の受光セルによって検出されたモニタ用信号光  $L_0^m$  の強度に応じて設定する。

【0051】

光変調素子  $11b_1$  を透過した信号光  $L_1$  は、光分岐素子  $13a_2$  によって、モニタ用信号光  $L_1^m$  と演算用信号光  $L_1^c$  とに分岐される。ここで、モニタ用信号光  $L_1^m$  は、光分岐素子  $13a_2$  によって反射された信号光であり、演算用信号光  $L_1^c$  は、光分岐素子  $13a_2$  を透過した信号光である。モニタ用信号光  $L_1^m$  は、イメージセンサ  $12a_2$  に

10

20

30

40

50

入射する。一方、演算用信号光  $L_{1c}$  は、光変調素子 11b2 に入射する。この際、制御部 14 は、演算用信号光  $L_{1c}$  に作用する光変調素子 11b2 の各セルの位相変調量を、そのセルに対応するイメージセンサ 12a2 の受光セルによって検出されたモニタ用信号光  $L_{1m}$  の強度に応じて設定する。

【0052】

光変調素子 11b2 を透過した信号光  $L_2$  は、光分岐素子 13a3 によって、モニタ用信号光  $L_{2m}$  と演算用信号光  $L_{2c}$  とに分岐される。ここで、モニタ用信号光  $L_{2m}$  は、光分岐素子 13a3 によって反射された信号光であり、演算用信号光  $L_{2c}$  は、光分岐素子 13a3 を透過した信号光である。モニタ用信号光  $L_{2m}$  は、イメージセンサ 12a3 に入射する。一方、演算用信号光  $L_{2c}$  は、光変調素子 11b3 に入射する。この際、制御部 14 は、演算用信号光  $L_{2c}$  に作用する光変調素子 11b3 の各セルの位相変調量を、そのセルに対応するイメージセンサ 12a3 の受光セルによって検出されたモニタ用信号光  $L_{2m}$  の強度に応じて設定する。

10

【0053】

光変調素子 11b3 を透過した信号光  $L_3$  は、光演算装置 1A による演算結果を表す信号光として、外部に出力される。

【0054】

なお、本実施形態においては、入力情報を表す信号光  $L_0$  が光演算装置 1A に入力される構成を採用しているが、本発明は、これに限定されない。例えば、入力情報を表す電気信号と搬送光とが光演算装置 1A に入力される構成を採用することもできる。この場合、例えば、入力情報を表す電気信号で搬送光を光変調することによって、入力信号を表す信号光  $L_0$  を生成する光変調素子 11b0 (図2において点線で図示) を、光変調素子 11b1 の前段に追加するとよい。

20

【0055】

本変形例に係る光演算装置 1A が備える光変調素子 11bi の各セルの位相変調量は、そのセルに入射する演算用信号光  $L_{i-1c}$  の強度  $P$ 、すなわち、そのセルに対応するイメージセンサ 12ai の受光セルが検出したモニタ用信号光  $L_{i-1m}$  の強度  $P$  に応じて決まる。したがって、そのセルに入射する演算用信号光  $L_{i-1c}$  の位相を  $\phi_{i-1}$ 、そのセルにおける位相変調量を  $\phi_i(P)$  とすると、そのセルから出射する信号光  $L_i$  の位相  $\phi_i$  は、 $\phi_i = \phi_{i-1} + \phi_i(P)$  により与えられる。換言すると、各セルに入射する演算用信号光  $L_{i-1c}$  を複素数  $P e^{i\phi_{i-1}}$  により表現する場合、そのセルから出射する信号光  $L_i$  は、複素数  $P e^{i\phi_{i-1}} \times e^{i\phi_i(P)}$  により表現される。このため、本変形例に係る光演算装置 1A によれば、光変調素子の各セルにおいて線形な位相変調を行う従来の光演算装置よりも多様な光演算を行うことができる。

30

【0056】

なお、演算用信号光  $L_{i-1c}$  の強度  $P^c$  とモニタ用信号光  $L_{i-1m}$  の強度  $P^m$  とは、一致することもあるが、一致しないこともある。ただし、後者の場合であっても、これらの強度の間には比例関係  $P^c = k P^m$  が存在するので、演算用信号光  $L_{i-1c}$  の強度  $P^c$  に応じた位相変調量の制御を行うことができる。ここで、 $k$  は、光分岐素子 13ai の分岐比 (透過率及び反射率) などに応じて定まる定数である。

