

(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
2013 年 1 月 24 日(24.01.2013)



(10) 国際公開番号
WO 2013/011680 A1

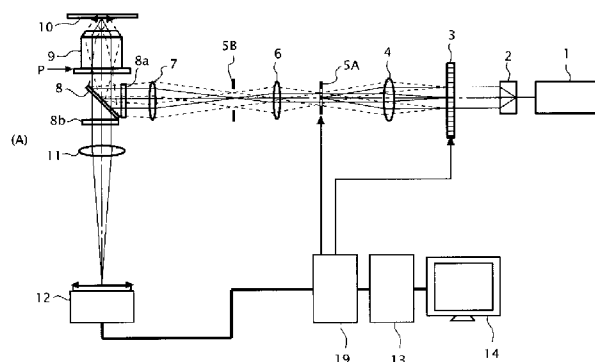
- (51) 国際特許分類:
G02B 21/06 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2012/004548
- (22) 国際出願日: 2012 年 7 月 13 日(13.07.2012)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2011-156456 2011 年 7 月 15 日(15.07.2011) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 株式会社ニコン(NIKON CORPORATION) [JP/JP]; 〒1008331 東京都千代田区有楽町一丁目 1 2 番 1 号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてののみ): 野村 達士(NOMURA, Tatsushi) [JP/JP]; 〒1008331 東京都千代田区有楽町一丁目 1 2 番 1 号株式会社ニコン内 Tokyo (JP). 大澤 日佐雄(OSAWA, Hisao) [JP/JP]; 〒1008331 東京都千代田区有楽町一丁目 1 2 番 1 号株式会社ニコン内 Tokyo (JP). 福武 直樹(FUKUTAKE, Naoki) [JP/JP]; 〒1008331 東京都千代田区有楽町一丁目 1 2 番 1 号株式会社ニコン内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 古谷 史旺, 外(FURUYA, Fumio et al.); 〒1600023 東京都新宿区西新宿 1 丁目 1 9 番 5 号第 2 明宝ビル 9 階 Tokyo (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, 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, IS, JP, KE, KG, KM, 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, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, 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.

[続葉有]

(54) Title: STRUCTURED ILLUMINATION DEVICE, STRUCTURED ILLUMINATION MICROSCOPE, AND STRUCTURED ILLUMINATION METHOD

(54) 発明の名称: 構造化照明装置、構造化照明顕微鏡、構造化照明方法

[図1]



(57) Abstract: To allow rapid switching of structured patterns and an increase in structured directions, this structured illumination device comprises: an optical modulator (3) which is positioned in a light beam which is emitted from a light source (1) and in which a sound wave propagation path is positioned in a direction which intersects the emitted light beam; a drive means (19) for causing a standing sound wave within the sound wave propagation path by applying a drive signal to the optical modulator to oscillate a medium of the sound wave propagation path; illumination optical assemblies (6, 7, 9) which create interference of at least three diffracted lights of the emitted light beam which passes through the sound wave propagation path and form an interference pattern thereof upon a subject of observation; and control means (5C, 19) for controlling the contrast of the interference pattern by modulating the phase of at least one of the diffracted lights in a prescribed period.

(57) 要約:

[続葉有]



(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 (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

構造化パターンの高速切り換えと構造化方向の拡張とを可能とするために、本発明の構造化照明装置は、光源 (1) からの射出光束中に配置され、その射出光束を横切る方向に音波伝搬路を配した光変調器 (3) と、前記音波伝搬路の媒体を振動させるための駆動信号を前記光変調器へ与えることにより、前記音波伝搬路内に音波定在波を生起させる駆動手段 (19) と、前記音波伝搬路を通過した前記射出光束の少なくとも 3 つの回折光を干渉させ、その干渉縞を被観察物に形成する照明光学系 (6、7、9) と、前記回折光の少なくとも 1 つの回折光の位相を所定の周期で変調することにより、前記干渉縞のコントラストを制御する制御手段 (5C、19) とを備える。

明 細 書

発明の名称：

構造化照明装置、構造化照明顕微鏡、構造化照明方法

技術分野

[0001] 本発明は、構造化照明装置、構造化照明顕微鏡、構造化照明方法に関する。

背景技術

[0002] 特許文献1には、構造化照明顕微鏡を蛍光観察へ適用した例が開示されている。特許文献1の方法では、可干渉光源から射出した光束を回折格子によって2つの光束に分割し、それら2つの光束を対物レンズの瞳上の互いに異なる位置へ個別に集光させる。このとき2つの光束は対物レンズから角度の異なる平行光束として射出し、試料面上で重なり合いストライプ状の干渉縞を形成する。これによって試料面が構造化照明される。そして特許文献1の方法では、構造化照明の位相をステップ状に変化させながら試料像の画像を繰り返し取得し、取得した複数の画像に対して、前述した分離に相当する演算（分離演算）と、前述した復調に相当する演算（復調演算）とを施している。

[0003] なお、構造化照明の位相をステップ状に変化させる方法としては、楔型プリズムを前述した2つの光束の一方に挿入して光軸と垂直な方向へステップ移動させる方法や、格子線と垂直な方向へ回折格子をステップ移動させる方法や、構造化照明のピッチ方向へ試料をステップ移動させる方法などがある。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：米国特許発明第6 2 3 9 9 0 9号公報

非特許文献

[0005] 非特許文献1：Proceedings of the SPIE - The International Society for

Optical Engineering (2000) vol.3919, p.141-50

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0006] しかしながら、光学素子をステップ移動させる場合、移動していた光学素子を適当な位置で静止させるのに一定の時間を要するので、特許文献2の方法において必要な画像を全て取得するまでの所要時間を短縮することは難しい。特に、観察対象である試料が生体標本である場合は、試料の構造が時々刻々と変化する可能性があるため、画像取得はできるだけ高速に行われるべきである。

[0007] また、干渉縞を利用した技術（特許文献1）の応用例として、試料の面内方向と深さ方向との双方に亘って超解像効果を得るために、干渉縞に寄与する光束を3光束化する技術（非特許文献1）も提案された。3光束を利用すれば、構造化照明のストライプパターンを面内方向だけでなく深さ方向にも発生させることができるからである。但し、その場合は前述した分離演算に必要な画像の枚数が多くなるので、画像取得を高速化する必要性は特に高いと考えられる。

[0008] そこで本発明は、構造化パターンの高速切り換えと構造化方向の拡張とが可能な構造化照明装置、構造化照明顕微鏡、構造化照明方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0009] 本発明の構造化照明装置の一態様は、光源からの射出光束中に配置され、その射出光束を横切る方向に音波伝搬路を配した光変調器と、前記音波伝搬路の媒体を振動させるための駆動信号を前記光変調器へ与えることにより、前記音波伝搬路内に音波定在波を生起させる駆動手段と、前記音波伝搬路を通過した前記射出光束の少なくとも3つの回折光を干渉させ、その干渉縞を被観察物に形成する照明光学系と、前記回折光の少なくとも1つの回折光の位相を所定の周期で変調することにより、前記干渉縞のコントラストを制御する制御手段とを備える。

[0010] 本発明の構造化照明顕微鏡は、本発明の構造化照明装置と、前記照明装置で照明された被観察物からの観察光束を検出する検出器で取得された、前記音波定在波のパターンの異なる複数の状態での各々の像に基づき、前記被観察物の超解像画像を算出する演算手段を更に備える。

