

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2014年10月23日(23.10.2014)



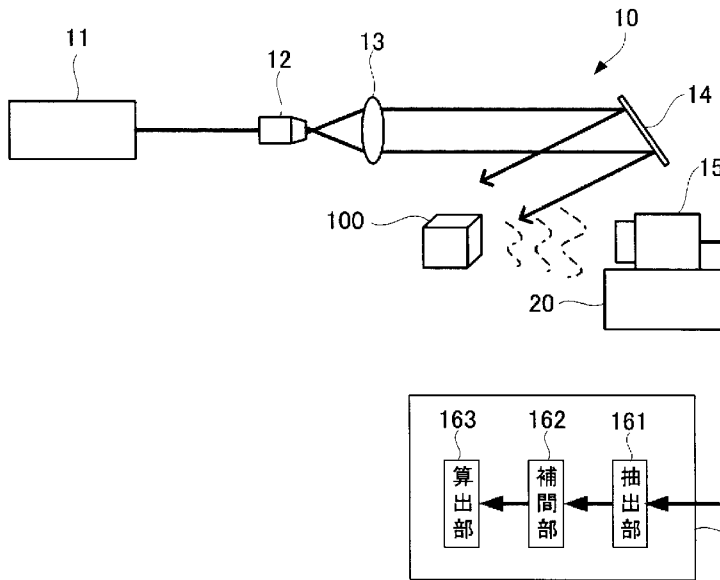
(10) 国際公開番号
WO 2014/171256 A1

- (51) 国際特許分類:
G01B 11/24 (2006.01) G02B 5/30 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/057701
- (22) 国際出願日: 2014年3月20日(20.03.2014)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2013-085624 2013年4月16日(16.04.2013) JP
- (71) 出願人: 国立大学法人京都工芸繊維大学(NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION KYOTO INSTITUTE OF TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒6068585 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地 Kyoto (JP).
- (72) 発明者: 栗辻 安浩(AWATSUJI, Yasuhiro); 〒6068585 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地 国立大学法人京都工芸繊維大学内 Kyoto (JP). 夏 鵬(XIA, Peng); 〒6068585 京都府京都市左京区松ヶ崎橋上町1番地 国立大学法人京都工芸繊維大学内 Kyoto (JP).
- (74) 代理人: 特許業務法人三枝国際特許事務所(SAE-GUSA & PARTNERS); 〒5410045 大阪府大阪市中央区道修町1-7-1 北浜T N Kビル Osaka (JP).
- (81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI

[続葉有]

(54) Title: MEASUREMENT DEVICE

(54) 発明の名称: 計測装置



(57) Abstract: A complex-amplitude-information measurement device (10) according to the present invention is provided with: a group of pixels configured such that the optical distances of object light from a measurement object (100) thereto are mutually different; a camera (15) provided with an imaging element which acquires intensity information related to the measurement object by imaging, on one occasion, object light that has passed through or been reflected by the group of pixels; and a computer (16) which obtains, from the intensity information, phase information related to the measurement object (100).

(57) 要約: 本発明に係る複素振幅情報計測装置(10)は、計測対象(100)からの物体光の光学的距離を互いに異なる画素群と、前記画素群を通過あるいは反射した物体光を一度に撮影することによって前記計測対象の強度情報を取得する撮像素子を搭載するカメラ(15)と、前記強度情報から計測対象(100)の位相情報を求めるコンピュータ(16)と、を備える。

161 Extraction unit
162 Interpolation unit
163 Calculation unit

WO 2014/171256 A1

(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG). 添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：計測装置

技術分野

[0001] 本発明は、物体の複素振幅情報を計測する計測装置に関する。

背景技術

[0002] 近年の工業や産業の発展に伴い、より高精度、高速な計測技術が求められている。これを実現するために、高感度性、並列処理性、などの各種特長を持つ光計測技術が不可欠となっている。

[0003] 物体の動きや微小な形状の変化などの高速現象を観察する最も簡単な方法として、高速度カメラで直接撮影する方法がある。しかし、それらの物体情報を計測するためには複素振幅情報、すなわち、明るさ情報（強度情報）だけでなく位相情報も必要である。高速度カメラによる方法では、物体の強度情報しか記録できず、また、透明な物体には適用できないという問題がある。

[0004] この問題点を解決する方法として、特許文献1ならびに非特許文献1では、干渉計測法による光計測技術が開示されている。これまでに種々の干渉計測法が提案されているが、その一例として、ホログラフィ装置を用いた光学系を図29に示す。

[0005] 図29に示すホログラフィ装置50では、レーザー光源51から出射されたレーザー光を、ビームスプリッタ52で物体を照射するための光（物体光）と参照光とに分離する。物体光は対物レンズ53a、レンズ54a、ミラー55aを介して計測対象100に照射され、計測対象100からの反射光はビームスプリッタ56を介してカメラ57に入射する。一方、参照光は、計測対象100が存在しない経路、具体的には、ミラー55b、対物レンズ53b、レンズ54b、ミラー55cおよびビームスプリッタ56を介してカメラ57に入射する。これにより、カメラ57では、参照光と物体光との干渉縞が撮影され、当該干渉縞に基づいて計算機が既定の計算を行なうこと

で計測対象 100 の複素振幅情報（強度情報と位相情報）が得られる。

[0006] しかし、干渉計測法では、光の干渉を利用しているため、

- ・用いる光学素子が多く、高い設置精度が要求されるため光学系が複雑になる
- ・光学系のサイズが大きくなる
- ・レーザー光源などのコヒーレント光源を必要とする
- ・記録環境（振動や温度変化など）の影響を受けやすい

といった問題がある。

[0007] これに対し、非特許文献 2 では、光の干渉を利用せずに、複数回の撮影によって得られた強度情報から複素振幅情報を計算する方法が開示されている。当該方法を用いた計測装置を図 30 に示す。

[0008] 図 30 に示す計測装置 60 では、光源 61 からの出射光を、対物レンズ 62、レンズ 63、ミラー 64 を介して計測対象 100 に照射し、計測対象 100 からの反射光をカメラ 65 に入射させる。カメラ 65 は反射光の伝播方向に沿って移動する微動ステージ 70 に設けられている。微動ステージ 70 を移動させながらカメラ 65 によって複数回、計測対象 100 を撮影することにより、計測対象 100 の光学的距離（光路長）の異なる複数の強度情報が得られる。さらに、強度輸送方程式（Transport of Intensity Equation : T I E）を用いて、これらの強度情報の変化から、計測対象 100 の位相情報を算出する。これにより、計測対象 100 の複素振幅情報を計測することができる。

[0009] 計測装置 60 は、図 29 に示すホログラフィ装置 50 に比べ、

- ・光学系が簡単である
- ・光の干渉を利用しないため、記録環境（振動など）の影響を受けにくい
- ・コヒーレント光源を必要としないため、自発光する物体（蛍光物体など）も計測可能である

といった利点を有する。このような計測方法は、例えば、電子顕微鏡の分野において用いられている。その場合、電子顕微鏡は、複数の観測面において

電子波の強度を計測し、電子波の伝播の法則を満足するように位相を決定する。

先行技術文献

特許文献

[0010] 特許文献1：特許4 2 9 4 5 2 6号

非特許文献

[0011] 非特許文献1：J. W. Goodman 等、「DIGITAL IMAGE FORMATION FROM ELECTRONICALLY DETECTED HOLOGRAMS」、Appl. Phys. Lett.、11巻、p.77-79、1967年

非特許文献2：M. R. Teague、「Deterministic phase retrieval: a Green's function solution」、J. Opt. Soc. Am.、73巻、11号、p.1434-1441、1983年

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0012] しかし、図30に示す計測装置60では、計測対象100の位相情報を得るために複数回の撮影を必要とするため、瞬時に動く、または瞬時に形状変化する物体の複素振幅情報を取得することが不可能である。現実には、ほとんど変化のない、静止する物体の観察に応用される。

[0013] 本発明は、上記問題を解決するためになされたものであって、動く物体、または形状変化する物体などの複素振幅情報（強度情報と位相情報）を計測可能な計測装置の提供を目的とする。

課題を解決するための手段

[0014] 本発明に係る複素振幅情報計測装置は、上記課題を解決するためになされたものであり、計測対象からの物体光の光学的距離を互いに異ならせる画素群と、前記画素群を通過あるいは反射した物体光を一度に撮影することによって前記計測対象の光学的距離の異なった強度情報を一度に取得する撮像素子と、前記強度情報から前記計測対象の位相情報を求める位相情報演算手段

と、を備えることを特徴とする。

[0015] このような構成によれば、複素振幅情報計測装置は、計測対象からの光学的距離を互いに異ならせる画素群を有するので、一度の撮影によって、光学的距離の異なる複数の強度情報に相当するデータを得ることができる。よって、これらのデータに対して、例えば強度輸送方程式を用いて位相情報を算出することにより、計測対象の複素振幅情報を計測することができる。従来の計測装置のように複数回の撮影を必要としないので、動く物体、形状の変化する物体等の複素振幅情報を計測することができる。

[0016] また、上記計測装置において、前記位相情報演算手段は、前記強度情報から各画素群を通過あるいは反射した物体光を撮影することによって取得されたピクセルを抽出して、各画素群に対応する抽出データを生成する抽出手段と、前記各抽出データに対して画素補間を行うことにより、補間データを生成する補間手段と、前記各補間データから前記位相情報を求める算出手段と、を有する構成としてもよい。

[0017] また、上記計測装置において、前記位相情報演算手段は、前記強度情報に含まれるピクセルの任意の組み合わせから前記位相情報を求める算出手段を有する構成としてもよい。

[0018] また、上記計測装置において、前記算出手段は、強度輸送方程式に基づき前記位相情報を求める構成としてもよい。

[0019] また、上記計測装置において、前記算出手段は、フーリエ変換に基づき前記位相情報を求める構成としてもよい。

[0020] また、上記計測装置において、前記各画素群は、前記計測対象からの空間的距離が互いに異なる構成としてもよい。

[0021] また、上記計測装置において、前記計測対象と前記撮像素子の撮像面との間に、前記計測対象からの物体光を直線偏光に変換する偏光子と、入射光の振動方向によって屈折率が異なり、前記偏光子を透過した光を互いに直交する直線偏光成分に分離する波長板と、前記直線偏光成分の遅軸成分のみを透過させる第1の領域、および前記直線偏光成分の速軸成分のみを透過させる

第2の領域を有する微小偏光子アレイと、を備え、前記画素群は、第1の画素群と第2の画素群とからなり、前記第1の領域は、前記第1の画素群を構成する画素と重なり合っており、前記第2の領域は、前記第2の画素群を構成する画素と重なり合っている構成としてもよい。

[0022] また、上記計測装置において、前記計測対象と前記撮像素子の撮像面との間に、屈折率の互いに異なる複数の領域を有する複数の屈折率アレイを備え、前記各領域は、前記各画素群と重なり合っている構成としてもよい。

[0023] また、上記計測装置において、前記領域のうち、最も屈折率の低い領域が空洞領域である構成としてもよい。

[0024] また、上記計測装置において、前記物体光は直線偏光であり、前記計測対象と前記撮像素子の撮像面との間に、入射光の振動方向によって屈折率が異なり、前記直線偏光を互いに直交する直線偏光成分に分離する波長板と、前記直線偏光成分の遅軸成分のみを透過させる第1の領域、および前記直線偏光成分の速軸成分のみを透過させる第2の領域を有する微小偏光子アレイと、を備え、前記画素群は、第1の画素群と第2の画素群とからなり、前記第1の領域は、前記第1の画素群を構成する画素と重なり合っており、前記第2の領域は、前記第2の画素群を構成する画素と重なり合っている構成としてもよい。

[0025] また、上記計測装置において、前記計測対象と前記撮像素子の撮像面との間に、前記計測対象からの物体光を直線偏光に変換する偏光子と、入射光の振動方向によって屈折率が異なり第1の振動方向の直線偏光成分の屈折率が最大となる第1の領域、および入射光の振動方向によって屈折率が異なり第1の振動方向と異なる第2の振動方向の直線偏光成分の屈折率が最大となる第2の領域を有する波長板アレイと、を備え、前記画素群は、第1の画素群と第2の画素群とからなり、前記第1の領域は、前記第1の画素群を構成する画素と重なり合っており、前記第2の領域は、前記第2の画素群を構成する画素と重なり合っている構成としてもよい。

[0026] また、上記計測装置において、前記物体光は直線偏光であり、前記計測対

象と前記撮像素子の撮像面との間に、入射光の振動方向によって屈折率が異なり第1の振動方向の直線偏光成分の屈折率が最大となる第1の波長板、および入射光の振動方向によって屈折率が異なり第1の振動方向と異なる第2の振動方向の直線偏光成分の屈折率が最大となる第2の波長板を有する波長板アレイを備え、前記画素群は、第1の画素群と第2の画素群とからなり、前記第1の波長板は、前記第1の画素群を構成する画素と重なり合っており、前記第2の波長板は、前記第2の画素群を構成する画素と重なり合っている構成としてもよい。

発明の効果

[0027] 本発明によれば、動く物体、または形状変化する物体などの複素振幅情報を計測可能な計測装置を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0028] [図1]本発明の実施形態1に係る複素振幅情報計測装置の概略構成を示すブロック図である。