40

【0057】

なお、本変形例において、制御部 14 は、光変調素子 11bi の各セルの位相変調量  $\phi_i(P)$  を、 $\phi_i(P) = P \times \phi_{i0} + \phi_{i1}$  に従って設定する。ここで、 $\phi_{i0}$  及び  $\phi_{i1}$  は、光変調素子 11bi のセル毎に定まる定数である。ただし、本発明は、これに限定されない。すなわち、各セルの位相変調量  $\phi_i(P)$  と、そのセルに対応するイメージセンサ 12ai の受光セルが検出したモニタ用信号光  $L_{i-1m}$  の強度  $P$  との関係は任意である。例えば、制御部 14 は、光変調素子 11bi の各セルの位相変調量  $\phi_i(P)$  を、 $P < P_0$  であれば  $\phi_i(P) = 0$  となり、 $P \geq P_0$  であれば  $\phi_i(P) = \phi_{i0}$  となるように設定してもよい。ここで、 $\phi_{i0}$  は、光変調素子 11bi のセル毎に定まる定数である。

【0058】

50

なお、光変調素子 1 1 b i の各セルの位相変調量の定数部分の設定は、例えば、機械学習を用いて実現することができる。この機械学習において用いられるモデルとしては、例えば、光変調素子 1 1 b 1 に入力される信号光  $L_0$  の 2 次元強度分布を入力とし、光変調素子 1 1 b n から出力される信号光  $L_n$  の 2 次元強度分布を出力とするモデルであって、各セルにおける位相変調量の定数部分（上述した例では、 $\theta$ 、 $\phi$ 、及び  $\psi$ ）をパラメータとして含むモデルを用いることができる。ここで、光変調素子 1 1 b 1 に入力される信号光  $L_0$  の 2 次元強度分布とは、例えば、光変調素子 1 1 b 1 を構成する各セルに入力される信号光の強度の集合のことを指す。また、光変調素子 1 1 b n から出力される信号光  $L_n$  の 2 次元強度分布とは、例えば、光変調素子 1 1 b n の後段に配置された 2 次元イメージセンサを構成する各セルに入力される信号光の強度の集合のことを指す。

10

【 0 0 5 9 】

（透過型の光変調素子の構成例）

光演算装置 1 A が備える透過型の光変調素子 1 1 b i の構成例について、図 4 を参照して説明する。図 4 の ( a ) は、本具体例に係る光変調素子 1 1 b i の平面図である。図 4 の ( b ) は、本具体例に係る光変調素子 1 1 b i を構成するマイクロセル C の断面図である。

【 0 0 6 0 】

光変調素子 1 1 b i は、図 4 の ( a ) に示すように、位相変調量が互いに独立に設定された複数のマイクロセル C により構成されている。光変調素子 1 1 b i に演算用信号光  $L_{i-1}^c$  が入射すると、位相変調されながら各マイクロセル C を透過した演算用信号光  $L_i - 1^c$  が相互に干渉することによって、演算結果を表す信号光  $L_i$  が形成される。

20

【 0 0 6 1 】

図 4 の ( a ) に例示した光変調素子 1 1 b i は、マトリックス状に配置された  $200 \times 200$  個のマイクロセル C により構成されている。各マイクロセル C の平面視形状は、 $500 \text{ nm} \times 500 \text{ nm}$  の正方形であり、光変調素子 1 1 b i の平面視形状は、 $100 \mu\text{m} \times 100 \mu\text{m}$  の正方形である。

【 0 0 6 2 】

光変調素子 1 1 b i を構成する各マイクロセル C は、例えば図 4 の ( b ) に示すように、偏光板 C 1 1 と、偏光板 C 1 8 と、第 1 電極 C 1 3 と、磁化自由層 C 1 4 と、絶縁層 C 1 5 と、磁化固定層 C 1 6 と、第 2 電極 C 1 7 と、により構成することができる。