[0011] 本発明の構造化照明方法の一態様は、光源からの射出光束中に配置され、その射出光束を横切る方向に音波伝搬路を配した光変調器を用意する光変調手順と、前記音波伝搬路の媒質を振動させるための駆動信号を前記光変調器へ与えることにより、前記音波伝搬路内に音波定在波を生起させる駆動手順と、前記音波伝搬路を通過した前記射出光束の少なくとも3つの回折光を干渉させ、その干渉縞を被観察物に形成する照明手順と、前記回折光の少なくとも1つの回折光の位相を所定の周期で変調することにより、前記干渉縞のコントラストを制御する制御手順とを含む。

図面の簡単な説明

[0012] [図1]図1 (A) は、第1の実施形態の構造化照明顕微鏡システムの構成図であり、図1 (B) は、マスク5 Aの周辺の拡大図であり、図1 (C) は、マスク5 Aを光軸方向から見た模式図であり、図1 (D) は、マスク5 Aの変形例である。

[図2]図2 (A) は、超音波空間光変調器3の超音波伝搬路R内に生起する超音波定在波のパターンを示す模式図であり、図2 (B) は、それに対応する2光束構造化照明のパターン（明部及び暗部の配置）を示す模式図である。図2 (C) ～ (E) は、波本数が変化したときの縞本数の変化を説明する図である。

[図3]図3 (A) は、長さLと距離Dとの関係を説明する図であり、図3 (B) は、スポットSに対応する構造化照明S'の概念図であり、図3 (C) は、構造化照明S'の縞本数のずれを説明する図である。

[図4]超音波空間光変調器3の構成図である。

[図5]制御装置19の基本構成（駆動回路19 A）を説明する図である。

[図6]2次元モードにおけるCPUの動作フローチャートである。

[図7]超音波伝搬路の屈折率分布の時間変化を示す図である。

[図8]図8 (A) は、超音波定在波のパターンを示す模式図であり、図8 (B) は、2光束構造化照明のパターンを示す模式図である。

[図9]図9 (A) は、超音波定在波のパターンを示す模式図であり、図9 (B) は、3光束構造化照明のパターンを示す模式図である。

[図10]3次元モードに関わる制御装置19の構成を説明する図である。

[図11](A) は、第1出力端子から出力される正弦信号の波形を示す図であり、(B) は、第2出力端子から出力されるパルス信号の波形を示す図である。

[図12]超音波定在波の腹aの屈折率の時間変化波形（実線）と、0次回折光の位相変調量の時間変化波形（点線）とを比較する図である。図12 (A) は、これら2つの波形の位相差 $\Delta\psi$ が $\pi/2$ の偶数倍であるときの波形であり、図12 (B) は、2つの波形の位相差 $\Delta\psi$ が $\pi/2$ の奇数倍以外であるときの波形であり、図12 (C) は、2つの波形の位相差 $\Delta\psi$ が $\pi/2$ の奇数倍であるときの波形である。

[図13]図13 (A) は、図7における定在波の腹aの屈折率の時間変化波形であり、図13 (B) は、0次回折光の位相変調量の時間変化波形であり、図13 (C) は、電荷蓄積期間を示す波形である（但し、 $N=3$ の場合）。

[図14]位相変調の対象が0次回折光であるときの位相変調パターンの例である。

[図15]位相変調の対象が ± 1 次回折光であるときの位相変調パターンの例である。

[図16]図16 (A)、(B) は、位相変調の対象が ± 1 次回折光であるときのマスクの例である。

[図17] $D:L=1:6$ の設定下における位相シフトピッチを説明する図である。

[図18]超音波空間光変調器3の変形例である。

[図19]位相変調の対象が ± 1 次回折光であるときのマスクの別の例である。

[図20]位相変調の対象が ± 1 次回折光であるときの位相変調パターンの例である。

発明を実施するための形態

[0013] [第1の実施形態]

以下、本発明の第1の実施形態として構造化照明顕微鏡システムを説明する。

[0014] 図1は、本実施形態の構造化照明顕微鏡システムの構成図である。

[0015] 図1(A)に示すとおり本システムには、可干渉光源1と、コレクタレンズ2と、超音波空間光変調器3と、レンズ4と、マスク5Aと、レンズ6と、視野絞り5Bと、レンズ7と、励起フィルタ8aと、ダイクロイックミラー8と、蛍光フィルタ8bと、第二対物レンズ11と、撮像装置(CCDカメラなど)12と、制御装置19と、画像記憶・演算装置(コンピュータなど)13と、画像表示装置14と、対物レンズ9とが配置される。なお、図1(A)中に符号10で示すのは、不図示のステージ上に載置された標本であり、ここでは、予め蛍光染色されていると仮定する。

[0016] 可干渉光源1は、標本10の励起波長と同じ波長の光を出射する。可干渉光源1から射出した光は、コレクタレンズ2によって平行光に変換され、超音波空間光変調器3へ入射する。

[0017] 超音波空間光変調器3は、光軸と垂直な方向に伝搬する超音波伝搬路Rを有しており、その超音波伝搬路Rに超音波の平面定在波(以下、「超音波定在波」という。)を生起させることにより、超音波伝搬路Rに正弦波状の屈折率分布を付与する。このような超音波空間光変調器3は、入射光に対して位相型回折格子の働きをし、その光を各次数の回折光(0次回折光、+1次回折光、-1次回折光、+2次回折光、-2次回折光、...)に分岐する。なお、図1(A)では、代表して0次回折光及び ± 1 次回折光のみを描いた。図1において実線で示したのが0次回折光であり、点線で示したのが ± 1 次回折光である。超音波空間光変調器3から射出した各次数の回折光は、レンズ4を通過した後に瞳共役面を形成する。

- [0018] ここで、瞳共役面は、レンズ4の焦点位置（後ろ側焦点位置）であって、後述する対物レンズ9の瞳P（ ± 1 次回折光が集光する位置）に対してレンズ7、レンズ6を介して共役な位置をいう（なお、「共役な位置」の概念には、当業者が対物レンズ9、レンズ6、7の収差、ビネッティング等、設計上必要な事項を考慮して決定した位置も含まれる。）。
- [0019] マスク5Aは、瞳共役面に配置され、瞳共役面へ入射した各次数の回折光のうち、2次以降の高次回折光をカットする機能を有する。また、マスク5Aは、図1（B）に拡大して示すとおり、光位相変調器5Cと補正用ブロック5C'とを基板に形成したものである。このうち光位相変調器5Cの配置先は、瞳共役面において0次回折光の入射する領域であり、補正用ブロック5C'の配置先は、瞳共役面において ± 1 次回折光の入射する領域である。図1（C）には、光位相変調器5Cと補正用ブロック5C'との配置関係の一例を示した（なお、図1（C）は模式図であり、電極や配線などの図示も省略してある。）。
- [0020] 光位相変調器5Cは、入射光（ここでは0次回折光）の位相を時間方向にかけて変調幅 π で変調する光位相変調器である。この光位相変調器5Cには、カー効果を利用したEOモジュレータ（電気光学モジュレータ）、ポッケルス効果を利用したEOモジュレータ、AOモジュレータ（音響光学モジュレータ）などを適用することができる。この光位相変調器5Cは、制御装置19によって制御される。
- [0021] 補正用ブロック5C'は、光位相変調器5Cの位相変調量がゼロであるとき（光位相変調器5Cに電圧が印加されていないとき）にマスク5Aを通過する0次回折光とマスク5Aを通過する ± 1 次回折光との間の位相差をゼロにするための位相ブロックである。
- [0022] ここで、詳細は後述するが、超音波空間光変調器3による回折光の分岐方向は、切り換えが可能である。この場合、瞳共役面における0次回折光の入射領域は不変であるが、瞳共役面における ± 1 次回折光の入射領域は、光軸の周りに移動する。よって、補正用ブロック5C'の配置先は、例えば図1