[図2]カメラの正面図である。

[図3]撮像素子の拡大平面図である。

[図4]撮像素子の一部を示す断面図である。

[図5]撮像素子による一度の撮影によって取得された計測対象の強度情報を示す図である。

[図6] (a) は、第1の画素群に対応する抽出データを示す図であり、(b) は、第2の画素群に対応する抽出データを示す図である。

[図7] (a) は、第1の画素群に対応する補間データを示す図であり、(b) は、第2の画素群に対応する補間データを示す図である。

[図8]強度輸送方程式による演算を説明するための図である。

[図9]本発明の実施形態1の変形例1に係るカメラの構成を示す断面図である。

[図10] (a) ~ (d) はそれぞれ、偏光子、波長板、微小偏光子アレイ254および撮像素子の平面図である。

[図11]本発明の実施形態1の変形例2に係るカメラの構成を示す断面図である。

[図12] (a) および (b) はそれぞれ、上記変形例2に係る複数の屈折率を持つアレイの平面図および断面図である。

[図13]本発明の実施形態1の変形例3に係るカメラの構成を示す断面図である。

[図14] (a) および (b) はそれぞれ、上記変形例3に係る複数の屈折率を持つアレイの平面図および断面図である。

[図15] (a) および (b) は、本発明の実施形態2に係る撮像素子を示す平面図および断面図である。

[図16]図15に示す撮像素子による一度の撮影によって取得された計測対象の強度情報を示す図である。

[図17] (a) ~ (c) はそれぞれ、第1~3の画素群に対応する抽出データを示す図である。

[図18] (a) ~ (c) はそれぞれ、第1~3の画素群に対応する補間データを示す図である。

[図19]強度輸送方程式による演算を説明するための図である。

[図20] (a) および (b) は、抽出データを生成することなく位相情報を求める算出方法を説明するための図である。

[図21]本発明の実施例1に係る計測装置の概略構成を示すブロック図である。

[図22]本発明の実施例2に係る計測装置の概略構成を示すブロック図である。

[図23]本発明の比較例1に係る計測装置の概略構成を示すブロック図である。

[図24]実施例1、2および比較例1、2において撮影された物体画像および輝度情報である。

[図25]本発明の実施例3に係る計測装置の概略構成を示すブロック図である。

。

[図26]本発明の実施例4に係る計測装置の概略構成を示すブロック図である

。

[図27]本発明の比較例3に係る計測装置の概略構成を示すブロック図である

。

[図28]実施例3、4および比較例3、4において撮影された物体画像および輝度情報である。

[図29]従来のホログラフィ装置の概略構成を示すブロック図である。

[図30]従来の複素振幅情報計測装置の概略構成を示すブロック図である。

[図31]本発明の実施形態1の変形例4に係るカメラの構成を示す断面図である。

[図32]本発明の実施形態1の変形例5に係るカメラの構成を示す断面図である。

[図33] (a)、(b)および(c)はそれぞれ、図32に示すカメラが有する波長板アレイの平面図、断面図および拡大平面図である。

[図34]本発明の実施形態1の変形例5に係るカメラの他の構成を示す断面図である。

発明を実施するための形態

[0029] [実施形態1]

以下、本発明の実施形態1について添付図面を参照して説明する。

[0030] (計測装置の構成)

図1は、実施形態1に係る複素振幅情報計測装置10の概略構成を示すブロック図である。計測装置10は、光源11、対物レンズ12、レンズ13、ミラー14、カメラ15およびコンピュータ(位相情報演算手段)16を備えている。

[0031] 光源11は、非コヒーレント光を出射する光源である。光源11からの出射光は、対物レンズ12、レンズ13、ミラー14を介して計測対象100に照射され、計測対象100からの反射光(物体光)はカメラ15に入射す

る。対物レンズ12、レンズ13およびミラー14は、公知のものを使用することができる。

[0032] なお、計測対象100が自発光する物体である場合は、光源11、対物レンズ12、レンズ13およびミラー14は不要である。また、光源11は、コヒーレント光を出射する光源であってもよい。

[0033] カメラ15は、図30に示す従来の計測装置60と異なり、固定ステージ20に設置されている。また、カメラ15はコンピュータ16に接続されており、コンピュータ16は、カメラ15によって取得された計測対象100の強度情報（輝度情報、明るさ情報）から、強度輸送方程式に基づく演算処理によって計測対象100の位相情報を求めることができる。なお、コンピュータ16をカメラ15に内蔵させてもよい。

[0034] また、カメラ15は、計測対象100からの物体光の光学的距離（光路長）を互いに異ならせる複数の画素群と、前記画素群を通過あるいは反射した物体光を一度に撮影することによって計測対象100の光学的距離（光路長）を互いに異ならせた強度情報を一度に取得する撮像素子（イメージセンサ）を備えた構成である。当該構成の一例を、図2～図4を参照して説明する。

[0035] （撮像素子の構成）

図2は、カメラ15の正面図である。同図に示すように、カメラ15の受光面には撮像素子151が設けられており、撮像素子151上には、アレイ状に整列された複数の画素が配置されている。

[0036] 図3は、撮像素子151の拡大平面図である。撮像素子151上の画素は、第1の画素群および第2の画素群の2つの画素群で構成されている。白抜きで示されるP1は、第1の画素群を構成する画素を示しており、斜線部で示されるP2は、第2の画素群を構成する画素を示している。つまり、図3では、第2の画素群を構成する画素P2のみが斜線パターンで示されており、撮像素子151の縦方向および横方向に、画素P1と画素P2とが交互に配置されている。

[0037] さらに、第1の画素群と第2の画素群とは、計測対象100からの光学的距離が互いに異なっている。言い換えると、計測対象100と各画素P1との光路長が、計測対象100と各画素P2との光路長と異なっている。なお、各画素P1同士は、計測対象100からの光学的距離が互いに等しく、各画素P2同士も、計測対象100からの光学的距離が互いに等しい。

[0038] 図4は、撮像素子151の一部を示す断面図である。図中左方向が計測対象100側の方向である。各画素P1と各画素P2の間には、距離dの段差が設けられている。各画素P1の段差の部分は空気と光速が異なる材料で構成されている。従って、各画素P1を通ってくる光と各画素P2を通ってくる光とは透過時間が異なる。すなわち、各画素P1と各画素P2とは、計測対象100からの等価的な空間的距離が互いに異なるため、計測対象100からの光学的距離も互いに異なる。よって、第1の画素群と第2の画素群とで、計測対象100からの光学的距離を異ならせることができる。ここでは、撮像素子に段差が設けられているが、平坦な撮像素子の画素に対応して段差を設けたアレイ素子を構成しても良い。

[0039] このように、カメラ15は、計測対象100からの光学的距離を互いに異ならせる2つの画素群を有している。これにより、1回のみ撮影によって光学的距離が互いに異なった2つの画像を同時取得することができ、コンピュータ16は、計測対象100の2種類の強度情報から、計測対象100の位相情報を求めることができる。以下、コンピュータ16の演算処理について説明する。

[0040] (コンピュータによる処理)

コンピュータ16は、カメラ15の撮像素子151によって撮影された画像データを処理するものであり、汎用の計算機で構成することができる。図1に示すように、コンピュータ16は、抽出部(抽出手段)161、補間部(補間手段)162および算出部(算出手段)163を備えている。これらの各部は、プログラムをコンピュータ16に実行させることによって実現される機能ブロックである。なお、上記各部をハードウェアによって実現して

もよい。

- [0041] 図5は、撮像素子151による一度の撮影によって取得された計測対象100の強度情報を示している。強度情報を構成する各ピクセルはそれぞれ、撮像素子151の各画素に対応しており、第1の画素群P1によって取得されたピクセルB1と第2の画素群P2によって取得されたピクセルB2とは、異なるパターンで示されている。
- [0042] カメラ15から上記の強度情報がコンピュータ16に送信されると、コンピュータ16の抽出部161は、強度情報からピクセルB1のみを抽出したデータ（抽出データD1a）と、ピクセルB2のみを抽出したデータ（抽出データD2a）とを生成する。図6（a）および（b）はそれぞれ、抽出データD1aおよび抽出データD2aを示している。
- [0043] 続いて、コンピュータ16の補間部162は、抽出データD1a・D2aのデータが欠落している画素（図6（a）および（b）において白抜きで表示）に対して画素補間を行うことにより、補間データD1b・D2bを生成する。図7（a）および（b）はそれぞれ、補間データD1bおよび補間データD2bを示している。ここで、補間は欠落した画素の近傍の画素から算出するなどの方法で行うことができる。
- [0044] 補間データD1bは、第1の画素群によって取得された強度情報から生成されたものである。そのため、補間データD1bは、平坦な撮像面を有する撮像素子が第1の画素群と計測対象100との光学的距離を介して取得した計測対象100の強度情報に近似する。同様に、補間データD2bは、第2の画素群によって取得された強度情報から生成されたものであるため、平坦な撮像面を有する撮像素子が第2の画素群と計測対象100との光学的距離を介して取得した計測対象100の強度情報に近似する。このように、計測対象100からの光学的距離の異なる2つの強度情報に相当するデータを、一度の撮影（シングルショット）によって得ることができる。
- [0045] 続いて、コンピュータ16の算出部163は、補間データD1b・D2bから、強度輸送方程式（TIE）に基づき計測対象100の位相情報を算出

する。これにより、本実施形態に係る計測装置 10 は、計測対象 100 の複素振幅情報を計測することができる。

[0046] ここで、〔背景技術〕において説明したように、図 30 に示す従来の計測装置 60 においても、計測対象 100 の光学的距離の異なる複数の強度情報から強度輸送方程式に基づいて計測対象 100 の位相情報を算出していた。しかし、計測装置 60 では、光学的距離の異なる複数の強度情報を得るために、カメラ 65 を移動させながら計測対象 100 を複数回撮影する必要があった。そのため、計測装置 60 では、動く物体や変形する物体等の複素振幅情報を取得することが不可能であった。

[0047] これに対し、本実施形態に係る計測装置 10 では、計測対象 100 の光学的距離の異なる複数の強度情報に相当するデータを一度の撮影によって得ることができるので、一度の撮影によって計測対象 100 の複素振幅情報を計測することができる。したがって、計測装置 10 は、動く物体や変形する物体等の複素振幅情報の計測にも適用することができる。

[0048] (強度輸送方程式に基づく演算)

以下、強度輸送方程式について説明する。強度輸送方程式とは、以下の式 1 に示すような強度の伝播に関する方程式である。

[0049] [数 1]

$$\nabla \cdot \{I_z(x, y) \nabla \phi_z(x, y)\} = -k \frac{\partial I_z(x, y)}{\partial z} \quad (1)$$

[0050] ここで、 $I_z(x, y)$ は物体光の強度分布 (強度情報)、 $\phi_z(x, y)$ は物体光の位相分布 (位相情報) である。 $k = 2\pi / \lambda$ であり、 λ は波長である。 ∇ は x y 平面内の 2 次元ベクトル微分演算子である。この微分方程式から、計測面における物体光の強度と、その波の伝播方向における微分値が既知であれば、計測面における位相を求めることが可能である。

[0051] 強度輸送方程式を適用するには物体 (計測面) における強度と、物体光の伝播方向における微分値が必要となる。この微分値は、計測対象からの光学的距離の異なる計測面における物体光の差分で近似することができる。

[0052] 次に、強度輸送方程式の右辺の微分について説明する。

[0053] 図8に示すように、座標 $(0, 0, z)$ にある計測対象の計測面1の強度 $I(x, y, z_0)$ と、座標 $(0, 0, z+d)$ にある同一の計測対象の計測面2の強度 $I(x, y, z_0+d)$ を測定する。なお、図7(a)に示す補間データD1bは、強度 $I(x, y, z_0)$ に近似し、図7(b)に示す補間データD2bは、強度 $I(x, y, z_0+d)$ に近似する。

[0054] 強度 $I(x, y, z_0+d)$ をテーラー展開すると、以下の式2のようになる。

[0055] [数2]

$$I(x, y, z_0 + d) = I(x, y, z_0) + \frac{\partial I}{\partial z}(d) + \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} \frac{d^2}{2!} + O[(d)^3] + \dots \quad (2)$$

[0056] 以下の式3に示すように、計測面1での強度微分を計測面1及び計測面2の強度の差分で近似する。

[0057] [数3]

$$\frac{\partial I}{\partial z} \approx \frac{I(x, y, z_0 + d) - I(x, y, z_0)}{d} \quad (3)$$

[0058] 以上より、 $I(x, y, z_0)$ 及び微分 $\partial I / \partial z$ が既知であれば、式1の強度輸送方程式により、計測対象の位相情報を計算できる。これにより、計測対象の複素振幅を計測できる。

[0059] (撮像素子の変形例)

上述の撮像素子151では、図4に示すように、画素P1と画素P2との間に段差を設け、各画素P1および各画素P2の計測対象からの空間的距離を異ならせることにより、第1の画素群と第2の画素群とで、計測対象からの光学的距離を異ならせていた。以下では、計測対象からの空間的距離が互いに等しい画素を有する撮像素子、すなわち、平坦な撮像面を有する撮像素子を用いた変形例について説明する。

[0060] (変形例1)

図9は、本実施形態の変形例1に係るカメラ25の構成を示す断面図であ

る。カメラ25は、撮像素子251、偏光子252、波長板253および微小偏光子アレイ254を備えている。

[0061] 撮像素子251は、平坦な撮像面を有している。すなわち、偏光子252、波長板253および微小偏光子アレイ254がない場合は、撮像素子251の各画素は、計測対象からの空間的距離が互いに等しい。

[0062] 偏光子252、波長板253および微小偏光子アレイ254は、撮像素子251上に積み重ねられており、計測対象からの光（物体光）の伝播方向に沿って、偏光子252、波長板253、微小偏光子アレイ254の順に配置されている。

[0063] 図10(a)～(d)はそれぞれ、偏光子252、波長板253、微小偏光子アレイ254および撮像素子251の平面図である。偏光子252は、物体光を直線偏光に変換する素子である。波長板253は、偏光子252を透過した光の振動方向によって屈折率の異なる素子であり、遅軸成分の屈折率は n_1 であり、速軸成分の屈折率は n_2 である($n_1 > n_2$)。これにより、波長板253に入射した直線偏光は、互いに直交する直線偏光成分に分離される。

[0064] 微小偏光子アレイ254は、遅軸成分のみを透過させる領域R1と、速軸成分のみを透過させる領域R2とを有する偏光フィルタである。領域R1と領域R2とは、微小偏光子アレイ254の縦方向および横方向に交互に配置されている。領域R1は、撮像素子251の第1の画素群を構成する画素P1と重なり合っており、領域R2は、撮像素子251の第2の画素群を構成する画素P2と重なり合っている。そのため、第1の画素群には、遅軸成分のみが入射し、第2の画素群には、速軸成分のみが入射する。

[0065] 上記のように、波長板253の屈折率が、遅軸成分と速軸成分とで異なっているため、互いに光速が異なる。そのため、撮像素子251の撮像面は平坦であるが、第1の画素群と第2の画素群とは、計測対象からの光学的距離が互いに異なることになる。

[0066] このように、本変形例1では、平坦な撮像面を有する撮像素子251に、

偏光子 252、波長板 253 および微小偏光子アレイ 254 を重ね合わせる
ことにより、第 1 の画素群と第 2 の画素群とで、計測対象からの光学的距離
を異ならせることができる。よって、カメラ 25 で撮影された画像データを
、図 1 に示すコンピュータ 16 によって図 5 ~ 図 7 に示す手順で処理するこ
とにより、計測対象の光学的距離の異なる 2 つの強度情報に相当するデータ
を、一度の撮影によって得ることができる。また、平坦な撮像素子を有する一
般的な撮像素子を利用できる。