30

【 0 0 6 3 】

偏光板 C 1 1 及び偏光板 C 1 8 は、互いに対向するように配置されている。第 1 電極 C 1 3、磁化自由層 C 1 4、絶縁層 C 1 5、磁化固定層 C 1 6、及び第 2 電極 C 1 7 は、この順に積層され、偏光板 C 1 1 と偏光板 C 1 8 との間に挟みこまれている。ここで、第 1 電極 C 1 3、磁化自由層 C 1 4、絶縁層 C 1 5、磁化固定層 C 1 6、及び第 2 電極 C 1 7 の積層方向は、偏光板 C 1 1 及び偏光板 C 1 8 の積層方向と直交する。このため、磁化自由層 C 1 4 の第 1 の側面が偏光板 C 1 1 の一方の主面と面接触し、第 1 の側面に対向する磁化自由層 C 1 4 の第 2 の側面が偏光板 C 1 8 の一方の主面と面接触する。演算用信号光  $L_{i-1}^c$  は、( 1 ) 偏光板 C 1 1 を介して磁化自由層 C 1 4 の内部に入射し、( 2 ) 磁化自由層 C 1 4 を透過し、( 3 ) 偏光板 C 1 8 を介して磁化自由層 C 1 4 の外部に出射する。

40

【 0 0 6 4 】

磁化自由層 C 1 4 は、例えば、導電性及び透光性を有する軟磁性材料（例えば、CoFeB）により構成される。また、磁化固定層 C 1 6 は、例えば、導電性を有する硬磁性材料（例えば、パーマロイ）により構成される。また、偏光板 C 1 1 及び偏光板 C 1 8 としては、偏光方向 P が磁化固定層 C 1 6 の磁化方向 M と平行な偏光成分を選択的に透過する偏光板が選択される。図 4 の ( b ) においては、磁化方向 M 及び偏光方向 P が、偏光板 C 1 1 の主面及び磁化固定層 C 1 6 の主面の両方と平行になる場合を例示している。

【 0 0 6 5 】

第 1 電極 C 1 3 と第 2 電極 C 1 7 との間に電位差を与えると、トンネル効果によりスピンの流れ（スピン偏極した電子の流れ）が絶縁層 C 1 5 を介して磁化固定層 C 1 6 から磁化自

50

由層 C 1 4 に注入され、磁化自由層 C 1 4 に磁化が生じる。ここで、磁化自由層 C 1 4 に生じる磁化は、磁化固定層 C 1 6 の磁化方向 M と平行な磁化、すなわち、偏光板 C 1 1 を介して磁化自由層 C 1 4 に入射する演算用信号光  $L_{i-1}^c$  の偏光方向 P と平行な磁化である。このため、演算用信号光  $L_{i-1}^c$  の位相は、磁化自由層 C 1 4 を伝搬する過程で横一効果により遅延する。

【 0 0 6 6 】

ここで、セル C における演算用信号光  $L_{i-1}^c$  の位相変化量は、磁化自由層 C 1 4 に生じる磁化の大きさに応じて決まる。また、磁化自由層 C 1 4 に生じる磁化の大きさは、磁化自由層 C 1 4 に注入されるスピン流の大きさに応じて決まる。また、磁化自由層 C 1 4 に注入されるスピン流の大きさは、第 1 電極 C 1 3 と第 2 電極 C 1 7 との間に与える電位差に応じて決まる。したがって、第 1 電極 C 1 3 と第 2 電極 C 1 7 との間に与える電位差を制御することによって、セル C の位相変調を所望の値に設定することができる。

10

【 0 0 6 7 】

なお、本構成例においては、S T T (Spin Transfer Torque) 方式の M R A M (Magnetoresistive Random Access Memory) と同様の構成を有するマイクロセル C について説明したが、これに限定されない。例えば、S O T (Spin Orbit Torque) 方式の M R A M と同様の構成を有するマイクロセル C を用いてもよい。なお、このようなマイクロセル C は、例えば、図 4 の ( b ) に示した構造から、絶縁層 C 1 5、磁化固定層 C 1 6、及び第 2 電極 C 1 7 を取り去ることにより実現することができる。この場合、例えば、第 1 電極 C 1 3 に重金属を含め、第 1 電極 C 1 3 にパルス電圧又はパルス電流を与えることにより、磁化自由層 C 1 4 に効率よくスピン流を注入することができる。