(D) に示すとおり、 ± 1 次回折光の入射しうる領域の全体に設定されていることが望ましい。以下では、補正用ブロック 5 C' の配置先は、図 1 (D) に示すとおり ± 1 次回折光の入射しうる領域の全体に設定されたと仮定する。

[0023] また、ここでは、光位相変調器 5 C は、後述する 2 次元モードと 3 次元モードとの切り換えを行うために、入射光（ここでは 0 次回折光）の位相を変調する機能（位相変調機能）だけでなく、入射光（ここでは 0 次回折光）を必要に応じて遮光する機能（遮光機能）も有しているものとする。なお、光位相変調器 5 C に遮光機能を搭載する代わりに、0 次回折光の単独光路を開閉するシャッタを別途設けてもよいが、以下では、光位相変調器 5 C に遮光機能が搭載されていると仮定する。

[0024] 因みに、図 1 (A) は、光位相変調器 5 C の遮光機能がオンされた状態を示しており、図 1 (B) は、光位相変調器 5 C の遮光機能がオフされた状態を示している。

[0025] 先ず、光位相変調器 5 C の遮光機能がオンされた状態を仮定して説明する。この場合、図 1 (A) に示すとおりマスク 5 A を通過する回折光は、 ± 1 次回折光のみとなる。

[0026] マスク 5 A を通過した ± 1 次回折光によって、レンズ 6 を介して標本 10 の共役面が形成される。この標本 10 の共役面の近傍には視野絞り 5 B が配置されており、これは標本 10 への照明領域（観察領域）のサイズを制御する機能を有している。

[0027] 視野絞り 5 B を通過した ± 1 次回折光は、レンズ 7 を通過した後に励起フィルタ 8 a を介してダイクロイックミラー 8 へ入射し、そのダイクロイックミラー 8 を反射する。ダイクロイックミラー 8 を反射した ± 1 次回折光は、対物レンズ 9 の瞳 P 上の互いに異なる位置にそれぞれスポットを形成する。なお、瞳 P 上に ± 1 次回折光が形成する 2 つのスポットの形成位置は、瞳 P の概ね最外周部であって、対物レンズ 9 の光軸に関して互に対称な位置である。この場合、対物レンズ 9 の先端から射出する ± 1 次回折光は、対物レ

ンズ 9 の N A に相当する角度で互いに反対の方向から標本 10 を照射する。
なお、後述するように印加電圧の周波数を微小に変更させた結果、回折格子のピッチ（1 周期）が微小に変化した場合には、2 つのスポットの形成位置は極めて微小に変化する。

[0028] ここで、標本 10 に照射されるこれらの ± 1 次回折光は、可干渉光源 1 から射出した互いに可干渉な光である。よって、これらの ± 1 次回折光によると、標本 10 には縞ピッチが一様なストライプ状の干渉縞が投影される。つまり、標本 10 への照明パターンは、縞構造を持った照明パターンとなる。このように縞構造を持った照明パターンによる照明が、構造化照明である。構造化照明された標本 10 の蛍光領域（前述した蛍光染色された領域）では蛍光物質が励起され、蛍光を発する。

[0029] なお、この構造化照明は、 ± 1 次回折光の 2 光束のみからなるので、標本 10 の面内方向にかけては構造化されているが、標本 10 の深さ方向（光軸方向）にかけては構造化されていない。以下、このような構造化照明を「2 光束構造化照明」と称す。

[0030] この 2 光束構造化照明によると、2 光束構造化照明の構造周期と蛍光領域の構造周期（標本の構造周期に相当）との差に相当するモアレ縞が標本 10 に現れる。このモアレ縞上では、蛍光領域の構造の空間周波数が変調されており、実際よりも低い空間周波数にシフトしている。したがって 2 光束構造化照明によると、蛍光領域の構造のうち空間周波数の高い成分を示す蛍光、すなわち対物レンズ 9 の解像限界を超える大角度で射出した蛍光までもが対物レンズ 9 へ入射できる。

[0031] 標本 10 から射出し対物レンズ 9 へ入射した蛍光は、対物レンズ 9 により平行光に変換された後にダイクロイックミラー 8 へ入射する。その蛍光は、ダイクロイックミラー 8 を透過した後、蛍光フィルタ 8 b を介して第二対物レンズ 11 を通過することにより撮像装置 12 の撮像面上に標本 10 の蛍光像を形成する。但し、この蛍光像には、標本 10 の蛍光領域の構造情報だけでなく 2 光束構造化照明の構造情報も含まれており、この蛍光像では、標本

10の蛍光領域の構造の空間周波数は変調されたままである（つまり実際よりも低い空間周波数にシフトしたままである）。

[0032] 制御装置19は、超音波空間光変調器3の超音波伝搬路Rに生起する超音波定在波を制御することにより、2光束構造化照明のパターンを変化させる（詳細は後述。）。そして、制御装置19は、2光束構造化照明のパターンが各状態にあるときに撮像装置12を駆動して複数種類の画像データを取得し、それら複数種類の画像データを順次に画像記憶・演算装置13へ送出する。なお、撮像装置12による1フレーム当たりの電荷蓄積時間は、例えば1/30秒、1/60秒などである。

[0033] 画像記憶・演算装置13は、取り込まれた複数種類の画像データに対して線形演算からなる分離演算を施すことにより、構造化照明の構造情報の除去された画像データを取得する。また、画像記憶・演算装置13は、構造情報の除去された画像データに対して復調係数の乗算からなる復調演算を施すことにより、蛍光領域の構造情報の空間周波数が実際の空間周波数に戻された復調画像データを取得し、それを画像表示装置14へ送出する。なお、具体的な演算には、例えばUS8115806に開示された方法を用いることができる。これによって画像表示装置14には、対物レンズ9の解像限界を超えた解像画像（2次元超解像画像）が表示される。

[0034] 図2（A）は、超音波伝搬路R内に生起する超音波定在波のパターンを示す模式図であり、図2（B）は、それに対応する2光束構造化照明のパターン（明部及び暗部の配置）を示す模式図である（但し、実際には、2光束構造化照明のパターンに寄与するのは、超音波定在波のパターンうち有効な光束が通過する領域のパターンのみである。）。また、図2（A）では、説明をわかりやすくするため超音波定在波の波本数を実際よりも少ない「2」とした。

[0035] 図2（A）に示すとおり、超音波定在波の波本数（位相変化 2π で波本数1本とカウントする）が「2」であるときには、図2（B）に示すとおり、±1次回折光の干渉による2光束構造化照明の縞本数（明部又は暗部の本数

)は「4」となる。つまり、2光束構造化照明の縞本数は、それに対応する超音波定在波の波本数の2倍となる。

[0036] また、例えば図2 (C)、(D)、(E)に示すとおり、超音波定在波の波本数を2、 $(2 + 1/2)$ 、3のように $1/2$ ずつ3通りに変化させたならば(即ち、超音波定在波の波長を変化させたならば)、それに対応する2光束構造化照明の縞本数は4、5、6のように1ずつ3通りに変化する。

[0037] ここで、図2中に白矢印で示すとおり超音波伝搬路Rの一端から $1/2$ だけずれた部分のみに着目すると、その着目部分に対応する2光束構造化照明の位相は、「 π 」ずつ3通りに変化している。

[0038] また、図2中に黒矢印で示すとおり超音波伝搬路Rの一端から $1/3$ だけずれた部分のみに着目すると、その着目部分に対応する2光束構造化照明の位相は、「 $2\pi/3$ 」ずつ3通りに変化している。