[0067] なお、偏光子 252、波長板 253 および微小偏光子アレイ 254 は、計
測対象と撮像素子 251 との間に設けられていればよく、互いに重ね合わせ
る必要はない。

[0068] (変形例 2)

図 11 は、本実施形態の変形例 2 に係るカメラ 35 の構成を示す断面図で
ある。カメラ 35 は、撮像素子 351 および複数の屈折率を持つアレイ 35
2 を備えている。

[0069] 撮像素子 351 は、上記の変形例 1 に係る撮像素子 251 と同一構成であ
る。すなわち、撮像素子 351 の各画素は、計測対象からの空間的距離が互
いに等しい。

[0070] 図 12 (a) および (b) はそれぞれ、アレイ 352 の平面図および断面
図である。図 12 (a) に示すように、アレイ 352 は、面方向に屈折率の
互いに異なる 2 つの領域 R11・R12 を有しており、領域 R11 と領域 R
12 とは、アレイ 352 の縦方向および横方向に交互に配置されている。

[0071] 図 12 (b) に示すように、領域 R11 は屈折率 n_1 の光学媒質 M1 で構成
されており、領域 R12 は屈折率 n_2 の光学媒質 M2 で構成されている (n_1
> n_2)。よって、光学媒質 M1 と光学媒質 M2 とは、物体光の伝播方向の厚
みが互いに等しいが、領域 R12 の光速よりも領域 R11 の光速の方が遅く
なるので、領域 R11 の透過光の光学的距離は、領域 R12 の透過光の光学
的距離よりも長くなる。

[0072] また、領域 R11 は、撮像素子 351 の第 1 の画素群を構成する画素と重

なり合っており、領域 R 1 2 は、撮像素子 3 5 1 の第 2 の画素群を構成する画素と重なり合っている。そのため、撮像素子 3 5 1 の第 1 の画素群と第 2 の画素群とは、計測対象からの光学的距離が互いに異なる。

[0073] このように、本変形例 2 においても、平坦な撮像面を有する撮像素子 3 5 1 に、アレイ 3 5 2 を重ね合わせることにより、第 1 の画素群と第 2 の画素群とで、計測対象からの光学的距離を異ならせることができる。なお、アレイ 3 5 2 と撮像素子 3 5 1 とは離間してもよい。

[0074] (変形例 3)

図 1 3 は、本実施形態の変形例 3 に係るカメラ 4 5 の構成を示す断面図である。カメラ 4 5 は、撮像素子 4 5 1 および複数の屈折率を持つアレイ 4 5 2 を備えている。

[0075] 撮像素子 4 5 1 は、上記の変形例 1、2 に係る撮像素子 2 5 1・3 5 1 と同一構成である。すなわち、撮像素子 4 5 1 の各画素は、計測対象からの空間的距離が互いに等しい。

[0076] 図 1 4 (a) および (b) はそれぞれ、アレイ 4 5 2 の平面図および断面図である。図 1 4 (a) に示すように、アレイ 4 5 2 は、縦方向および横方向に交互に配置された領域 R 2 1 と領域 R 2 2 とを有している。図 1 4 (b) に示すように、領域 R 2 1 は、屈折率 n_1 の光学媒質 M 1 で構成されている ($n_1 > 1$)。一方、領域 R 2 2 には、空洞領域 H が形成されている。よって、領域 R 2 1 の光学的距離は、領域 R 2 2 の光学的距離よりも長くなる。

[0077] また、領域 R 2 1 は、撮像素子 4 5 1 の第 1 の画素群を構成する画素と重なり合っており、領域 R 2 2 は、撮像素子 4 5 1 の第 2 の画素群を構成する画素と重なり合っている。そのため、撮像素子 4 5 1 の第 1 の画素群と第 2 の画素群とは、計測対象からの光学的距離が互いに異なる。

[0078] このように、本変形例 3 は、変形例 2 において、複数の屈折率を持つアレイの最も屈折率の低い領域を空洞領域 H とした構成である。本変形例 3 においても、平坦な撮像面を有する撮像素子 4 5 1 に、アレイ 4 5 2 を重ね合わせることにより、第 1 の画素群と第 2 の画素群とで、計測対象からの光学的

距離を異ならせることができる。

[0079] なお、変形例1～3では、撮像素子の撮像面が平坦であったが、画素間に段差を設けた撮像素子を用いてもよい。

[0080] (変形例4)

図31は、本実施形態の変形例4に係るカメラ25'の構成を示す断面図である。カメラ25'は、撮像素子251、波長板253および微小偏光子アレイ254を備えている。すなわち、カメラ25'は、図9に示すカメラ25において、偏光子252を省略した構成であり、撮像素子251、波長板253および微小偏光子アレイ254は、それぞれ図10(b)～(d)に示すものと同一である。

[0081] カメラ25'は、偏光子を備えていないため、計測対象からの物体光が直線偏光である場合(例えば、図1に示す光源11がレーザー光源である場合)に用いることができる。当該直線偏光は、波長板253において互いに直交する直線偏光成分に分離され、微小偏光子アレイ254を透過することにより、第1の画素群には、遅軸成分のみが入射し、第2の画素群には、速軸成分のみが入射する。波長板253の屈折率は、遅軸成分と速軸成分とで異なっているため、第1の画素群と第2の画素群とは、計測対象からの光学的距離が互いに異なる。

[0082] (変形例5)

図32は、本実施形態の変形例5に係るカメラ55の構成を示す断面図である。カメラ55は、撮像素子551、波長板アレイ552および偏光板553を備えている。撮像素子551は、上記の変形例1に係る撮像素子251と同一構成である。

[0083] 図33(a)および(b)はそれぞれ、波長板アレイ552の平面図および断面図である。また、図33(c)は、図33(a)に示す破線枠部分の拡大平面図である。図33(a)に示すように、波長板アレイ552は、2つの領域R51・R52を有しており、領域R51と領域R52とは、波長板アレイ552の縦方向および横方向に交互に配置されている。また、図3

3 (b) に示すように、領域 R 5 1 と領域 R 5 2 の物体光の伝播方向の厚みは互いに等しい。

[0084] 領域 R 5 1 ・ R 5 2 はいずれも、入射光の振動方向によって屈折率が異なり、遅軸成分の屈折率が最大 (n_1) となり、速軸成分の屈折率が最小 (n_2) となる点で共通する。しかし、図 3 3 (c) に示すように、領域 R 5 1 の速軸および遅軸の向きは、領域 R 5 2 の速軸および遅軸の向きとそれぞれ垂直である。すなわち、領域 R 5 1 は、波長板アレイ 5 5 2 の横方向 (第 1 の振動方向) の直線偏光成分の屈折率が最大となり、領域 R 5 2 は、波長板アレイ 5 5 2 の縦方向 (第 2 の振動方向) の直線偏光成分の屈折率が最大となる。

[0085] よって、例えば、偏光板 5 5 3 を透過して垂直偏光となった物体光の振動方向が波長板アレイ 5 5 2 の縦方向である場合、領域 R 5 1 の透過光の光学的距離は、領域 R 5 2 の透過光の光学的距離よりも長くなる。

[0086] また、領域 R 5 1 は、撮像素子 5 5 1 の第 1 の画素群を構成する画素と重なり合っており、領域 R 5 2 は、撮像素子 5 5 1 の第 2 の画素群を構成する画素と重なり合っている。そのため、撮像素子 5 5 1 の第 1 の画素群と第 2 の画素群とは、計測対象からの光学的距離が互いに異なる。

[0087] このように、本変形例 5 においても、平坦な撮像面を有する撮像素子 5 5 1 に、波長板アレイ 5 5 2 を重ね合わせることにより、第 1 の画素群と第 2 の画素群とで、計測対象からの光学的距離を異ならせることができる。なお、波長板アレイ 5 5 2 と撮像素子 5 5 1 とは離間してもよい。

[0088] なお、計測対象からの物体光が直線偏光である場合は、図 3 4 に示すカメラ 5 5' のように、カメラ 5 5 から偏光板 5 5 3 を省略した構成とすることができる。すなわち、カメラ 5 5' は、撮像素子 5 5 1 および波長板アレイ 5 5 2 を備え、撮像素子 5 5 1 は、上記の変形例 1 に係る撮像素子 2 5 1 と同一構成であり、波長板アレイ 5 5 2 は、図 3 3 に示すものと同一構成である。

[0089] [実施形態 2]

上記の実施形態1では、計測対象からの物体光の光学的距離を互いに異ならせる画素群を2つ設ける構成について説明したが、光学的距離を互いに異ならせる画素群の数は3以上であってもよい。本実施形態2では、3つの画素群を用いた形態について説明する。

[0090] (撮像素子の構成)

図15(a)および(b)は、撮像素子152を示す平面図および断面図である。図15(a)に示すように、撮像素子152上の画素は、第1の画素群、第2の画素群および第3の画素群の3つの画素群で構成されており、第1の画素群を構成する画素を「画素P1」とし、第2の画素群を構成する画素を「画素P2」とし、第3の画素群を構成する画素を「画素P3」とする。画素P1・P2・P3は、撮像素子152の撮像面に略同数ずつ配置されており、撮像素子152の縦方向および横方向に、画素P1・画素P2・画素P3・画素P1・画素P2・・・の順に配置されている。

[0091] 図15(b)に示すように、各画素P1と各画素P2との間、および、各画素P2と各画素P3との間には、距離dの段差が設けられており、各画素P1と各画素P3との間には、距離2dの段差が設けられている。このように、画素P1・P2・P3の計測対象からの空間的距離を異ならせることにより、第1～第3の画素群において、計測対象からの光学的距離を互いに異ならせることができる。

[0092] (コンピュータによる演算処理)

図16は、撮像素子152による一度の撮影によって取得された計測対象の強度情報を示している。強度情報を構成する各ピクセルはそれぞれ、撮像素子152の各画素に対応しており、第1の画素群によって取得されたピクセルB11と、第2の画素群によって取得されたピクセルB12と、第3の画素群によって取得されたピクセルB13とは、異なるパターンで示されている。この強度情報は、コンピュータにおいて処理され、ピクセルB11のみを抽出したデータ(抽出データD11a)と、ピクセルB12のみを抽出したデータ(抽出データD12a)と、ピクセルB13のみを抽出したデー

タ（抽出データD13a）とが生成される。図17（a）～（c）はそれぞれ、抽出データD11a、抽出データD12aおよび抽出データD13aを示している。

[0093] 続いて、抽出データD11a・D12a・D13aに対して画素補間を行うことにより、補間データD11b・D12b・D13bが生成される。図18（a）～（c）はそれぞれ、補間データD11b、補間データD12bおよび補間データD13bを示している。

[0094] 補間データD11bは、第1の画素群によって取得された強度情報から生成されたものであるため、平坦な撮像面を有する撮像素子が第1の画素群と計測対象との光学的距離を介して取得した計測対象の強度情報に近似する。同様に、補間データD12bは、平坦な撮像面を有する撮像素子が第2の画素群と計測対象との光学的距離を介して取得した計測対象の強度情報に近似し、補間データD13bは、平坦な撮像面を有する撮像素子が第3の画素群と計測対象との光学的距離を介して取得した計測対象の強度情報に近似する。このように、計測対象からの光学的距離の異なる3つの強度情報に相当するデータを、一度の撮影によって得ることができる。

[0095] なお、画素群の数を4以上としてもよいが、画素群の数が多くなるほど、抽出データの欠落が多くなり、補間データを作成する際の補間誤差が大きくなるため、計測精度が低下しやすい。

[0096] （強度輸送方程式に基づく演算）

続いて、コンピュータでは、強度輸送方程式（TIE）に基づき、補間データD11b・D12b・D13bから、計測対象の位相情報を算出する。以下、具体的な演算を説明する。

[0097] 図19に示すように、座標（0，0，z）にある計測対象の計測面1の強度 $I(x, y, z_0)$ と、座標（0，0，z-d）にある同一の計測対象の計測面2の強度 $I(x, y, z_0-d)$ と、座標（0，0，z+d）にある同一の計測対象の計測面3の強度 $I(x, y, z_0+d)$ とを測定する。図18（a）に示す補間データD11bは、強度 $I(x, y, z_0-d)$ に近似し、図

18 (b) に示す補間データ D12b は、強度 $I(x, y, z_0)$ に近似し、
 図 18 (c) に示す補間データ D13b は、強度 $I(x, y, z_0 + d)$ に近似する。

[0098] 強度 $I(x, y, z_0 + d)$ と強度 $I(x, y, z_0 - d)$ をそれぞれテーラー展開すると、以下の式 4 と 5 のようになる。

[0099] [数4]

$$I(x, y, z_0 + d) = I(x, y, z_0) + \frac{\partial I}{\partial z}(d) + \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} \frac{d^2}{2!} + O[(d)^3] + \dots \quad (4)$$

$$I(x, y, z_0 - d) = I(x, y, z_0) + \frac{\partial I}{\partial z}(-d) + \frac{\partial^2 I}{\partial z^2} \frac{(-d)^2}{2!} + O[(-d)^3] + \dots \quad (5)$$

[0100] 以下の式 6 に示すように、注目する計測面 2 での強度微分を計測面 1 及び 3 の強度の差分で近似する。

[0101] [数5]

$$\frac{\partial I}{\partial z} \approx \frac{I(x, y, z_0 + d) - I(x, y, z_0 - d)}{2d} \quad (6)$$

[0102] 以上より、 $I(x, y, z_0)$ 及び微分 $\partial I / \partial z$ が既知であれば、実施形態 1 において説明した式 1 の強度輸送方程式により、計測対象の位相情報を計算できる。これにより、計測対象からの光学的距離の異なる 3 つの画素群を有する撮像素子による一度の撮影によって得られた強度情報から、強度輸送方程式に基づいて、計測対象の複素振幅情報を計測できる。ここでは、各画素 P1 と各画素 P2 との間、および、各画素 P2 と各画素 P3 との間には、同じ距離 d の段差が設けられているが、各画素 P1 と各画素 P2 との間、および、各画素 P2 と各画素 P3 との間の距離の段差を変えても同様に成り立つ。

[0103] (他の構成)

本実施形態では、計測対象からの光学的距離が互いに異なる 3 つの画素群を形成するために、図 15 (b) に示すように、画素 P1・P2・P3 の計測対象からの空間的距離を互いに異ならせていたが、本発明はこれに限定さ