20

【 0 0 6 8 】

また、セル C は、L C D (Liquid Crystal Display) のセルと同様に構成されていてもよい。この場合、セル C は、例えば図 6 に示すように、第 1 ガラス基板 C 2 1 a、第 1 透明電極 C 2 2 a、液晶層 C 2 3、第 2 透明電極 C 2 2 b、及び第 2 ガラス基板 C 2 1 b により構成される。第 1 ガラス基板 C 2 1 a、第 1 透明電極 C 2 2 a、液晶層 C 2 3、第 2 透明電極 C 2 2 b、及び第 2 ガラス基板 C 2 1 b は、演算用信号光  $L_{i-1}^c$  の入射側からこの順に積層されている。

【 0 0 6 9 】

演算用信号光  $L_{i-1}^c$  は、( 1 ) 第 1 ガラス基板 C 2 1 a 及び第 1 透明電極 C 2 2 a を透過し、( 2 ) 液晶層 C 2 3 を透過し、( 3 ) 第 2 透明電極 C 2 2 b 及び第 2 ガラス基板 C 2 1 b を透過する。液晶層 C 2 3 は、ガラス基板 C 2 1 の主面と平行な方向に配向した液晶分子により構成されており、第 1 透明電極 C 2 2 a と第 2 透明電極 C 2 2 b との間の電位差に応じた屈折率を有する。このため、演算用信号光  $L_{i-1}^c$  は、液晶層 C 2 3 を透過する際に、位相変調を受ける。セル C の位相変調量は、第 1 透明電極 C 2 2 a と第 2 透明電極 C 2 2 b との間に与える電位差を制御することによって、所望の値に設定することができる。

30

【 0 0 7 0 】

( 制御部の変形例 )

図 1 に図示した制御部 1 4 の一変形例について、図 7 及び図 8 を参照して説明する。図 7 の ( a ) 及び ( b ) は、制御部 1 4 としてマイクロコンピュータの代わりに集積回路を用いる構成のブロック図である。図 7 の ( a ) 及び ( b ) においては、光変調素子 1 1 a<sub>i</sub> の一例として光変調素子 1 1 a<sub>1</sub> を示し、イメージセンサ 1 2 a<sub>i</sub> の一例としてイメージセンサ 1 2 a<sub>1</sub> を示している。図 8 は、図 7 の ( b ) に示す加算回路 S A の回路図である。

40

【 0 0 7 1 】

なお、図 7 の ( a ) では、光変調素子 1 1 a<sub>1</sub> の各セル C とイメージセンサ 1 2 a<sub>1</sub> の各受光セル P D C とが 1 対 1 対応している。一方、図 7 の ( b ) では、光変調素子 1 1 a<sub>1</sub> の各セル C とイメージセンサ 1 2 a<sub>1</sub> の各受光セル P D C とが 1 対 4 対応している。すなわち、図 7 の ( b ) における構成を図 7 の ( a ) における構成と比較した場合、イメー

50

ジセンサ 12 a 1 における受光セル P D C の解像度は、縦及び横の各々について 2 倍であり、計 4 倍である。また、図 7 の ( a ) 及び ( b ) において、互いに対向するセル C と受光セル P D C との間に付した矢印は、互いに対向するセル C と受光セル P D C とが対向していることを表している。

【 0 0 7 2 】

本変形例においては、光変調素子 1 1 a 1 の各セル C の位相変調量を、そのセル C に対応する受光セル P D C によって検出されたモニタ用信号光の強度に応じて設定する制御部 1 4 として、2 つの抵抗  $R_a$  ,  $R_b$  からなる分圧回路 V D を用いている。分圧回路 V D を用いることによって、受光セル P D C によって検出されたモニタ用信号光の強度に対応した電圧は、抵抗  $R_a$  ,  $R_b$  の各々の抵抗値の比に応じて分圧され、 $R_b / (R_a + R_b)$  に対応する電圧がセル C に印加される。分圧回路 V D からセル C に印加される当該電圧は、制御部 1 4 が設定する光変調素子 1 1 a i の各セル C の位相変調量  $(P) = P \times +$  における  $(P)$  に対応する。