[0039] よって、仮に、超音波伝搬路Rに対する光の入射領域を白矢印で示した位置のみに制限したならば、超音波定在波の波本数を $1/2$ ずつ変化させるだけで、2光束構造化照明の位相を「 π 」ずつ変化させることができる。

[0040] また、仮に、超音波伝搬路Rに対する光の入射領域を黒矢印で示した位置のみに制限したならば、超音波定在波の波本数を $1/2$ ずつ変化させるだけで、2光束構造化照明の位相を「 $2\pi/3$ 」ずつ変化させることができる。

[0041] ここで、2光束構造化照明の構造情報を除去するための前述した分離演算は、2光束構造化照明の位相の異なる少なくとも3つの画像データが必要である。その場合、2光束構造化照明の1ステップ当たりの位相シフト量は、例えば $2\pi/3$ とすればよい。

[0042] この時、2光束構造化照明により2次元超解像画像を生成するためには、図3 (A)に示すとおり、超音波伝搬路Rへ入射する光のスポット(有効径)Sの中心から超音波伝搬路Rの一端までの距離Dは、超音波伝搬路Rの伝搬方向の長さLの $1/3$ 倍に設定すればよい($D = L/3$)。

[0043] 但し、超音波伝搬路Rに生起する超音波定在波の波本数が $1/2$ だけ変化すると、スポットSの内部に生起する超音波定在波の波本数も少しずれるの

で、図3（B）に示すとおりスポットSに対応する2光束構造化照明S'の縞本数も少しずれてしまう（但し、図3に示した波パターン及び縞パターンは模式図であって、波本数及び縞本数は実際の本数に一致しているとは限らない。）。

[0044] そこで、超音波伝搬路Rの長さLは、2光束構造化照明S'の縞本数のズレがほぼゼロとみなせるよう、スポットSの径 ϕ に比べて十分に大きく設定されるものとする。

[0045] 具体的には、超音波伝搬路Rの長さLと、スポットSの径 ϕ とは、2光束構造化照明S'の縞本数のズレの許容量 δ に対して、 $\phi/L < \delta$ の関係を満たすように設定される。

例えば、2光束構造化照明S'の縞本数のズレを0.15本以下に抑える必要があったならば、その関係式は、 $\phi/L \leq 0.15$ となる。

[0046] 本実施形態では、スポットSの径 ϕ を4mmとし、超音波伝搬路Rの長さLを30mmと仮定し、適正周波数で縞本数を制御すれば、図3（C）に示すとおり、2光束構造化照明S'の両端における縞のズレは、0.068本分程度となる。そのため、2光束構造化照明S'の全域における縞本数のズレは $0.068 + 0.068 = 0.13$ 本程度に抑えられる。

なお、図3（C）において点線で示したのは2光束構造化照明S'の理想パターン（縞本数のズレがゼロである場合のパターン）であり、実線で示したのは2光束構造化照明S'の実際のパターンであるが、わかりやすくするために両者のズレを強調して描いた。

[0047] なお、以上の説明では、超音波光変調器3の超音波伝搬路R上でスポットSの径 ϕ は、 $\phi/L < \delta$ の関係を満たしたが、必ずしも満たしていなくてもよく、例えば、超音波光変調器3から射出した ± 1 次回折光を視野絞り5Bで絞った場合、超音波伝搬路Rの長さL、標本面10における照明領域（観察領域、視野領域）の直径 ϕ' 、標本面10から超音波光変調器3への光学倍率mは、構造化照明S'の縞本数のズレの許容量 δ に対して、 $\phi' \times m / L < \delta$ の関係を満たすように設定されればよい。

[0048] 図4は、超音波空間光変調器3の構成を詳しく説明する図である。図4（A）は、超音波空間光変調器3を正面（光軸方向）から見た図であり、図4（B）は、超音波空間光変調器3を側面（光軸に垂直な方向）から見た図である。

[0049] 図4に示すように、超音波空間光変調器3は、音響光学媒体15を備え、その音響光学媒体15は、互いに対向する平行な側面対を3対有した角柱状に整えられている。これら3対の側面対の各々の一方に3つのトランスデューサ18a、18b、18cが個別に設けられており、これによって1つの音響光学媒体15内に3つの超音波伝搬路が形成される。以下、トランスデューサ18aの形成面とそれに相対する側面15aとの間に形成される超音波伝搬路を「超音波伝搬路Ra」とおき、トランスデューサ18bの形成面とそれに相対する側面15bとの間に形成される超音波伝搬路を「超音波伝搬路Rb」とおき、トランスデューサ18cの形成面とそれに対応する側面15cとの間に形成される超音波伝搬路を「超音波伝搬路Rc」とおく。

[0050] なお、音響光学媒体15の材質は、例えば石英ガラス、テルライトガラス、重フリントガラス、フリントガラスなどであり、3対の側面対及び2つの底面は、それぞれ十分な精度で研磨されている。

[0051] ここで、3つの超音波伝搬路Ra、Rb、Rcの各々の長さLは共通であると仮定する（ $L = 30\text{ mm}$ ）。また、その長さLは前述したスポットSの径 ϕ に対して前述した条件を満たしている。また、3つの超音波伝搬路Ra、Rb、Rcは、各々の一端から $L/3$ だけ離れた位置において 60° ずつ異なる角度で交差している。その交差位置に前述したスポットSの中心が位置する。

[0052] トランスデューサ18aは、圧電体16aと、圧電体16aの上下面に個別に形成された2つの電極17aとを有した超音波トランスデューサであり、そのうち一方の電極17aを介して音響光学媒体15の1つの側面に接合されている。このトランスデューサ18aの2つの電極17aの間に高周波の正弦波状の交流電圧が印加されると、圧電体16aが厚み方向に振動し、

超音波伝搬路 R a 内を平面超音波が往復する。2つの電極 1 7 a の間に印加される交流電圧の周波数が特定の周波数（適正周波数）に設定された場合、その超音波は定在波となるので、超音波伝搬路の屈折率には、超音波の伝搬方向にかけて正弦波状の分布が付与される。これによって、超音波伝搬路 R a は、超音波の伝搬方向と垂直な位相格子を持った位相型回折格子となる。以下、この超音波伝搬路 R a の伝搬方向を、「第 1 方向」と称す。

[0053] また、トランスデューサ 1 8 b も、トランスデューサ 1 8 a と同じ構成をしており、圧電体 1 6 b と、圧電体 1 6 b の上下面に個別に形成された 2 つの電極 1 7 b とを有し、そのうち一方の電極 1 7 b を介して音響光学媒体 1 5 の 1 つの側面に接合されている。

[0054] したがって、トランスデューサ 1 8 b の 2 つの電極 1 7 b の間に適正周波数の交流電圧が印加されると、超音波伝搬路 R b 内を平面超音波が伝搬するので、超音波伝搬路 R b は、超音波の伝搬方向と垂直な位相格子を持った位相型回折格子となる。以下、この超音波伝搬路 R b の伝搬方向を、「第 2 方向」と称す。この第 2 方向は、第 1 方向に対して 60° の角度を成す。

[0055] また、トランスデューサ 1 8 c も、トランスデューサ 1 8 a と同じ構成をしており、圧電体 1 6 c と、圧電体 1 6 c の上下面に個別に形成された 2 つの電極 1 7 c とを有し、そのうち一方の電極 1 7 c を介して音響光学媒体 1 5 の 1 つの側面に接合されている。