れない。例えば、図14に示す構成において、屈折率の異なる3つの領域を有する複数の屈折率を持つアレイを用いることにより、計測対象からの光学的距離が互いに異なる3つの画素群を形成してもよい。

[0104] [付記事項]

以上のように、本発明の実施形態に係る計測装置は、単一の撮像素子を用いて1回の撮影で、計測対象の複素振幅情報を計測することができる。上記計測装置により、物体の瞬間の複素振幅分布、3次元形状を得ることができる。さらに、上記計測装置は、連続して撮影することにより、動く物体の複素振幅分布の変化や、3次元形状の動画像を得ることができる。

[0105] なお、本発明の実施形態に係る計測装置は、図30に示す従来の計測装置60が有する利点、すなわち、光学系が簡単である、記録環境（振動など）の影響を受けにくい、自発光する物体も計測可能である、といった利点を併せ持つ。

[0106] 上記では、強度輸送方程式を用いて計測対象の位相情報を求めたが、本発明はこれに限定されない。例えば、フーリエ変換に基づいて位相情報を求めてもよい。この場合、計測対象の位相情報 $\phi_z(x, y)$ は、以下の式7によって求められる。

[0107] [数6]

$$\phi_z(x, y) = -\mathfrak{F}^{-1} q^{-2} \mathfrak{F} \left\{ \nabla \cdot \left[I_z^{-1}(x, y) \right] \nabla \psi_z(x, y) \right\} \quad (7)$$

[0108] ここで、 \mathfrak{F} および \mathfrak{F}^{-1} はそれぞれ、フーリエ変換と逆フーリエ変換であり、 q は、フーリエ面の座標である。 $\psi_z(x, y)$ は、以下の式8で表される。

[0109] [数7]

$$\psi_z(x, y) = \mathfrak{F}^{-1} q^{-2} \mathfrak{F} \left[k \frac{\partial I_z(x, y)}{\partial z} \right] \quad (8)$$

[0110] また上記では、図5～図7に示すように、計測対象の輝度情報から、各画素群に対応する抽出データを生成し、抽出データに対して画素補間を行うこ

とにより補間データを生成し、各保管データから位相情報を求めていたが、輝度情報から抽出データを生成することなく位相情報を求めてもよい。

[0111] 図5に示す輝度情報から、抽出データを生成することなく位相情報を求める例について説明する。まず、図5に示す輝度情報の各ピクセルが、図20(a)に示すように、ピクセルB1a、B2a、B1b、B2b、B1c、
・・・の順に配列しているとする。ここで、縦方向に隣接する2つのピクセルの組み合わせ（ピクセルB1a・B2a、ピクセルB2a・B1b、ピクセルB1b・B2b、ピクセルB2b・B1c、
・・・）のそれぞれについて、強度輸送方程式に基づき位相情報を求める。

[0112] その結果得られた位相分布を図20(b)に示す。図20(b)において、 $B1a + B2a$ は、2つのピクセルB1a・B2aから得られた位相分布を示しており、 $B2a + B1b$ は、2つのピクセルB2a・B1bから得られた位相分布を示している。

[0113] このように、計測対象の輝度情報において、着目ピクセルをずらしながら、着目ピクセルおよび当該着目ピクセルの1つ下に隣接するピクセルについて、強度輸送方程式に基づき位相情報を求めることにより、計測対象の複素振幅情報を得ることができる。

[0114] なお、位相情報を求めるピクセルの組み合わせにおける各ピクセルは、必ずしも隣接するピクセルでなくてもよく、任意のピクセルを組み合わせることができる。また、上記組み合わせにおけるピクセル数は2に限定されず、3以上であってもよい。また、強度輸送方程式の代わりにフーリエ変換を用いて位相情報を求めてもよい。

[0115] 本発明は上記の各実施形態に限定されるものではなく、請求項に示した範囲で種々の変更が可能であり、異なる実施形態にそれぞれ開示された技術的手段を適宜組み合わせて得られる形態も、本発明の技術的範囲に含まれる。

実施例

[0116] 本発明に係る計測装置の有効性を確認するために、計算機シミュレーションを行った。また、従来の計測装置によるシミュレーションも比較例として

行った。

[0117] (実施例1)

図21は、実施例1に係る計測装置110の概略構成を示すブロック図である。計測装置110は、光源111、対物レンズ112、レンズ113・114およびカメラ115を備えている。計測対象100は、「KIT」の文字が印刷された平板状の物体であり、中心部分がカメラ115側に若干湾曲している。

[0118] 光源111としては、波長633nmのレーザー光源を使用した。カメラ115は、画素数512×512、画素サイズ2.2μmの撮像素子を備えており、固定ステージ116に設置されている。カメラ115として、計測対象100からの光学的距離の互いに異なる画素群を2つ有する撮像素子を備えるものを使用した。

[0119] カメラ115によって一度だけ撮影を行い、図示しないコンピュータにおいて、計測対象100の強度情報から2つの補間データを作成し、強度輸送方程式に基づき計測対象100の位相情報を求めた。

[0120] (実施例2)

図22は、実施例2に係る計測装置120の概略構成を示すブロック図である。計測装置120は、実施例1に係る計測装置110においてカメラ115をカメラ125に置き換えた構成である。カメラ125は、計測対象100からの光学的距離の互いに異なる画素群を3つ有する撮像素子を備えている。

[0121] カメラ125によって一度だけ撮影を行い、図示しないコンピュータにおいて、計測対象100の強度情報から3つの補間データを作成し、強度輸送方程式に基づき計測対象100の位相情報を求めた。

[0122] (比較例1)

図23は、比較例1に係る計測装置130の概略構成を示すブロック図である。計測装置130は、光源111、対物レンズ112、レンズ113・114およびカメラ135を備えている。カメラ135の撮像素子は、各画

素の計測対象 100 からの光学的距離の互いに等しい従来の撮像素子である。カメラ 135 は、微動ステージ 136 に設置されている。微動ステージ 136 を物体光の伝播方向に沿って移動させながらカメラ 135 によって計測対象 100 を 2 回撮影し、図示しないコンピュータにおいて、計測対象 100 の強度情報の変化から、強度輸送方程式に基づき計測対象 100 の位相情報を求めた。なお、各撮影における像面の光学的距離の差 ΔZ は 1 mm であった。

[0123] (比較例 2)

比較例 2 では、図 23 に示す計測装置 130 において、微動ステージ 136 を移動させながらカメラ 135 によって計測対象 100 を 3 回撮影し、図示しないコンピュータにおいて、計測対象 100 の強度情報の変化から、強度輸送方程式に基づき計測対象 100 の位相情報を求めた。なお、各撮影における撮像面の光学的距離の差 ΔZ は 1 mm であった。

[0124] (評価結果 1)

図 24 は、それぞれ実施例 1、2 および比較例 1、2 において撮影された物体画像および輝度情報である。さらに、実施例 1、2 および比較例 1、2 に対して、相互相関計算を行った。その結果を表 1 に示す。

[0125] [表 1]

	実施例 1	実施例 2	比較例 1	比較例 2
振幅精度	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
位相精度	0.998201	0.996124	0.998210	0.998221

[0126] 表 1 において、振幅精度および位相精度とは、振幅情報および位相情報の精度を意味し、数値が 1 に近いほど精度が高い。この結果から、本発明に係る計測装置では、一度の撮影によって、複数回の撮影による計測とほぼ同等の精度の位相情報が得られることが分かる。

[0127] (実施例 3)

図 25 は、実施例 3 に係る計測装置 110' の概略構成を示すブロック図である。すなわち、実施例 3 では、図 21 に示す実施例 1 に係る計測装置 1

10において、レンズ114を省略した装置を用いた。その他の構成は、実施例1と同様である。

[0128] (実施例4)

図26は、実施例4に係る計測装置120'の概略構成を示すブロック図である。すなわち、実施例4では、図22に示す実施例2に係る計測装置120において、レンズ114を省略した装置を用いた。その他の構成は、実施例2と同様である。

[0129] (比較例3)

図27は、比較例3に係る計測装置130'の概略構成を示すブロック図である。すなわち、比較例3では、図23に示す比較例1に係る計測装置130において、レンズ114を省略した装置を用いた。その他の構成は、比較例1と同様であり、微動ステージ136を物体光の伝播方向に沿って移動させながらカメラ135によって計測対象100を2回撮影した。さらに、2つの強度情報を利用して、1回目の撮影における撮像面(注目面)の位相情報を計算し、注目面の強度情報と位相情報を利用して、光の逆伝搬の計算により、計測対象の強度情報と位相情報を計算した。なお、計測対象と注目面との距離は5mmであった。

[0130] (比較例4)

比較例4では、図27に示す計測装置130'において、微動ステージ136を物体光の伝播方向に沿って移動させながらカメラ135によって計測対象100を3回撮影した。さらに、2回目および3回目の2つの強度情報を利用して、1回目の撮影における撮像面(注目面)の位相情報を計算し、注目面の強度情報と位相情報を利用して、光の逆伝搬の計算により、計測対象の強度情報と位相情報を計算した。なお、計測対象と注目面との距離は5mmであった。

[0131] (評価結果2)

図28は、それぞれ実施例3、4および比較例3、4において撮影された物体画像および輝度情報である。さらに、実施例3、4および比較例3、4

に対して、相互相関計算を行った。その結果を表2に示す。

[0132] [表2]

	実施例 3	実施例 4	比較例 3	比較例 4
振幅精度	1.000000	1.000000	1.000000	1.000000
位相精度	0.998212	0.997532	0.998214	0.998219

[0133] この結果から、この結果から、本発明に係る計測装置では、一度の撮影によって、複数回の撮影による計測とほぼ同等の精度の位相情報が得られることが分かる。

産業上の利用可能性

[0134] 以上のように、本発明によれば、一度の撮影によって物体の複素振幅情報（強度情報と位相情報）を得ることができるので、動く物体に対しても高精度の複素振幅情報（強度情報と位相情報）計測が可能となる。複素振幅情報計測においてより高いSN比を達成することは、生体観察・計測のための生体顕微鏡、部品、製品の工業検査装置、分子変化を観察・計測する電子顕微鏡、粒子・流体などの分布・形状・大きさ・密度の計測装置において重要なファクターである。その結果、創薬、電子顕微鏡の動画計測、製品検査装置および製品製造装置の実現に効果をもたらすものと期待できる。これより、我が国の経済を牽引する製造業界、バイオテクノロジー業界に置いて、国際競争力の高い製品の開発に大きく寄与できると考えられる。

符号の説明

[0135] 10 複素振幅情報計測装置（計測装置）
 11 光源
 12 対物レンズ
 13 レンズ
 14 ミラー
 15 カメラ
 16 コンピュータ
 20 固定ステージ

2 5 カメラ
2 5' カメラ
3 5 カメラ
4 5 カメラ
5 5 カメラ
5 5' カメラ
1 0 0 計測対象
1 5 1 撮像素子
1 5 2 撮像素子
1 6 1 抽出部
1 6 2 補間部
1 6 3 算出部
2 5 1 撮像素子
2 5 1 撮像素子
2 5 2 偏光子
2 5 3 波長板
2 5 4 微小偏光子アレイ
3 5 1 撮像素子
3 5 2 複数の屈折率を持つアレイ
4 5 1 撮像素子
4 5 2 複数の屈折率を持つアレイ
5 5 1 撮像素子
5 5 2 波長板アレイ
5 5 3 偏光板
B 1 ピクセル
B 2 ピクセル
B 1 1 ピクセル
B 1 2 ピクセル

B 1 3 ピクセル

D 1 a 抽出データ

D 2 a 抽出データ

D 1 b 補間データ

D 2 b 補間データ

D 1 1 a 抽出データ

D 1 2 a 抽出データ

D 1 3 a 抽出データ

D 1 1 b 補間データ

D 1 2 b 補間データ

D 1 3 b 補間データ

H 空洞領域

P 1 画素 (第 1 の画素群を構成する画素)

P 2 画素 (第 2 の画素群を構成する画素)

P 3 画素 (第 3 の画素群を構成する画素)

R 1 領域

R 2 領域

R 1 1 領域

R 1 2 領域

R 2 1 領域

R 2 2 領域

R 5 1 領域

R 5 2 領域

請求の範囲

- [請求項1] 計測対象からの物体光の光学的距離を互いに異ならせる複数の画素群と、
前記画素群を通過あるいは反射した物体光を一度に撮影することによって前記計測対象の強度情報を取得する撮像素子と、
前記強度情報から前記計測対象の位相情報を求める位相情報演算手段と、を備えることを特徴とする計測装置。
- [請求項2] 前記位相情報演算手段は、
前記強度情報から各画素群を通過あるいは反射した物体光を撮影することによって取得されたピクセルを抽出して、各画素群に対応する抽出データを生成する抽出手段と、
前記各抽出データに対して画素補間を行うことにより、補間データを生成する補間手段と、
前記各補間データから前記位相情報を求める算出手段と、を有することを特徴とする請求項1に記載の計測装置。
- [請求項3] 前記位相情報演算手段は、
前記強度情報に含まれるピクセルの任意の組み合わせから前記位相情報を求める算出手段を有することを特徴とする請求項1に記載の計測装置。
- [請求項4] 前記算出手段は、強度輸送方程式に基づき前記位相情報を求めることを特徴とする請求項3に記載の計測装置。
- [請求項5] 前記算出手段は、フーリエ変換に基づき前記位相情報を求めることを特徴とする請求項3に記載の計測装置。
- [請求項6] 前記各画素群は、前記計測対象からの空間的距離が互いに異なることを特徴とする請求項1～5のいずれか1項に記載の計測装置。
- [請求項7] 前記計測対象と前記撮像素子の撮像面との間に、
前記計測対象からの物体光を直線偏光に変換する偏光子と、
入射光の振動方向によって屈折率が異なり、前記偏光子を透過した

光を互いに直交する直線偏光成分に分離する波長板と、

前記直線偏光成分の遅軸成分のみを透過させる第1の領域、および前記直線偏光成分の速軸成分のみを透過させる第2の領域を有する微小偏光子アレイと、を備え、

前記画素群は、第1の画素群と第2の画素群とからなり、

前記第1の領域は、前記第1の画素群を構成する画素と重なり合っており、前記第2の領域は、前記第2の画素群を構成する画素と重なり合っていることを特徴とする請求項1～6のいずれか1項に記載の計測装置。