10

【 0 0 7 3 】

例えば、光変調素子 1 1 a 1 が  $200 \times 200$  個のセル C により構成されており、イメージセンサ 1 2 a 1 が  $200 \times 200$  個の受光セル P D C により構成されている場合、光変調素子 1 1 a 1 及びイメージセンサ 1 2 a 1 に対応する制御部 1 4 は、 $200 \times 200$  個の分圧回路 V D を含む集積回路により構成される。

【 0 0 7 4 】

なお、光変調素子 1 1 a 1 の各セル C とイメージセンサ 1 2 a 1 の各受光セル P D C とが L 対 1 対応している (すなわち、セル C が L 個のサブセルにより構成されている) 場合には、図 7 の ( a ) 及び ( b ) に図示されている単一の分圧回路 V D を、並列に設けられた L 個の分圧回路に置換すればよい。各分圧回路は、セル C の各サブセルに対応するので、各分割回路により分圧された電圧は、セル C の各サブセルに印加される。このように、サブセル毎に対応する分圧回路を設けることにより、分圧されたうえで印加される電圧をサブセル毎に調整することができる。

20

【 0 0 7 5 】

また、図 7 の ( b ) に示すように、光変調素子 1 1 a 1 の各セル C とイメージセンサ 1 2 a 1 の各受光セル P D C とが 1 対 4 対応している場合、各受光セル P D C は、サブ受光セル P D C 1 , P D C 2 と、図 7 の ( b ) に図示されていない 2 つのサブ受光セルにより構成される。この場合、セル C に対応する受光セル P D C によって検出されたモニタ用信号光の強度は、上述した 4 つのサブ受光セルによって検出されたモニタ用信号光の強度の平均で得られる。図 7 の ( b ) に示す構成では、4 つのサブ受光セルによって検出されたモニタ用信号光の強度の平均を得るために加算回路 S A を用いている。

30

【 0 0 7 6 】

加算回路 S A は、図 8 に示すように、2 個の増幅器  $A P_1$  ,  $A P_2$  と、7 個の抵抗  $R_1 \sim R_7$  と、を備えている。本変形例では、抵抗  $R_1 \sim R_4$  の抵抗値が等しく、 $R_5$  は  $R_1 \sim R_4$  の抵抗値の  $1/4$  の抵抗値、且つ、抵抗  $R_6$  ,  $R_7$  の抵抗値が等しくなるように加算回路 A P を構成している。このように構成した加算回路 A P は、4 つの入力ポートに 4 つのサブ受光セルによって検出されたモニタ用信号光の強度に対応する電圧  $V_{in1} \sim V_{in4}$  を入力した場合、中間ポートにおいて、 $V_m = - (V_{in1} + V_{in2} + V_{in3} + V_{in4}) / 4$  が得られ、出力ポートにおいて、 $V_{out} = (V_{in1} + V_{in2} + V_{in3} + V_{in4}) / 4$  が得られる。

40

【 0 0 7 7 】

なお、本変形例では、イメージセンサ 1 2 a i として、検出したモニタ用信号光の強度に対応した電圧を出力する受光セル P D C を含むイメージセンサを採用している。ただし、本発明の一態様においては、イメージセンサ 1 2 a i として、検出したモニタ用信号光の強度に対応した電流 (電荷) を出力する受光セル P D C を含むイメージセンサを採用することもできる。電圧を出力する受光セル P D C を含むイメージセンサの例としては C M O S カメラが挙げられ、電流を出力する受光セル P D C を含むイメージセンサの例として

50

はCCDカメラが挙げられる。なお、電流を出力する受光セルPDCを含むイメージセンサを採用する場合、受光セルPDCの後段にトランスインピーダンスアンプを設け、出力された電流を電圧に変換すればよい。この構成によれば、電圧を出力する受光セルを採用する場合と同様に上述した分圧回路VD及び加算回路SAを適用することができる。

【0078】

(まとめ)