[0056] したがって、トランスデューサ 1 8 c の 2 つの電極 1 7 c の間に適正周波数の交流電圧が印加されると、超音波伝搬路 R c 内を平面超音波が伝搬するので、超音波伝搬路 R c は、超音波の伝搬方向と垂直な位相格子を持った位相型回折格子となる。以下、この超音波伝搬路 R c の伝搬方向を、「第 3 方向」と称す。この第 3 方向は、第 1 方向に対して -60° の角度を成す。

[0057] 図 5 は、制御装置 1 9 の基本構成を説明する図である。図 5 中に符号 1 9 A で示すのは、制御装置 1 9 に備えられた駆動回路 1 9 A であり、高周波交流電源 1 9 A-1 と切り換えスイッチ 1 9 A-2 とを備える。

[0058] 高周波交流電源 1 9 A-1 は、超音波空間光変調器 3 へ供給されるべき交

流電圧を生成する。その交流電圧の周波数は、制御回路 19 内の CPU によって適正周波数（例えば、数十 MHz ～ 100 MHz 内の何れかの値）に制御される。

- [0059] よって、2 光束構造化照明 S' の位相シフト量を例えば $-2\pi/3$ 、0、 $+2\pi/3$ の 3 通りにステップ状に変化させる場合、CPU は、その交流電圧の周波数を、周波数の異なる 3 通りの適正周波数 f_{-1} 、 f_0 、 f_{+1} の間で切り換えればよい。
- [0060] 例えば、適正周波数 f_0 は、長さ L が 30 mm である超音波伝搬路 R a、R b、R c に 100 本の超音波定在波（それに対応する 2 光束構造化照明の縞本数は 200）を生起させるための適正周波数（80 MHz）とする。この適正周波数 f_0 では、2 光束構造化照明 S' の位相シフト量はゼロである。
- [0061] この場合、適正周波数 f_{-1} は、長さ L が 30 mm である超音波伝搬路 R a、R b、R c に $(100 - 1/2)$ 本の超音波定在波（それに対応する 2 光束構造化照明の縞本数は 199）を生起させるための適正周波数（79.946 MHz）となる。この適正周波数 f_{-1} では、2 光束構造化照明 S' の位相シフト量は $-2\pi/3$ となる。
- [0062] また、適正周波数 f_{+1} は、長さ L が 30 mm である超音波伝搬路 R a、R b、R c に $(100 + 1/2)$ 本の超音波定在波（それに対応する 2 光束構造化照明の縞本数は 201）を生起させるための適正周波数（80.054 MHz）となる。この適正周波数 f_{+1} では、2 光束構造化照明 S' の位相シフト量は $+2\pi/3$ となる。
- [0063] 切り換えスイッチ 19 A - 2 は、高周波交流電源 19 A - 1 と超音波空間光変調器 3 との間に配置され、超音波空間光変調器 3 の側の接続先を、超音波空間光変調器 3 の 3 つのトランスデューサ 18 a、18 b、18 c の間で切り換えることが可能である。スイッチ 19 A - 2 の接続先は、制御装置 19 内の CPU によって適宜に切り換えられる。
- [0064] 切り換えスイッチ 19 A - 2 の接続先がトランスデューサ 18 a の側であるとき、交流電圧はトランスデューサ 18 a の 2 つの電極の間に印加される

ので、3つの超音波伝搬路 R a、R b、R cのうち超音波伝搬路 R aのみが有効となる。

[0065] また、切り換えスイッチ 19 A-2の接続先がトランスデューサ 18 bの側であるとき、交流電圧はトランスデューサ 18 bの2つの電極の間に印加されるので、3つの超音波伝搬路 R a、R b、R cのうち超音波伝搬路 R bのみが有効となる。

[0066] また、切り換えスイッチ 19 A-2の接続先がトランスデューサ 18 cの側であるとき、交流電圧はトランスデューサ 18 cの2つの電極の間に印加されるので、3つの超音波伝搬路 R a、R b、R cのうち超音波伝搬路 R cのみが有効となる。

[0067] このように、有効な超音波伝搬路を3つの超音波伝搬路 R a、R b、R cの間で切り換えれば、2光束構造化照明 S' の方向を第1方向に対応する方向と、第2方向に対応する方向と、第3方向に対応する方向との間で切り換えることができる。

[0068] したがって、以上の超音波空間光変調器 3及び制御装置 19を適切に駆動すれば、詳細な2次元超解像画像を生成することができる。具体的には、以下のとおりである。

[0069] 図6は、CPUの動作フローチャートである。以下、各ステップを順に説明する。

[0070] ステップ S 1 1 : CPUは、切り換えスイッチ 19 A-2の接続先を1番目のトランスデューサ（トランスデューサ 18 a）の側に設定することにより、2光束構造化照明 S' の方向を第1方向に対応する方向に設定する。

[0071] ステップ S 1 2 : CPUは、高周波交流電源 19 A-1が生成する交流電圧の周波数を、適正周波数 f_{-1} に設定することにより、2光束構造化照明 S' の位相シフト量を $-2\pi/3$ に設定する。

[0072] ステップ S 1 3 : CPUは、この状態で撮像装置 12を駆動して画像データ I_{-1} を取得する。

[0073] ステップ S 1 4 : CPUは、高周波数交流電源 19 A-1が生成する交流

電圧の周波数を、適正周波数 f_0 に設定することにより、2 光束構造化照明 S' の位相シフト量をゼロに設定する。

[0074] ステップ $S15$: CPU は、この状態で撮像装置 12 を駆動して画像データ I_0 を取得する。

[0075] ステップ $S16$: CPU は、高周波数交流電源 $19A-1$ が生成する交流電圧の周波数を、適正周波数 f_{+1} に設定することにより、2 光束構造化照明 S' の位相シフト量を $+2\pi/3$ に設定する。

[0076] ステップ $S17$: CPU は、この状態で撮像装置 12 を駆動して画像データ I_{+1} を取得する。

[0077] ステップ $S18$: CPU は、2 光束構造化照明 S' の方向が前述した 3 方向の全てに設定済みであるか否かを判別し、設定済みで無い場合はステップ $S19$ へ移行し、設定済みであった場合はフローを終了する。

[0078] ステップ $S19$: CPU は、切り換えスイッチ $19A-2$ の接続先を切り換えることにより 2 光束構造化照明 S' の方向を切り換えてから、ステップ $S12$ へ移行する。

[0079] 以上のフローによると、第 1 方向に関する画像データ I_{a-1} 、 I_{a0} 、 I_{a+1} と、第 2 方向に関する画像データ I_{b-1} 、 I_{b0} 、 I_{b+1} と、第 3 方向に関する画像データ I_{c-1} 、 I_{c0} 、 I_{c+1} とが取得される。これらの画像データは、画像記憶・演算装置 13 へ取り込まれる。

[0080] 画像記憶・演算装置 13 は、第 1 方向に関する 3 つの画像データ I_{a-1} 、 I_{a0} 、 I_{a+1} に基づき第 1 方向に亘る復調画像データ I_a' を取得し、第 2 方向に関する 3 つの画像データ I_{b-1} 、 I_{b0} 、 I_{b+1} に基づき第 2 方向に亘る復調画像データ I_b' を取得し、第 3 方向に亘る 3 つの画像データ I_{c-1} 、 I_{c0} 、 I_{c+1} に基づき第 3 方向に亘る復調画像データ I_c' を取得すると、それら 3 つの復調画像データ I_a' 、 I_b' 、 I_c' を波数空間上で合成してから再び実空間に戻すことにより、第 1 方向、第 2 方向、第 3 方向に亘る超解像画像の画像データ I を取得し、その画像データ I を画像表示装置 14 へ送出する。この超解像画像は、標本 10 の面内方向の 3 方向に亘る 2 次