[請求項8] 前記計測対象と前記撮像素子の撮像面との間に、屈折率の互いに異なる複数の領域を有する複数の屈折率を持つアレイを備え、

前記各領域は、前記各画素群と重なり合っていることを特徴とする請求項1～6のいずれか1項に記載の計測装置。

[請求項9] 前記領域のうち、最も屈折率の低い領域が空洞領域であることを特徴とする請求項8に記載の計測装置。

[請求項10] 前記物体光は直線偏光であり、

前記計測対象と前記撮像素子の撮像面との間に、

入射光の振動方向によって屈折率が異なり、前記直線偏光を互いに直交する直線偏光成分に分離する波長板と、

前記直線偏光成分の遅軸成分のみを透過させる第1の領域、および前記直線偏光成分の速軸成分のみを透過させる第2の領域を有する微小偏光子アレイと、を備え、

前記画素群は、第1の画素群と第2の画素群とからなり、

前記第1の領域は、前記第1の画素群を構成する画素と重なり合っており、前記第2の領域は、前記第2の画素群を構成する画素と重なり合っていることを特徴とする請求項1～6のいずれか1項に記載の計測装置。

[請求項11] 前記計測対象と前記撮像素子の撮像面との間に、

前記計測対象からの物体光を直線偏光に変換する偏光子と、
入射光の振動方向によって屈折率が異なり第1の振動方向の直線偏光成分の屈折率が最大となる第1の領域、および入射光の振動方向によって屈折率が異なり第1の振動方向と異なる第2の振動方向の直線偏光成分の屈折率が最大となる第2の領域を有する波長板アレイと、
を備え、

前記画素群は、第1の画素群と第2の画素群とからなり、

前記第1の領域は、前記第1の画素群を構成する画素と重なり合っており、前記第2の領域は、前記第2の画素群を構成する画素と重なり合っていることを特徴とする請求項1～6のいずれか1項に記載の計測装置。

[請求項12]

前記物体光は直線偏光であり、

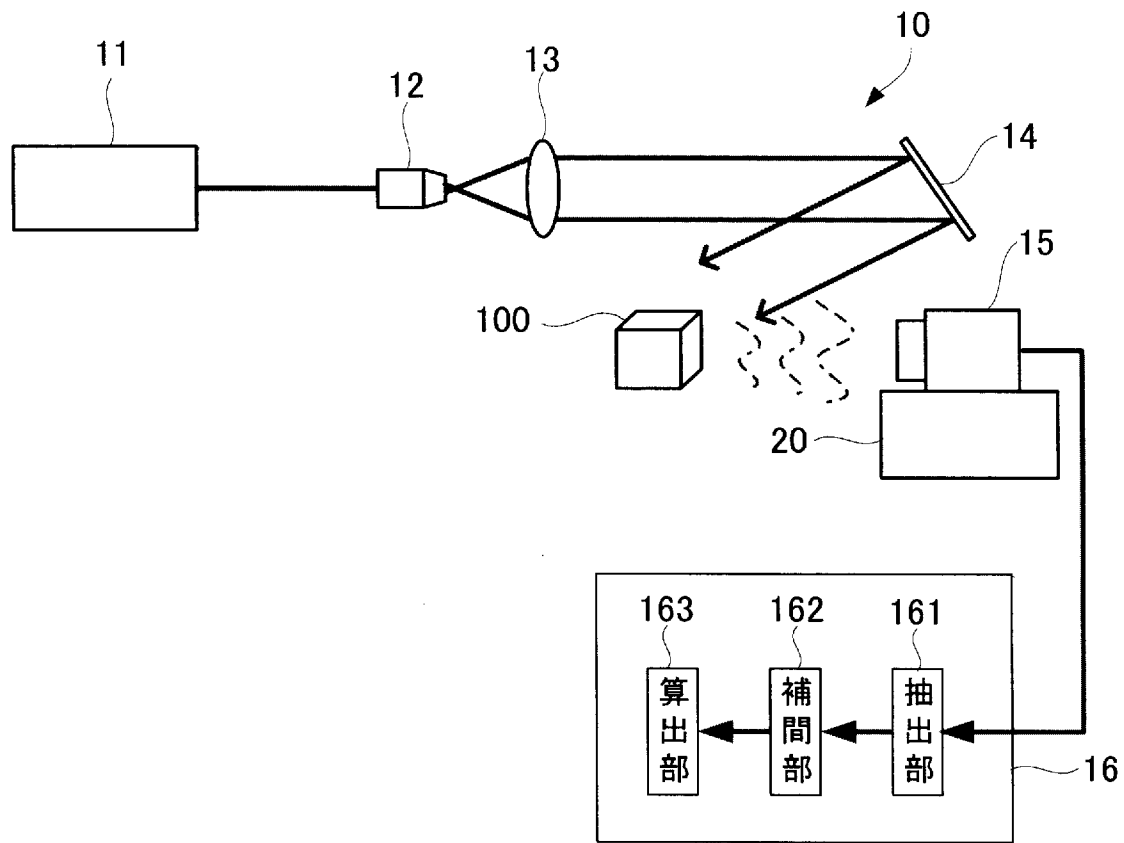
前記計測対象と前記撮像素子の撮像面との間に、

入射光の振動方向によって屈折率が異なり第1の振動方向の直線偏光成分の屈折率が最大となる第1の波長板、および入射光の振動方向によって屈折率が異なり第1の振動方向と異なる第2の振動方向の直線偏光成分の屈折率が最大となる第2の波長板を有する波長板アレイを備え、

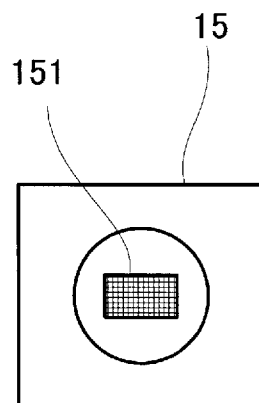
前記画素群は、第1の画素群と第2の画素群とからなり、

前記第1の波長板は、前記第1の画素群を構成する画素と重なり合っており、前記第2の波長板は、前記第2の画素群を構成する画素と重なり合っていることを特徴とする請求項1～6のいずれか1項に記載の計測装置。

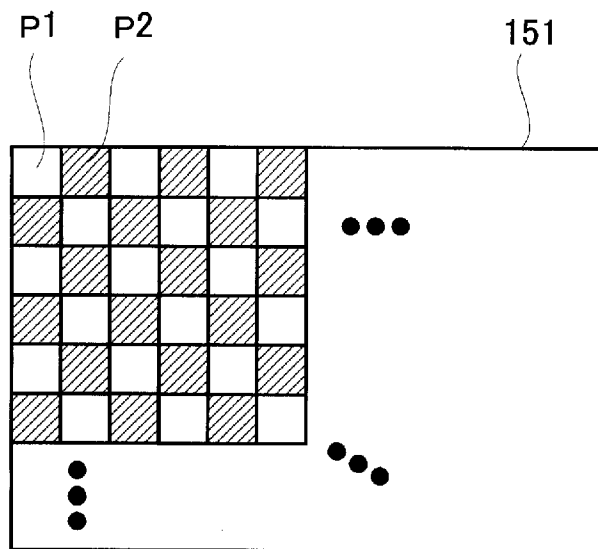
[図1]



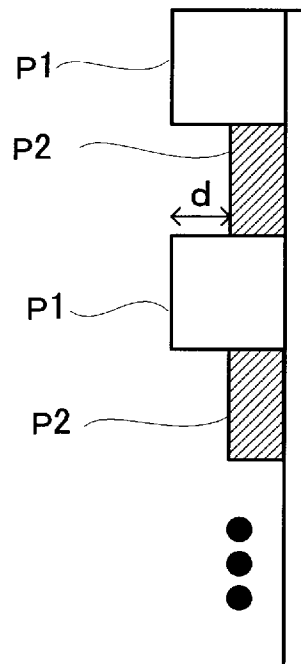
[図2]



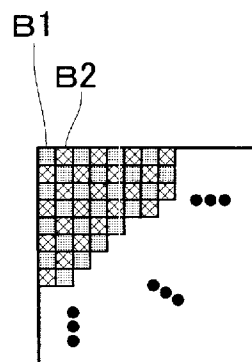
[図3]



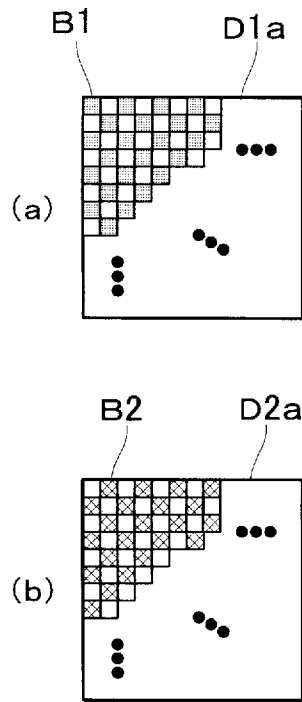
[図4]



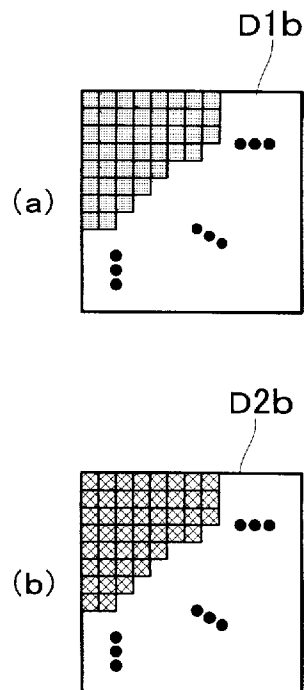
[図5]



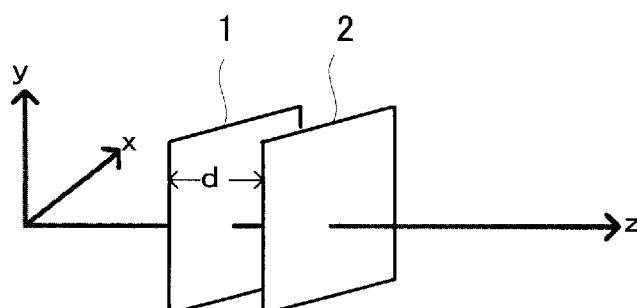
[図6]



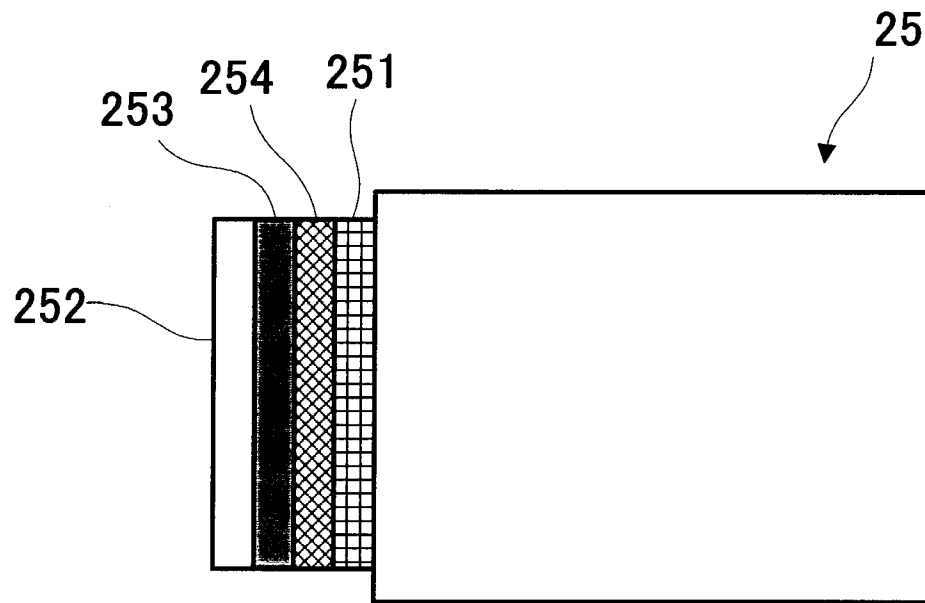
[図7]



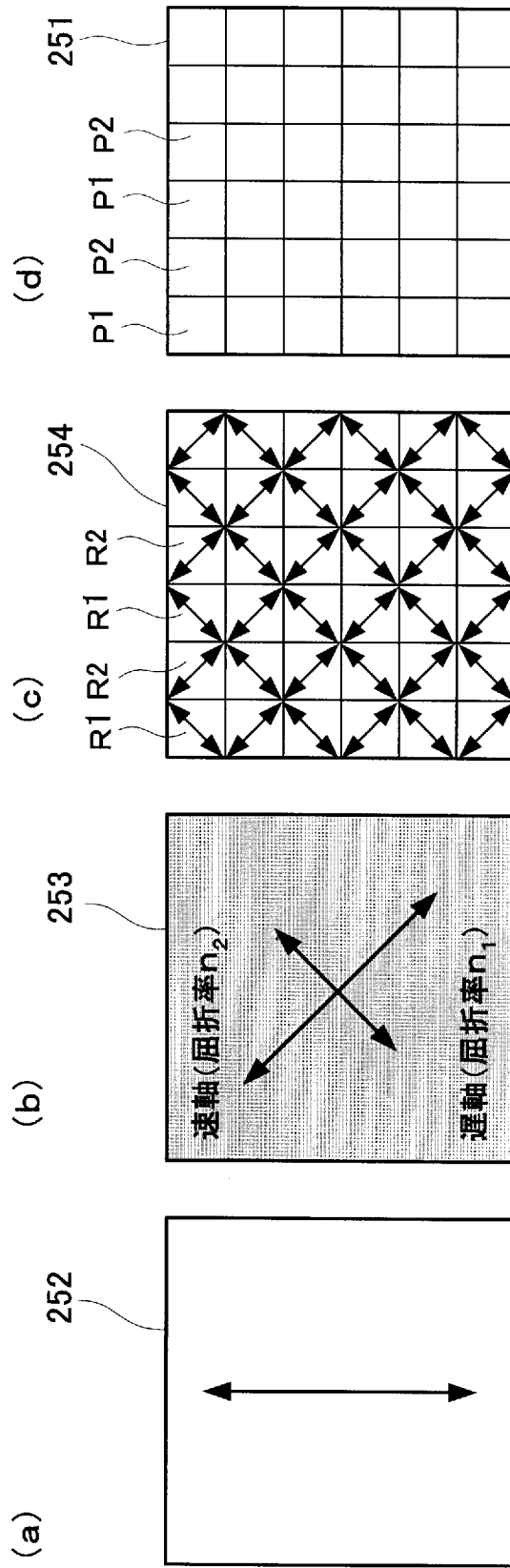
[図8]