本発明の態様1に係る光演算装置は、少なくとも1個の受光セルを含むイメージセンサと、位相変調量が互いに独立に設定可能な複数のセルを含む光変調素子と、信号光を前記イメージセンサに入射するモニタ用信号光と前記光変調素子に入射する演算用信号光とに分岐する光分岐素子と、前記光変調素子の各セルの位相変調量を、該セルに対応する前記イメージセンサの受光セルにて検出された前記モニタ用信号光の強度に応じて設定する制御部と、を備えている。

10

【0079】

上記の構成によれば、光変調素子の各セルにおいて線形な位相変調を行う従来の光演算装置よりも多様な光演算を行うことができる。

【0080】

本発明の態様2に係る光演算装置においては、態様1の構成に加えて、前記制御部は、前記光変調素子の各セルの位相変調量  $(P)$  を、  $(P) = P \times \quad + \quad$  に従って設定する(ここで、 $P$  は、該セルに対応する前記イメージセンサのセルにて検出された前記モニタ用信号光の強度であり、 $\quad$  及び  $\quad$  は、定数である)、という構成が採用されている。

20

【0081】

上記の構成によれば、光変調素子の各セルにおいて線形な位相変調を行う従来の光演算装置よりも多様な光演算を行うことができる。

【0082】

本発明の態様3に係る光演算装置においては、態様1又は2の構成に加えて、当該光演算装置は、前記光変調素子として、複数の反射型の光変調素子を備え、前記モニタ用信号光は、前記光分岐素子を透過した信号光であり、前記演算用信号光は、前記光分岐素子に反射された信号光である、という構成が採用されている。

【0083】

上記の構成によれば、反射型の光変調素子を用いて、多段の光演算を行うことができる。

30

【0084】

本発明の態様4に係る光演算装置においては、態様3の構成に加えて、前記複数の反射型の光変調素子は、一体化されている、という構成が採用されている。

【0085】

上記の構成によれば、光演算装置の部品点数を少なく抑えることができる。また、複数の反射型の光変調素子が別体である場合に必要になる、反射型の光変調素子間のアライメント調整を省略することができる。

【0086】

本発明の態様5に係る光演算装置においては、態様1又は2の構成に加えて、当該光演算装置は、前記光変調素子として、複数の透過型の光変調素子を備え、前記モニタ用信号光は、前記光分岐素子に反射された信号光であり、前記演算用信号光は、前記光分岐素子を透過した信号光である、という構成が採用されている。

40

【0087】

上記の構成によれば、透過型の光変調素子を用いて、多段の光演算を行うことができる。

【0088】

本発明の態様6に係る光演算装置においては、態様1～5の何れかの構成に加えて、当該光演算装置は、前記光変調素子、前記イメージセンサ、及び前記光分岐素子の組み合わせを複数段備え、2段目以降の各段の前記光分岐素子には、該段の前段の光変調素子にて生成された信号光が入力される、という構成が採用されている。

【0089】

50

上記の構成によれば、多段の光演算を行うことができる。

【0090】

本発明の態様7に係る光演算装置においては、態様1～6の何れかの構成に加えて、前記制御部は、前記光変調素子の全てのセルの位相変調量が一定の値に収束した後、正しい演算結果を表す信号光が出力されていることを示す信号を出力する、という構成が採用されている。

【0091】

上記の構成によれば、上記信号の出力先において、光変調素子の全てのセルの位相変調量が一定の値に収束する前に当該光演算装置から出力され得る、正しくない演算結果を表す信号光が参照されるリスクを低減することができる。

10

【0092】

本発明の態様8に係る制御方法は、少なくとも1個の受光セルを含むイメージセンサと、位相変調量が互いに独立に設定可能な複数のセルを含む光変調素子と、信号光を前記イメージセンサに入射するモニタ用信号光と前記光変調素子に入射する演算用信号光とに分岐する光分岐素子と、を備えた光演算装置の制御方法であって、前記光変調素子の各セルの位相変調量を、該セルに対応する前記イメージセンサの受光セルにて検出された前記モニタ用信号光の強度に応じて設定する工程を含む。

【0093】

上記の方法によれば、光変調素子の各セルにおいて線形な位相変調を行う従来の光演算装置よりも多様な光演算を行うことができる。

20

【0094】

(付記事項)