元超解像画像である。

[0081] 以上、本システムでは、光位相変調器 5 C の遮光機能をオンすることにより、 ± 1 次回折光からなる構造化照明（すなわち 2 光束構造化照明）を実施することができる。

[0082] よって、本システムでは、この 2 光束構造化照明のパターンを切り換えながら複数の画像データを取得することにより、標本 10 の面内方向に亘る超解像画像（すなわち 2 次元超解像画像）の生成が可能となる。以下、2 次元超解像画像を生成するための本システムのモードを「2 次元モード」と称す。

[0083] さらに、本システムでは、光位相変調器 5 C の遮光機能をオフすることにより、 ± 1 次回折光及び 0 次回折光からなる構造化照明（すなわち 3 光束構造化照明）を実施することができる。

[0084] よって、本システムでは、この 3 光束構造化照明のパターンを切り換えながら複数の画像データを取得することにより、標本 10 の面内方向及び光軸方向に亘る超解像画像（すなわち 3 次元超解像画像）を生成することができる。以下、3 次元超解像を生成するための本システムのモードを「3 次元モード」と称す。

[0085] 以下、3 次元モードを詳しく説明する。なお、ここでは上述した 2 次元モードとの相違点のみを説明する。

[0086] 3 次元モードにおいて標本 10 へ投影される 3 光束構造化照明は、 ± 1 次回折光及び 0 次回折光の 3 光束からなるので、標本 10 の面内方向にかけて構造化されているだけでなく、光軸方向にかけても構造化されている。しかも、標本 10 の面内における 3 光束構造化照明のパターンは、標本 10 の面内における 2 光束構造化照明のパターンとは若干相違する。以下、それを詳しく説明する。

[0087] 先ず、超音波空間光変調器 3 には前述したとおり超音波定在波が生起しており、その超音波定在波のパターン（＝超音波伝搬路の屈折率分布）の瞬時値は、図 7 の上段から下段に向かうとおりに時間変化している。

[0088] 図7では、超音波伝搬路の屈折率分布がフラットとなる瞬間の時刻 t を $t = 0$ とおき、屈折率分布の時間変化周期を T とおいた。因みにこの周期 T は、超音波空間光変調器3に供給される交流電圧の周波数の逆数に相当する。以下、 $t = 0 \sim T/2$ の期間を「屈折率変化の前半期」と称し、 $t = T/2 \sim T$ の期間を「屈折率変化の後半期」と称す。また、図7において丸印を付したとおり超音波伝搬路において屈折率が不変の部分を「節」と称し、屈折率の変化する部分を「腹」と称す。

[0089] ここで、図7における腹aに着目すると、屈折率変化の前半期には、腹aの屈折率は節の屈折率と比較して高くなる（媒質が密となる）のに対して、屈折率変化の後半期には、腹aの屈折率は節の屈折率と比較して低くなる（媒質が粗となる）のがわかる。

[0090] 一方、図7において腹aに隣接する腹bに着目すると、屈折率変化の前半期には、腹bの屈折率は節の屈折率と比較して低くなる（媒質が粗となる）のに対して、屈折率変化の後半期には、腹bの屈折率は節の屈折率と比較して高くなる（媒質が密となる）のがわかる。

[0091] したがって、超音波空間光変調器3を位相型回折格子とみなすと、その位相型回折格子は、図8（A）又は図9（A）に示すとおり、屈折率変化の前半期と後半期との間で位相分布が反転している。つまり、その位相型回折格子は、屈折率変化の前半期と後半期との間で格子半ピッチ分だけ横ズレしている。

[0092] ここで、2光束構造化照明は2光束干渉縞なので、2光束構造化照明の標本10上の縞本数は、図8（B）に模式的に示すとおり、それに対応する位相型回折格子の格子数の2倍であった。よって、位相型回折格子が図8（A）のとおり横シフトすると、2光束構造化照明のパターンは、図8（B）のとおり変化する。すなわち、2光束構造化照明は、屈折率変化の前半期と後半期との間で縞1ピッチ分だけ横ズレしている。

[0093] したがって、2光束構造化照明を周期 T より十分に長い期間に亘って時間積分すると、2光束構造化照明の各時点のパターンは強められ、高コントラ

ストなストライプ画像となる。この場合、2光束構造化照明は、撮像装置12によって画像化することが可能である。

[0094] 一方、3光束構造化照明は3光束干渉縞なので、3光束構造化照明の標本10上の縞本数は、図9(B)に模式的に示すとおり、それに対応する位相型回折格子の格子数の1倍となる。よって、位相回折格子が図9(A)のとおり横シフトすると、3光束構造化照明のパターンは、図9(B)のとおり変化する。すなわち、3光束構造化照明は、屈折率変化の前半期と後半期との間で縞半ピッチ分だけ横ズレしている。この事実は、3光束構造化照明のうち光軸方向位置の異なる各面について同様に当てはまる。

[0095] したがって、この状態の3光束構造化照明を周期Tより十分に長い期間に亘って時間積分すると、3光束構造化照明の各時点のパターンは打ち消し合い、コントラストの無い一様な画像（グレーの画像）となってしまう。この場合、3光束構造化照明は、撮像装置12によって画像化できない。

[0096] 本システムにおいて光位相変調器5C（図1参照）が備えられたのは、3次元モードにおけるこの問題（コントラスト低下の問題）を解決するためである。

[0097] 図10は、3次元モードに関わる制御装置19の構成を説明する図である。図10に示すとおり、制御装置19は、前述した交流電源19A-1や切り換えスイッチ19A-2の他に、電源回路19Cや位相調整回路19Dなどを備えている。

[0098] 電源回路19Cは、第1出力端子と第2出力端子とを有しており、第1出力端子は、前述した交流電圧（正弦信号）を超音波空間光変調器3の側へ供給するための端子であり、第2出力端子は、パルス電圧（パルス信号）を光位相変調器5Cの側へ供給するための端子である。

[0099] この電源回路19Cは、第2出力端子から出力されるパルス信号の周波数を、第1出力端子から出力される正弦信号の周波数と常に一致させており、制御回路19内のCPUによって正弦信号の周波数が切り換えられた場合には、パルス信号の周波数も同様に切り換える。なお、パルス信号のデューテ

ィー比（ON期間／パルス周期）は、予め決められた比率（ここでは1／2とする。）に設定されており、パルス信号の周波数に依らず不変である。

[0100] 位相調整回路19Dは、電源回路19Cと光位相変調器5Cとの間に介設されており、制御装置19内のCPUからの指示に応じて、正弦信号とパルス信号との間の位相関係を調整する。

[0101] 図11（A）は、正弦信号の波形を示す図であり、図11（B）は、パルス信号の波形を示す図である。このうち正弦信号の波形は、超音波空間光変調器3における超音波定在波の時間変化波形（すなわち腹a、bの各々の屈折率の時間変化波形）を規定しており、パルス信号の波形は、光位相変調器5Aが0次回折光に加える位相変調量の時間変化波形を規定している。

[0102] このパルス信号によると、0次回折光の位相変調量を、前述した前半期と後半期との一方において0とし他方において π とすることができる。この場合、3光束構造化照明の各時点のパターンが打ち消し合うことを回避できるので、3光束構造化照明の画像のコントラストを最大に高めることができる。

[0103] 以下、パターンの打ち消し合いが回避できる理由を詳しく説明する。説明上、0次回折光の位相変調量は、前半期において π となり、後半期に0となるものと仮定する。

[0104] 先ず、0次回折光の位相変調が行われなかった場合（光位相変調器5Cの変調機能をオフした場合）の3光束構造化照明のパターン（3光束構造化照明の位相分布）を考える。