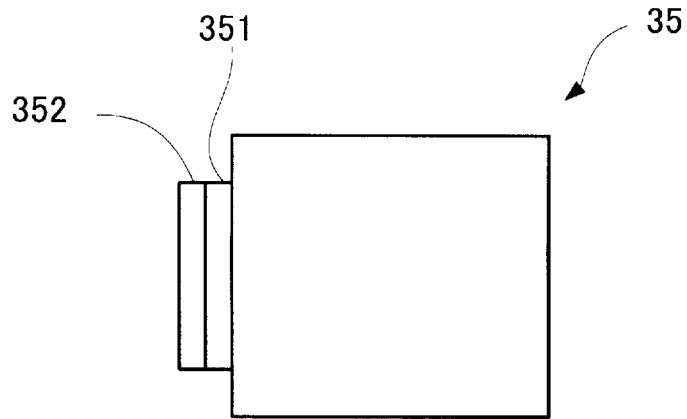
[図9]



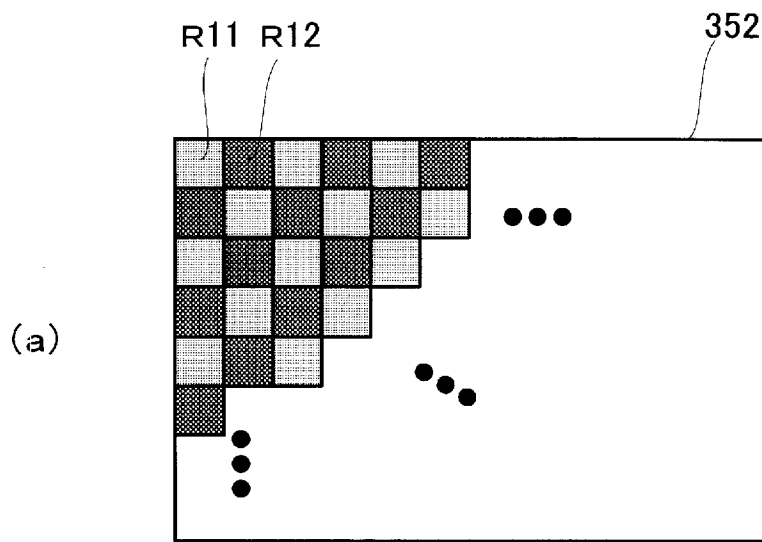
[図10]



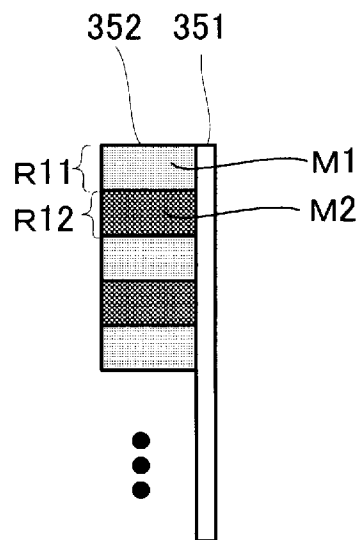
[図11]



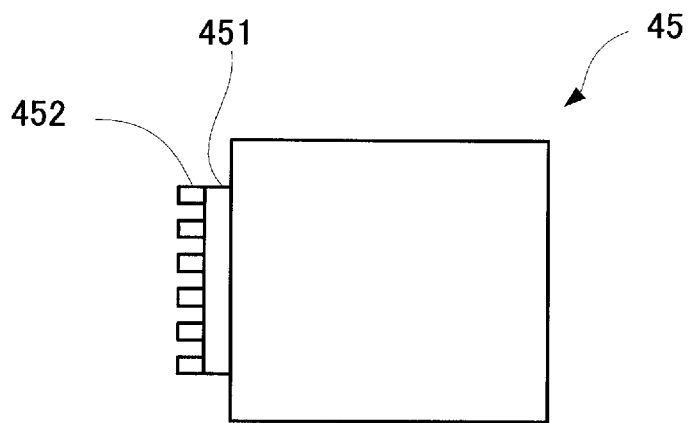
[図12]



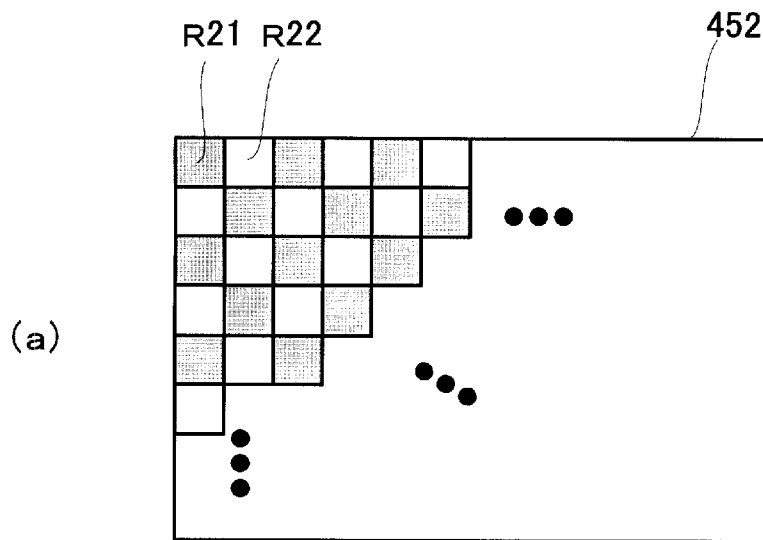
(b)



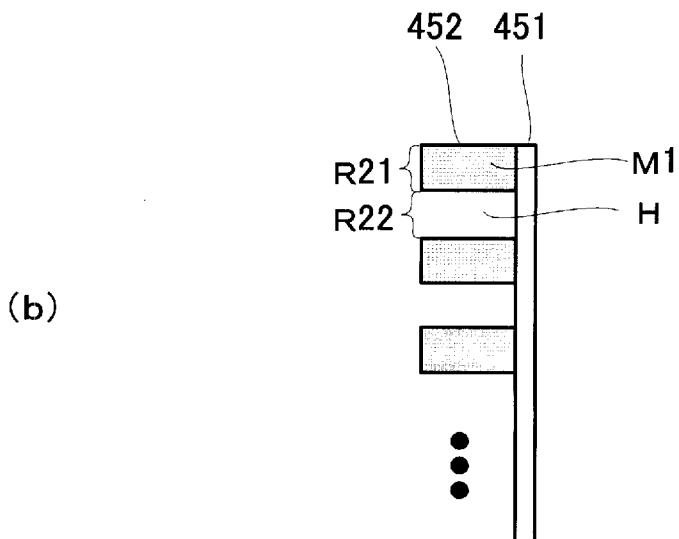
[図13]



[図14]

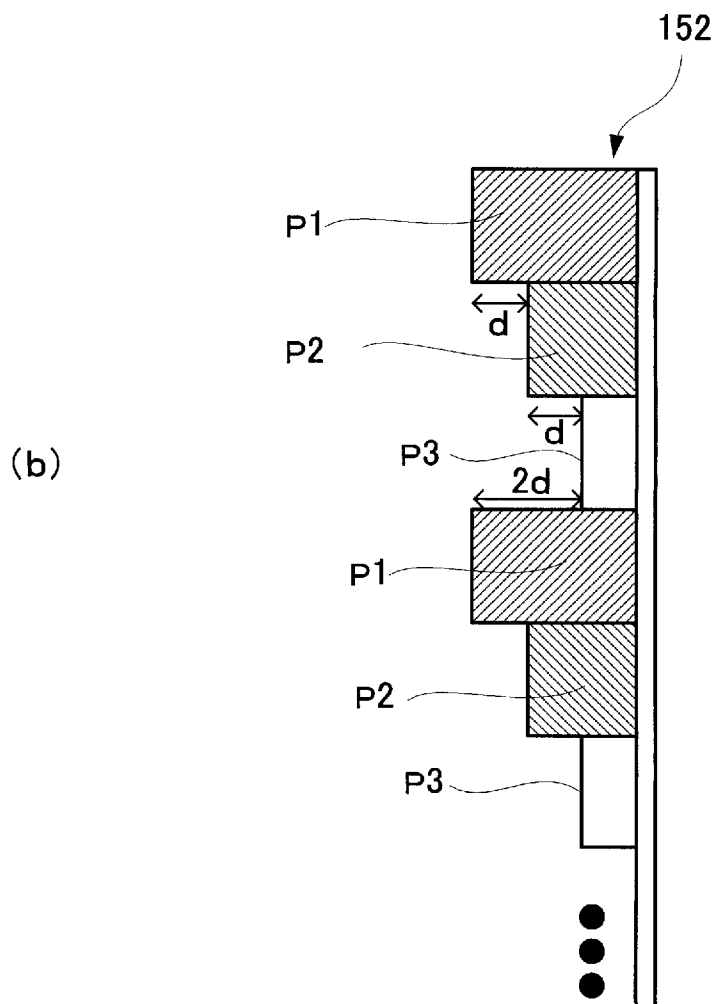
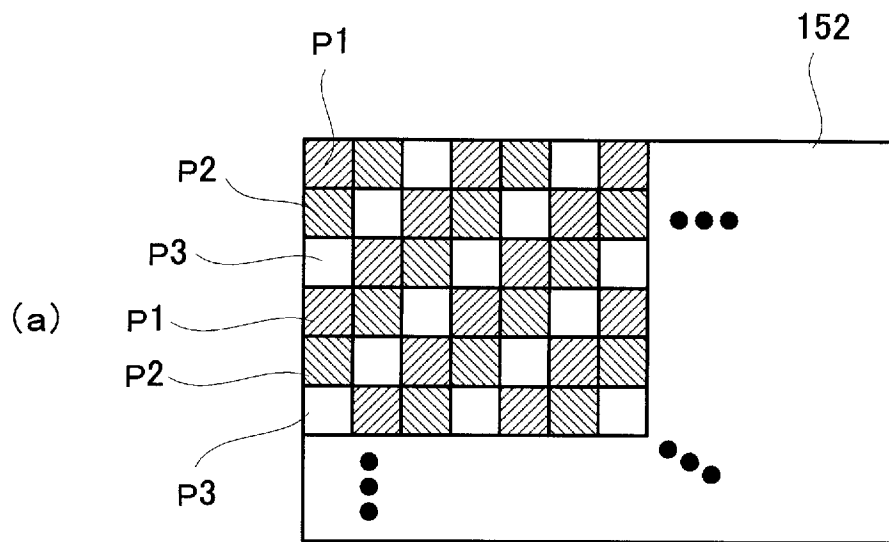


(a)

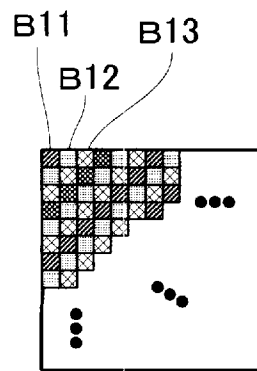


(b)

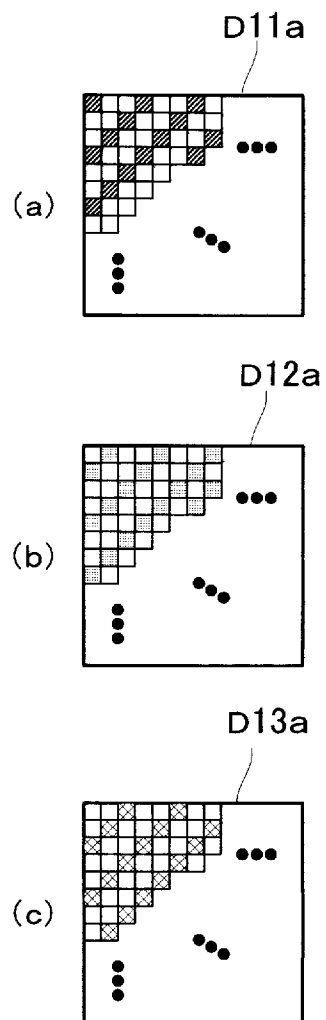
[図15]



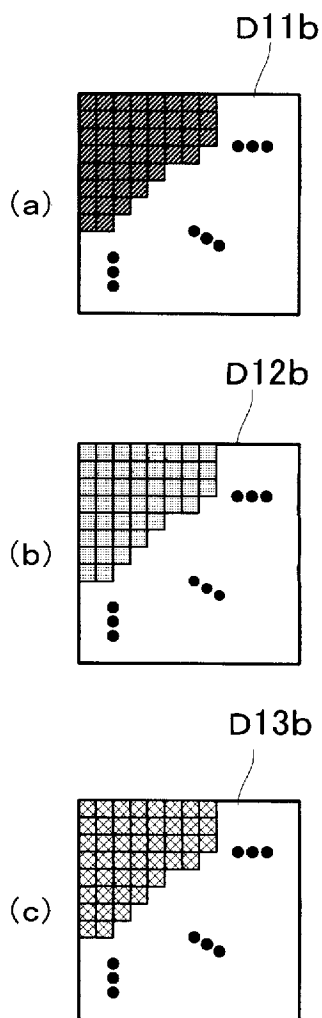
[図16]



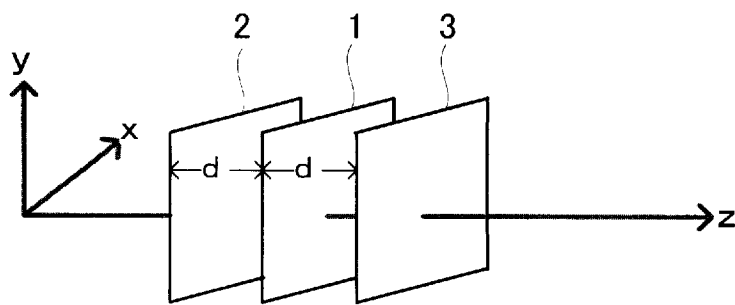
[図17]