本発明は、上述した各実施形態に限定されるものでなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能である。上述した実施形態に含まれる各技術的手段を適宜組み合わせ得られる実施形態についても、本発明の技術的範囲に含まれる。

【符号の説明】

【0095】

- 1 光演算装置
- 11 光変調素子群
- 11a1～11an 光変調素子(反射型)
- 11b1～11bn 光変調素子(透過型)
- 12 イメージセンサ群
- 12a1～12an イメージセンサ
- 13 光分岐素子群
- 13a1～13an 光分岐素子

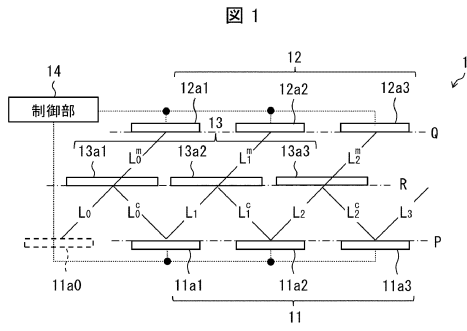
30

40

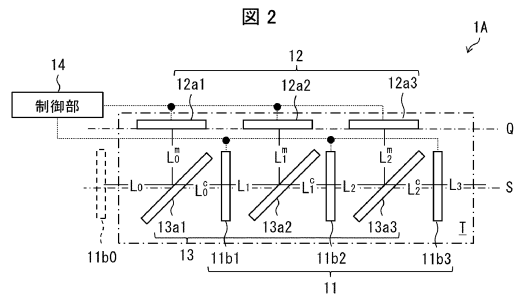
50

【図面】

【図 1】



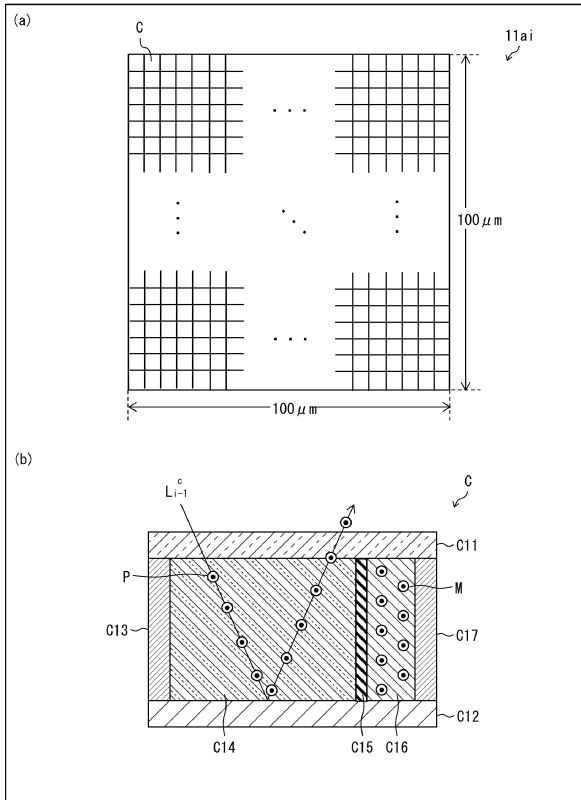
【図 2】



10

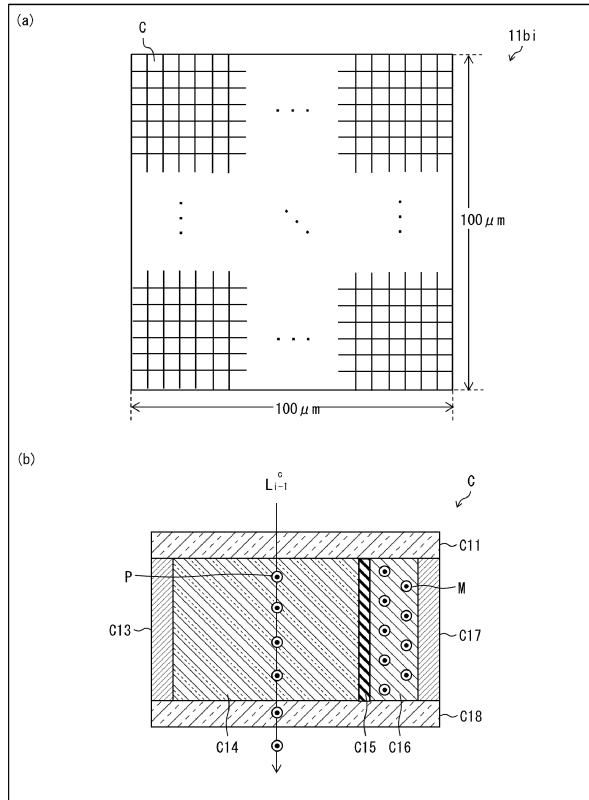
【図 3】

図 3



【図 4】