[0105] この場合の3光束構造化照明は、図9（B）に示したとおり前半期と後半期とでパターンを反転させるので、前半期のパターンを以下の式（1）で表したならば、後半期のパターンは以下の式（2）で表される。

$$I_i(r) = I_0 + 2I + 4 \cdot \sqrt{I_0} \cdot \sqrt{I} \cdot \cos(k_x X) \cdot \cos(k_z Z) + 2 \cdot I \cdot \cos(2k_x X) \cdots (1)$$

$$I_i(r) = I_0 + 2I + 4 \cdot \sqrt{I_0} \cdot \sqrt{I} \cdot \cos(k_x X - \pi) \cdot \cos(k_z Z) + 2 \cdot I \cdot \cos(2k_x X - 2\pi) \cdots (2)$$

なお、Xは、3光束構造化照明において位相型回折格子のピッチ方向に対

応した方向の位置を示し、 Z は、3光束構造化照明の光軸方向の位置を示し、 I_0 は、0次回折光の強度を示し、 I は、 ± 1 次回折光の強度を示し、 k は、波数を示している。式(1)、(2)における第1項は、0次回折光の強度であり、第2項は、 $+1$ 次回折光の強度と -1 次回折光の強度との和であり、第3項は、 ± 1 次回折光と0次回折光との間の干渉強度分布であり、第4項は、 ± 1 次回折光同士の干渉強度分布である。式(1)と式(2)の間では、第3項のみが異なる。

[0106] 次に、0次回折光の位相変調が行われた場合（光位相変調器5Cの変調機能をオンした場合）の3光束構造化照明のパターンを考える。

[0107] この場合の3光束構造化照明は、0次回折光を変調幅 π で位相変調したことにより、前半期における0次回折光の位相が π だけ変位するので、前半期のパターンは式(1')のようになり、後半期のパターンは、式(2)のままとなる。

$$I_i(r) = I_0 + 2I + 4 \cdot \sqrt{I_0} \cdot \sqrt{I} \cdot \cos(k_x X - \pi) \cdot \cos(k_z Z) + 2 \cdot I \cdot \cos(2k_x X) \dots \quad (1')$$

つまり、0次回折光の位相変調が行われた場合の3光束構造化照明は、前半期には、式(1')のパターンとなり、後半期には、式(2)のパターンとなる。この式(1')を式(2)と比較すると、両者のパターンは互いに同じであることがわかる。

[0108] したがって、0次回折光の位相変調を行えば、パターンの打ち消し合いを回避できる。

[0109] なお、ここでは、0次回折光の位相の変位するタイミングを前半期のみとしたが、後半期のみとした場合も、同様の効果が得られることは言うまでもない。

[0110] さて、3次元モードに先立ち、制御装置19内のCPUは、標本10の代わりに一様なテスト標本が本システムへ配置された状態で、可干渉光源1、撮像装置12、位相調整回路19Dの各々を連続駆動し、撮像装置12から出力される画像のコントラストを参照しながら光強度変調器30の位相調整

量を変化させ、そのコントラストが最大となった時点（又は、そのコントラストが閾値以上となった時点）で、その位相調整量を固定する。

[0111] 図 1 2 は、超音波定在波の腹 a の屈折率の時間変化波形と、0 次回折光の位相変調量の時間変化波形とを比較する図である。図 1 2 では、腹 a の屈折率の時間変化波形を実線で示し、0 次回折光の位相変調量の時間変化波形を点線で示した。

[0112] 図 1 2 (A) に示すとおり、腹 a の屈折率の時間変化波形と 0 次回折光の位相変調量の時間変化波形との間の位相差 $\Delta \Psi$ が $\pi / 2$ の偶数倍に一致したときには、0 次回折光の位相の変位する期間が、屈折率変化の前半期と後半期との何れか一方に一致するので、3 光束構造化照明の画像のコントラストは最大となる。

[0113] また、図 1 2 (B) に示すとおり、腹 a の屈折率の時間変化波形と 0 次回折光の位相変調量の時間変化波形との間の位相差 $\Delta \Psi$ が $\pi / 2$ の偶数倍に一致していなかったとしても、その位相差 $\Delta \Psi$ が $\pi / 2$ の奇数倍に一致しない限り、3 光束構造化照明の画像は、コントラストを有する。

[0114] しかし、図 1 2 (C) に示すとおり、腹 a の屈折率の時間変化波形と 0 次回折光の位相変調量の時間変化波形との間の位相差 $\Delta \Psi$ が $\pi / 2$ の奇数倍に一致してしまうと、3 光束構造化照明の画像のコントラストは、ゼロとなる。

[0115] したがって、3 次元モードでは、腹 a の屈折率の時間変化波形と 0 次回折光の位相変調量の時間変化波形との間の位相差 $\Delta \Psi$ は、 $\pi / 2$ の奇数倍以外、望ましくは $\pi / 2$ の偶数倍に設定される。

[0116] なお、ここでは腹 a の屈折率に着目して説明したが、腹 b の屈折率の時間変化波形は腹 a の屈折率の時間変化波形を逆位相にしたものなので、腹 a の屈折率に着目した場合にも同様のことが当てはまる。

[0117] そして、3 次元モードにおける CPU は、2 次元モードにおける CPU（図 6 参照）と同様、切り換えスイッチ 19A-2 の接続先を切り換えることにより 3 光束構造化照明の方向を第 1 方向、第 2 方向、第 3 方向の間で切り

換える。

[0118] また、3次元モードにおけるCPUは、2次元モードにおけるCPU（図6参照）と同様に、3光束構造化照明の方向が第1方向、第2方向、第3方向であるときの各々において、3光束構造化照明の位相をシフトさせながら画像データを繰り返し取得する。

[0119] 但し、3次元モードでは、3光束構造化照明の構造情報を除去するための分離演算に、3光束構造化照明の位相の異なる少なくとも5つの画像データが必要である（因みに、2次元モードでは、少なくとも3つの画像データがあれば十分であった。）。

[0120] このため、3次元モードにおけるCPUは、3光束構造化照明の1ステップ当たりの位相シフト量を、例えば $2\pi/5$ とすることが望ましい。

[0121] その場合、超音波伝搬路Rへ入射する光のスポット（有効径）Sの中心から超音波伝搬路Rの一端までの距離Dを、超音波伝搬路Rの伝搬方向の長さLの $1/5$ 倍に設定すればよい（ $D=L/5$ ）。

[0122] そして、3次元モードにおけるCPUは、各方向につき、位相シフト量が $2\pi/5$ ずつ異なる5つの画像データを取得し、第1方向に関する5つの画像データと、第2方向に関する5つの画像データと、第3方向に関する5つの画像データとを、画像記憶・演算装置13へ送出する。

[0123] また、3次元モードにおける画像記憶・演算装置13は、第1方向に関する5つの画像データに基づき第1方向及び光軸方向に亘る復調画像データを取得し、第2方向に関する5つの画像データに基づき第2方向及び光軸方向に亘る復調画像データを取得し、第3方向に関する5つの画像データに基づき第3方向及び光軸方向に亘る復調画像データを取得すると、それら3つの復調画像データを波数空間上で合成してから再び実空間に戻すことにより、第1方向、第2方向、第3方向、及び光軸方向に亘る超解像画像の画像データを取得し、その画像データを画像表示装置14へ送出する。この超解像画像は、標本10の面内の3方向及び光軸方向に亘る超解像画像（3次元超解像画像）である（以上、3次元モードの説明。）。具体的な演算には、例え