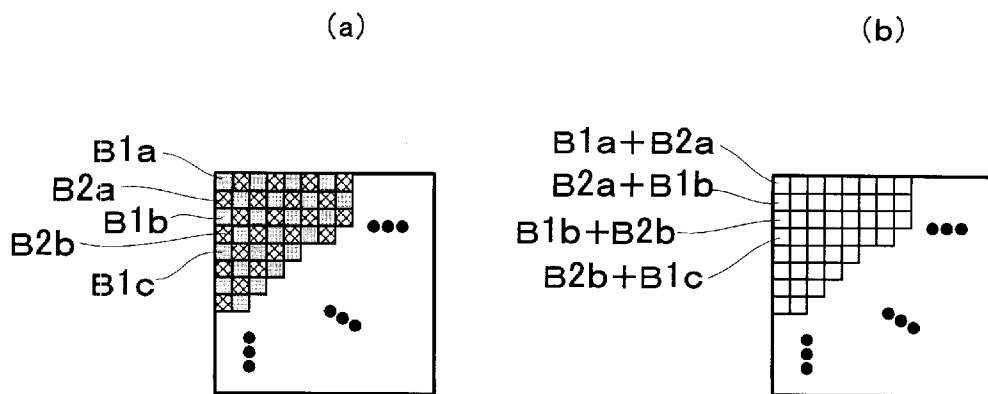
[図18]



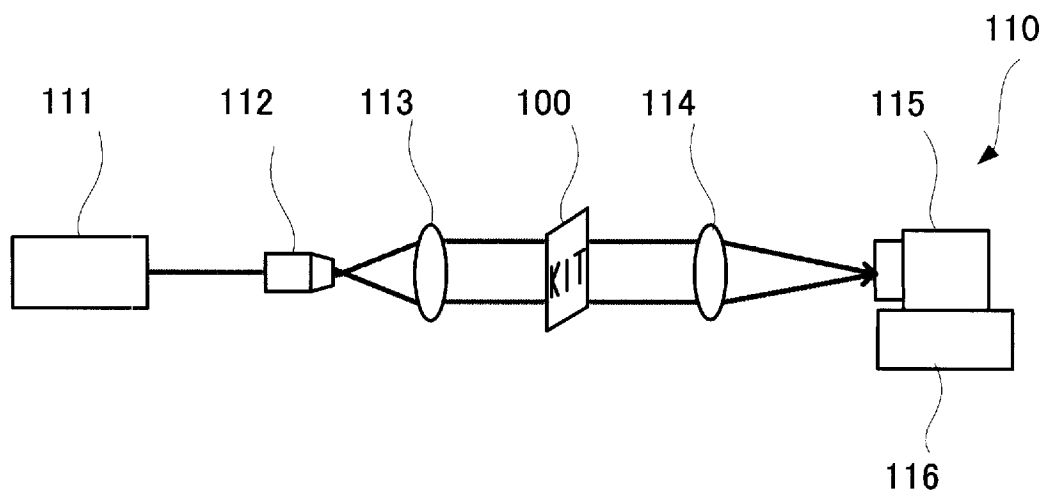
[図19]



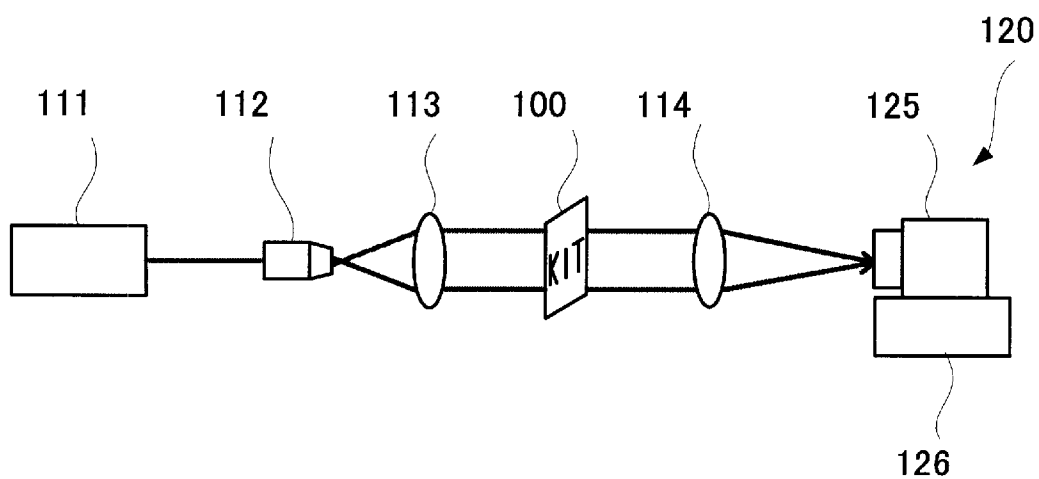
[図20]



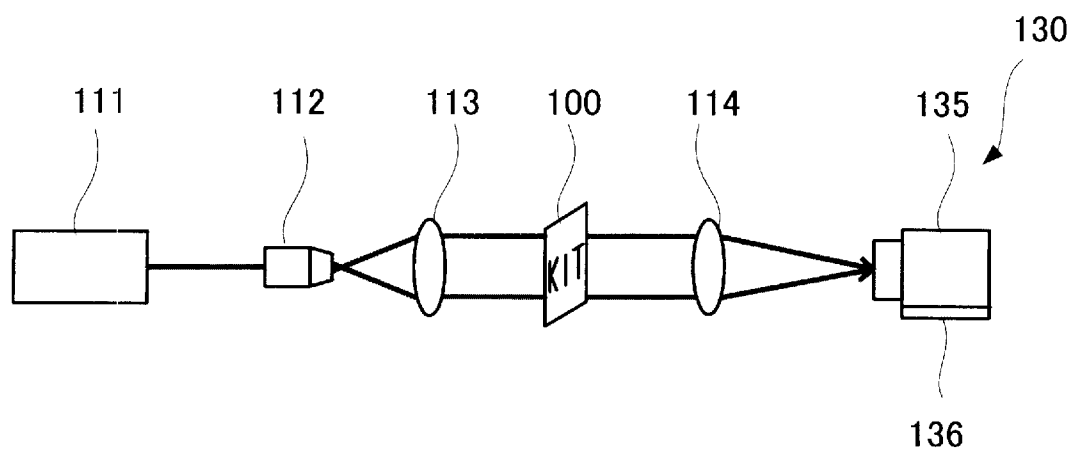
[図21]



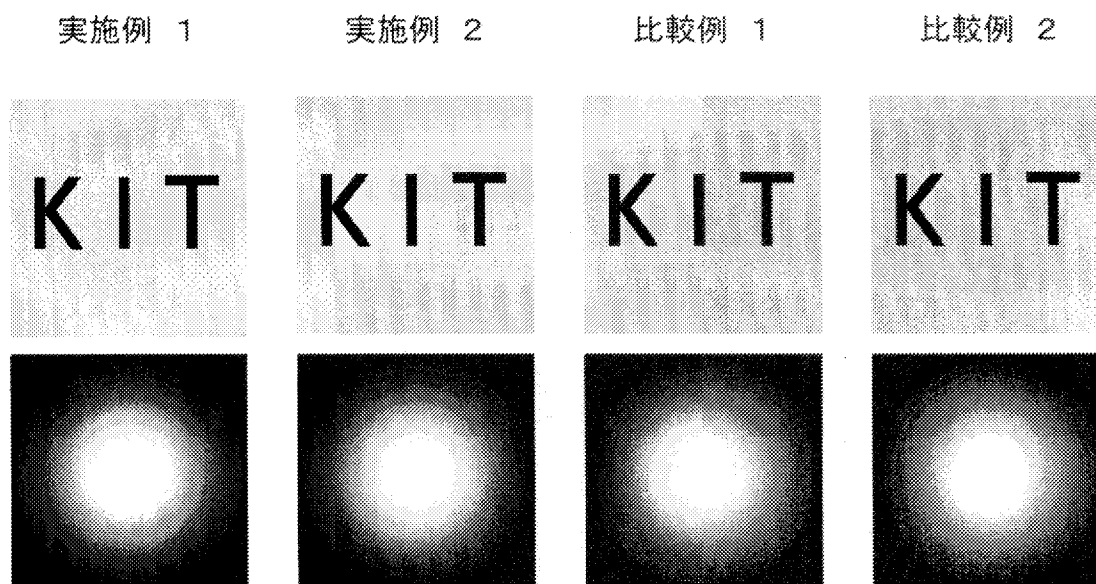
[図22]



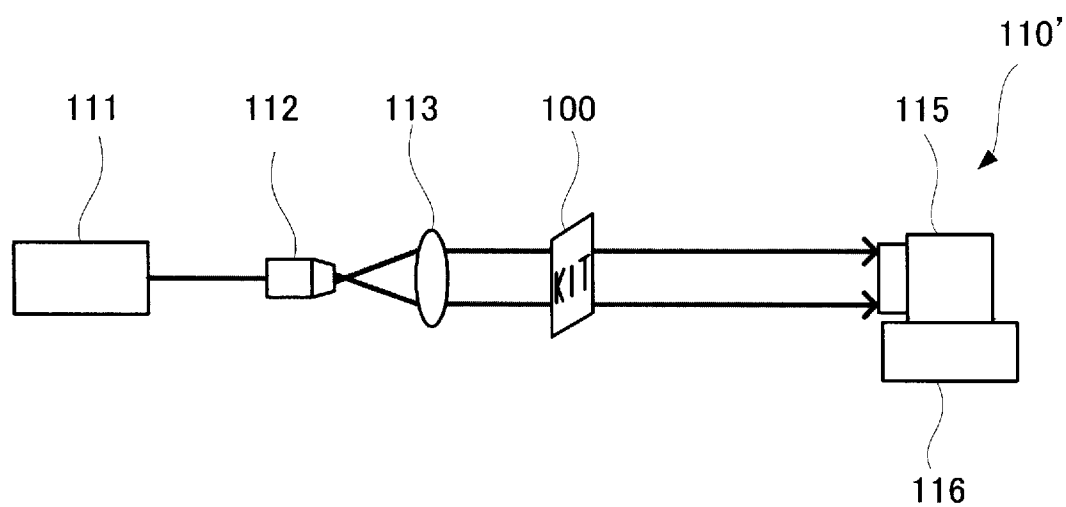
[図23]



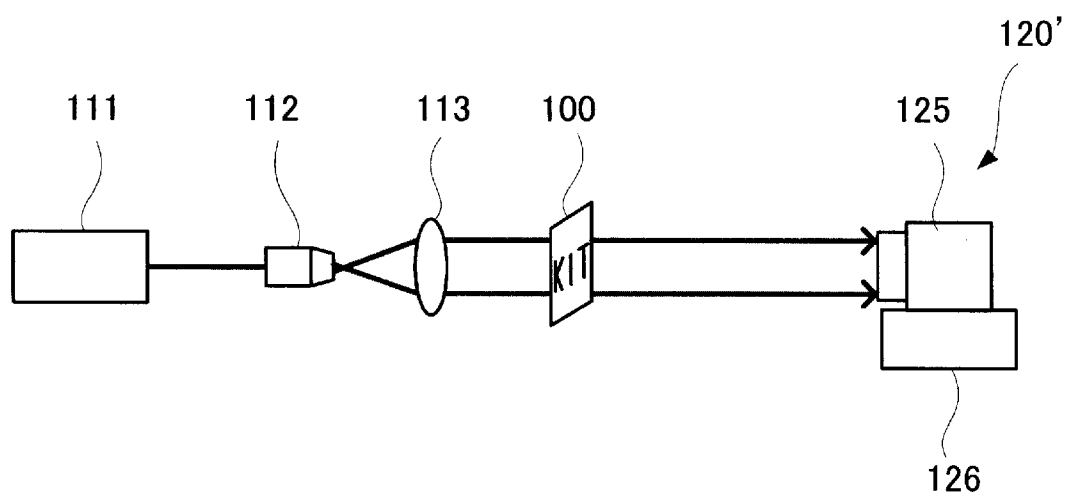
[図24]



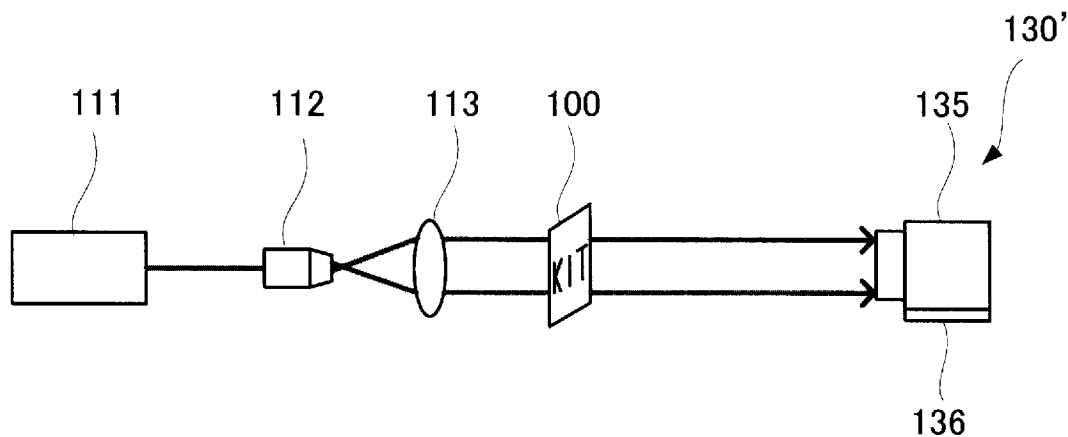
[図25]



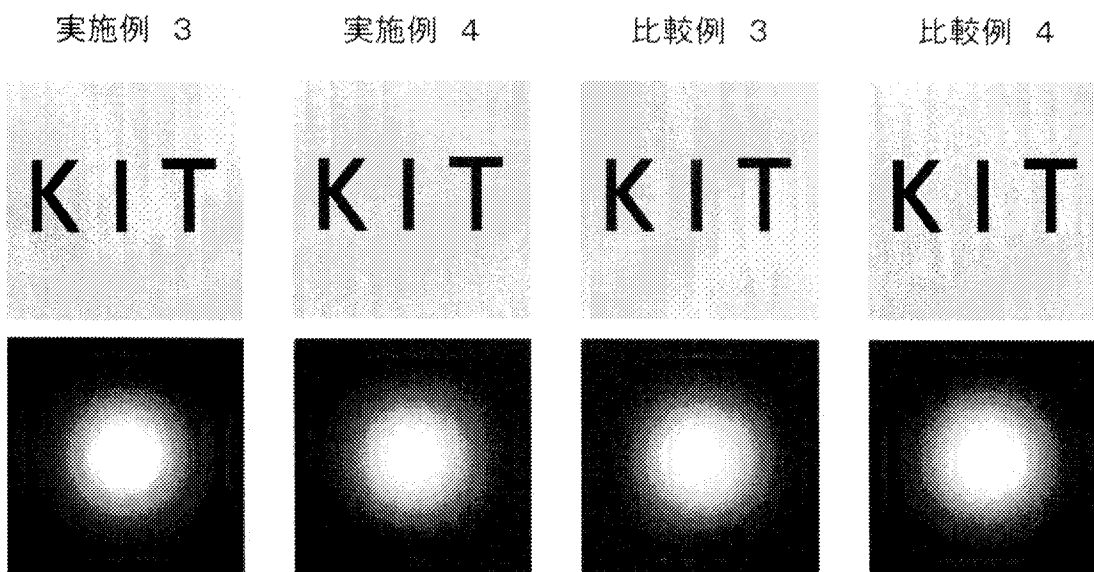
[図26]