図 4



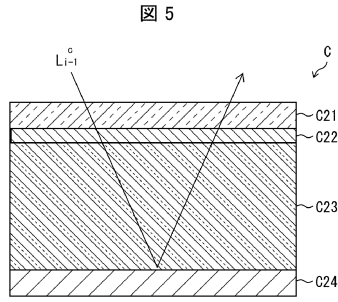
20

30

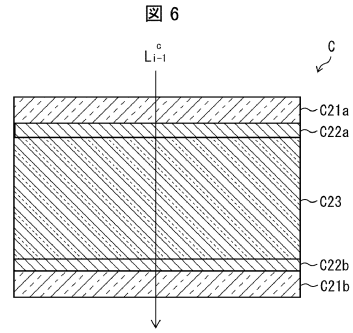
40

50

【 図 5 】

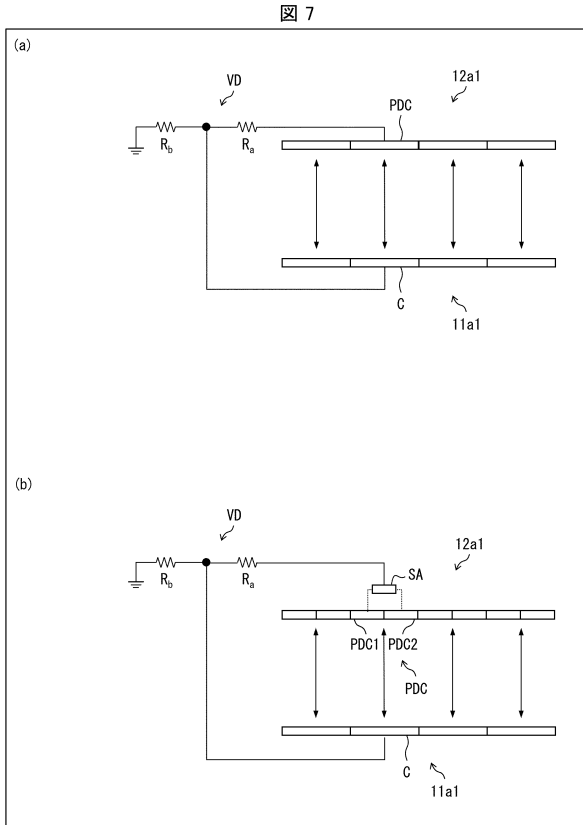


【 図 6 】

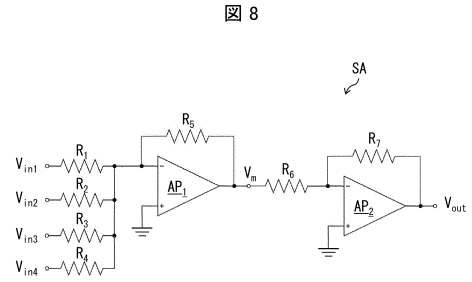


10

【 図 7 】



【 図 8 】



20

30

40

50

---

フロントページの続き

フジクラ内

審査官 漆原 孝治

(56)参考文献 特開 2 0 0 9 - 2 4 6 5 7 8 ( J P , A )

特開 2 0 1 4 - 5 2 9 4 8 ( J P , A )

特開 2 0 0 7 - 1 7 1 4 2 2 ( J P , A )

(58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)

G 0 6 E 3 / 0 0

G 0 6 G 7 / 6 0

G 0 2 F 3 / 0 0