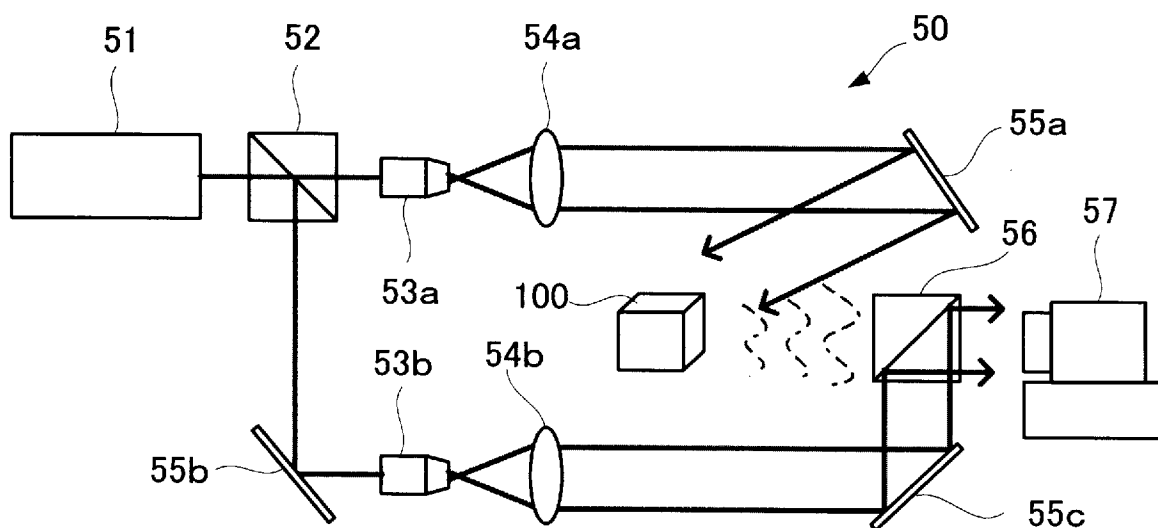
[図27]



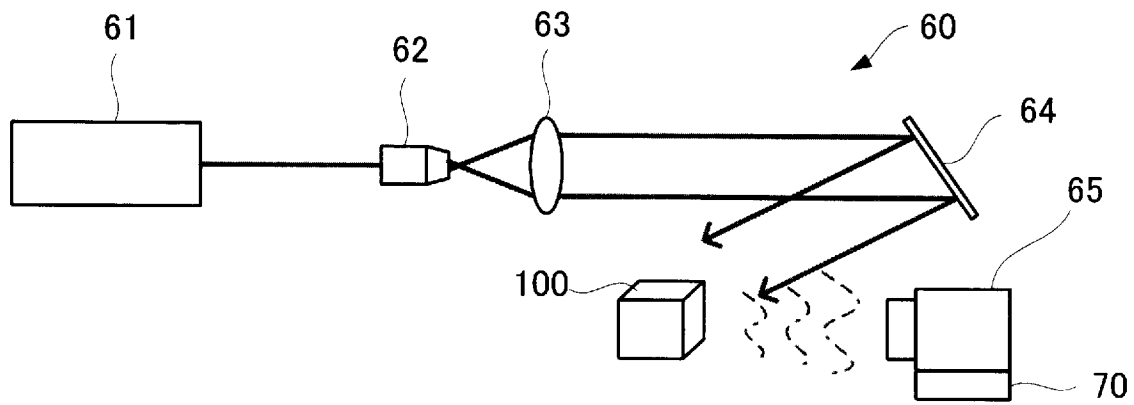
[図28]



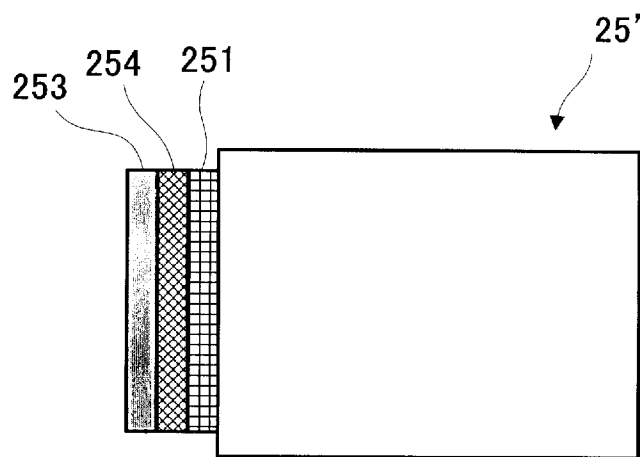
[図29]



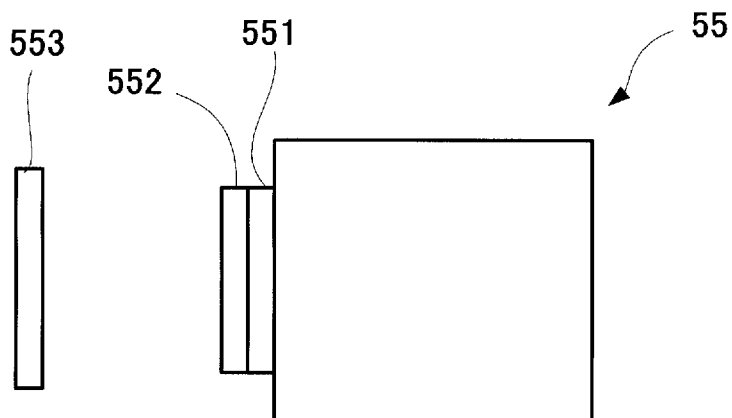
[図30]



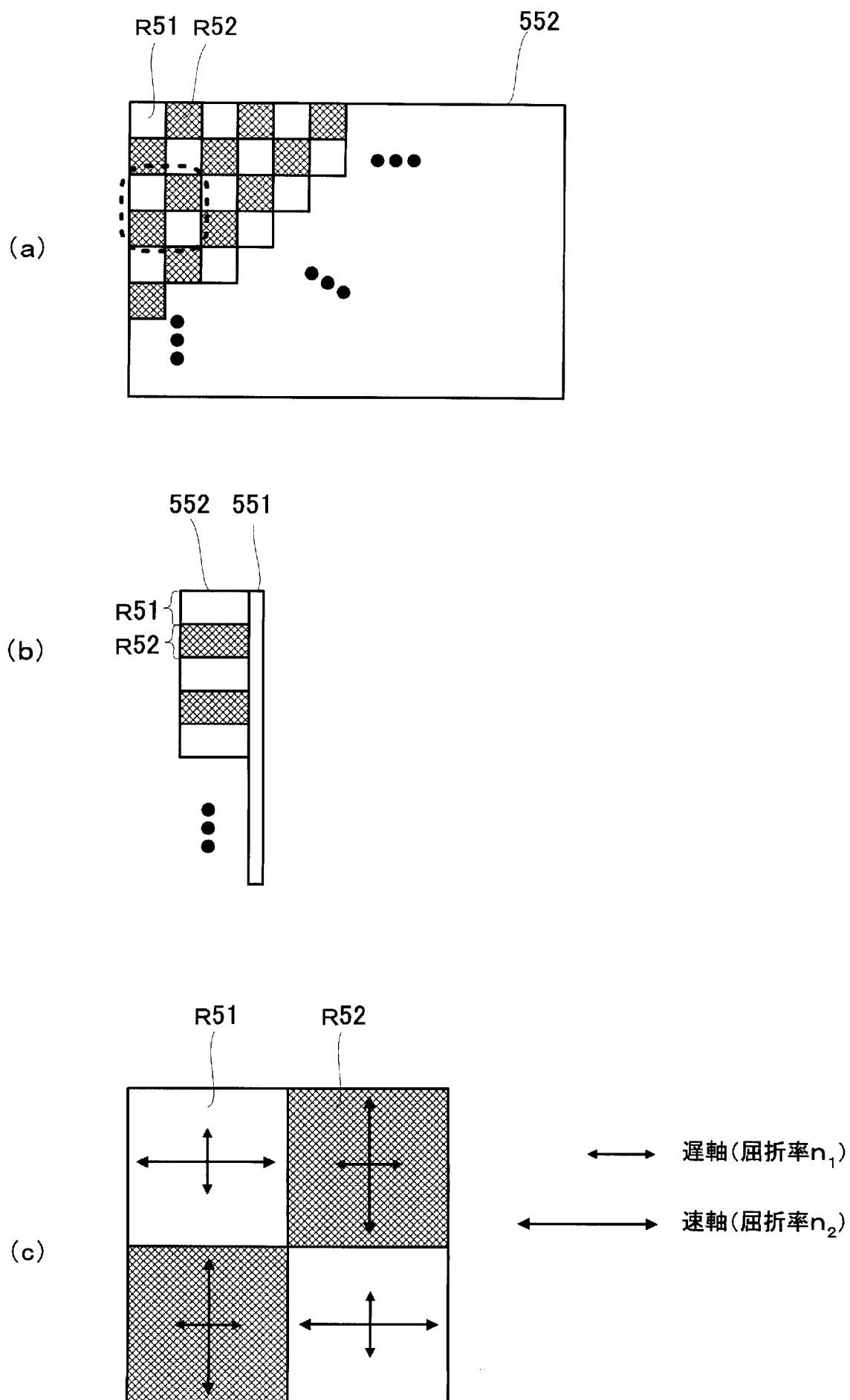
[図31]



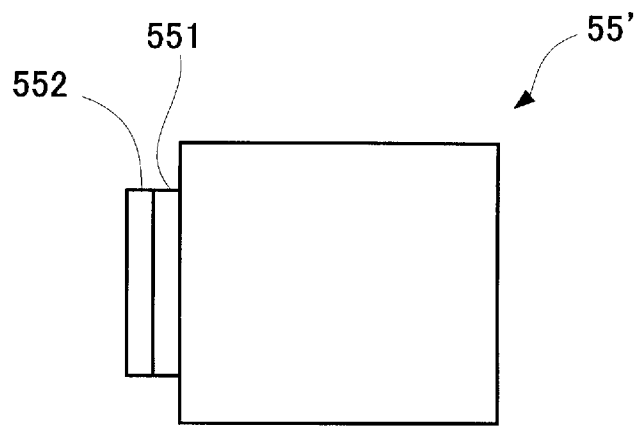
[図32]



[図33]



[図34]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/057701

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
G01B11/24(2006.01)i, G02B5/30(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
G01B11/00-11/30, G01C3/00-3/06

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched
Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2014
Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2014 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2014

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)
JSTPlus(JDreamIII), [(KYODO YUSO HOTEISHIKI + KYODO DENPA HOTEISHIKI)/tx]
(in Japanese)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	Tomohiro SHIRAI, "Phase Information Hidden in the Intensity Distribution", Japanese Journal of Optics, 10 October 2009 (10.10.2009), vol.38, no.10, pages 496 to 502	1-12
Y	JP 2011-99781 A (National University Corporation Kyoto Institute of Technology), 19 May 2011 (19.05.2011), paragraphs [0147] to [0153]; fig. 12, 13 (Family: none)	1-12
Y	JP 2004-138617 A (Mitsutoyo Corp.), 13 May 2004 (13.05.2004), paragraphs [0066] to [0145]; fig. 6 to 9 & US 2004/0070767 A1 & EP 1411321 A2 & CN 1497238 A	7,10-12

Further documents are listed in the continuation of Box C.

See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search
06 June, 2014 (06.06.14)

Date of mailing of the international search report
17 June, 2014 (17.06.14)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/057701

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	Chao Zuo, etc., Single-shot quantitative phase microscopy with the transport-of-intensity equation, Proceeding of SPIE International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology, 2013.04.11, Vol.8769, Pt.2, p.876931-1 - 876931-5	1-12

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))
 Int.Cl. G01B11/24(2006.01)i, G02B5/30(2006.01)i

B. 調査を行った分野
 調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))
 Int.Cl. G01B11/00-11/30, G01C3/00-3/06

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの
 日本国実用新案公報 1922-1996年
 日本国公開実用新案公報 1971-2014年
 日本国実用新案登録公報 1996-2014年
 日本国登録実用新案公報 1994-2014年

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)
 JSTPlus (JDreamIII) [(強度輸送方程式+強度伝播方程式)/tx]

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	白井智宏, 強度分布に隠された位相情報, 光学, 2009.10.10, 第38巻, 第10号, p.496-502	1-12
Y	JP 2011-99781 A (国立大学法人京都工芸繊維大学) 2011.05.19, 段落【0147】 - 【0153】, 図12, 13 (ファミリーなし)	1-12
Y	JP 2004-138617 A (株式会社ミットヨ) 2004.05.13, 段落【0066】 - 【0145】, 図6-9 & US 2004/0070767 A1 & EP 1411321 A2 & CN 1497238 A	7, 10-12

C欄の続きにも文献が列挙されている。 パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー
 「A」 特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
 「E」 国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
 「L」 優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)
 「O」 口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
 「P」 国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献
 「T」 国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
 「X」 特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
 「Y」 特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
 「&」 同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日 06.06.2014 国際調査報告の発送日 17.06.2014

国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/J P) 郵便番号100-8915 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	特許庁審査官 (権限のある職員) 丑田 真悟 電話番号 03-3581-1101 内線 3258	2S	3100
---	--	----	------

C (続き) . . . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	Chao Zuo, etc., Single-shot quantitative phase microscopy with the transport-of-intensity equation, Proceeding of SPIE International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology, 2013.04.11, Vol.8769, Pt.2, p.876931-1~876931-5	1-12