ば、US 8 1 1 5 8 0 6 に開示された方法を用いることができる。

[0124] 以上、本システムでは、超音波伝搬路 R の長さ L と、スポット S の径 ϕ と、超音波伝搬路 R の一端からスポット S の中心までの距離 D とが、前述した最適な関係に設定されるので、超音波空間光変調器 3 に与える交流電圧の周波数を電氣的に切り換えるだけで、2 光束構造化照明又は 3 光束構造化照明の位相を切り換えることができる。その切り換えに要する時間は短く、電源を含む回路系の時定数込みでも 10 ms 以下に抑えられる。

[0125] したがって、本システムにおいて必要数の画像データの取得に要する時間は、2 光束構造化照明又は 3 光束構造化照明の位相を切り換えるために光学素子又は標本 10 を機械的に移動させる場合と比較して、格段に短く抑えられる。

[0126] また、本システムでは、2 光束構造化照明又は 3 光束構造化照明の位相を切り換えるために、光学素子又は標本 10 を機械的に移動させる必要が無いので、光学系周辺の構成をシンプルに抑えることができる。

[0127] また、本システムでは、1 つの音響光学媒体 15 内に角度の異なる 3 つの超音波伝搬路 R a、R b、R c を形成したので、切り換えスイッチ 19 A-1 の接続状態を電氣的に変更するだけで、2 光束構造化照明又は 3 光束構造化照明の方向を切り換えることができる。その切り換えに要する時間は短く、電源を含む回路系の時定数込みでも 10 ms 以下に抑えられる。

[0128] したがって、本システムにおいて必要数の画像データの取得に要する時間は、2 光束構造化照明又は 3 光束構造化照明の方向を切り換えるために光学素子又は標本 10 を機械的に回転させる場合と比較して、格段に短く抑えられる。

[0129] また、本システムでは、2 次元モードと 3 次元モードとの間で切り換えが可能なので、同一の標本 10 から 2 次元超解像画像と 3 次元超解像画像との双方を生成することができる。

[0130] また、本システムの 3 次元モードでは、3 光束構造化照明を生起させるための位相型回折格子として超音波空間光変調器を使用しているので、3 光束

構造化照明の画像のコントラストがゼロとなる虞（画像化ができない虞）もあったが、光位相変調器 5 C を使用し、0 次回折光の位相を、正弦信号と同じ周波数のパルス信号で変調するので、そのような問題（コントラスト低下の問題）を回避することができる。

[0131] [画像コントラスト制御に関する補足]

また、本システムの 3 次元モードでは、屈折率の時間変化波形と 0 次回折光の位相変調量の時間変化波形との間の位相差 $\Delta \Psi$ の調整を、制御装置 19 が自動で行ったが、システムのユーザが手動で行ってもよい。但し、その場合は、調整中の画像のコントラストをユーザが確認できるよう、撮像装置 12 から出力される画像を制御装置 19 がリアルタイムで画像表示装置 14 へ表示する必要がある。

[0132] また、本システムの 3 次元モードでは、パルス信号の周波数を正弦信号の周波数と一致させたが、パルス信号が正弦信号と同期していれば、パルス信号の周波数が正弦信号の周波数と一致していなくても構わない。

[0133] 例えば、パルス信号の周波数を、正弦信号の周波数の $1/N$ 倍（ N は 1 以上の整数）に設定し、パルス信号のデューティ比（ON 期間／パルス周期）を $1/(2N)$ に設定してもよい。図 13 は、 $N=3$ とした場合の例であり、図 13（A）は $N=3$ の設定下における超音波定在波の図 7 における腹 a の屈折率の時間変化波形を示しており、図 13（B）は、 $N=3$ の設定下における 0 次回折光の位相の時間変化波形を示している。

[0134] この場合、屈折率変化の 3 周期（ $3T$ ）に 1 回ずつしか 0 次回折光の位相は変位しないが、0 次回折光の位相の変位する期間の長さは、屈折率変化の半周期分（ $T/2$ ）となるので、屈折率の時間変化波形と 0 次回折光の位相変調量の時間変化波形との間の位相差 $\Delta \Psi$ を適切な値に調整し、図 13（A）、（B）に示すとおり 0 次回折光の位相の変位する期間を、屈折率変化の前半期と後半期との一方のみに一致させることで、画像コントラストを高めることができる。

[0135] なお、 N を 2 以上とした場合には、画像コントラストの高まる期間が連続

的ではなく間欠的となるので（画像コントラストの高まる期間が間欠的にしか出現しないので）、撮像素子 1 2 の駆動信号（電子シャッタの開閉タイミングを規定する信号）を前述した正弦信号に同期させることで、撮像素子 1 2 の電荷蓄積期間を、画像コントラストの高まる期間のみに制限してもよい。

[0136] この場合、電荷蓄積期間は、例えば図 1 3 (C) に示すように、位相変調周期 ($N \times T$) のうち、0 次回折光の位相の変位する期間 ($T/2$) と、その前又は後における同等期間 ($T/2$) とを合わせた期間 (T) に設定されればよい。

[0137] なお、ここでは、パルス信号のデューティ比 (ON 期間 / パルス周期) を $1/(2N)$ に一致させたが、画像コントラストが多少低下しても良い場合には、そのデューティ比は $1/(2N)$ に完全に一致していなくてもよく、 $1/(2N)$ 未満としてもよい。

[0138] 因みに、デューティ比を $1/(2N)$ 未満とした場合、0 次回折光の位相の変位する期間の長さが屈折率変化の半周期分 ($T/2$) よりも狭まるので、屈折率の時間変化波形と 0 次回折光の位相変調量の時間変化波形との間の位相差 $\Delta\psi$ を適切な値に調整し、0 次回折光の位相の変位するタイミングを、屈折率がピーク又はバレーとなるタイミングに一致させることが望ましい。

[0139] また、本システムの 3 次元モードでは、0 次回折光の位相の時間変調波形をパルス波形とし、0 次回折光の位相を 0 と π の間で急峻に変位させた（位相を切り替えた）が、その時間変調波形を正弦波形とし、0 と π との間で緩やかに変位させるだけでも一定の効果が得られる。

[0140] また、本システムの 3 次元モードでは、0 次回折光の位相の時間変化波形をパルス波形又は正弦波形としたが、0 次回折光の位相が時間変調されるのであれば、他の波形を使用してもよい。

[0141] また、本システムの 3 次元モードでは、マスク 5 A の挿入先を、超音波空間光変調器 3 から蛍光フィルタ 8 b までの光路の瞳共役面としたが、瞳共役

面から多少外れていてもよい。但し、瞳共役面に近い方が、0次回折光の入射位置と±1次回折光の入射位置との間隔が広がるので、光位相変調器5C及び補正用ブロック5C'のレイアウトの自由度が高まる点で有利である。

[0142] また、本システムの3次元モードでは、位相変調の対象を0次回折光としたが、±1次回折光としてもよい。図14は、位相変調の対象が0次回折光であるときの位相変調パターンの例であるのに対し、図15は、位相変調の対象が±1次回折光であるときの位相変調パターンの例である。

[0143] また、位相変調の対象を±1次回折光とする場合は、図16(A)に示すとおり、光位相変調器5Cの配置先は、±1次回折光の入射する領域（光軸に関して対象な2つの領域）となり、補正用ブロック5C'の配置先は、0次回折光の入射する領域（光軸近傍の領域）となる。なお、その場合は、0次回折光の光路を開閉するシャッタが別途必要となる。

[0144] また、位相変調の対象を±1次回折光とした場合、回折光の分岐方向の切り換えに対応するには、図16(A)に矢印で示すとおり、マスク5Aの全体を光軸の周りに回転可能にしておくか、例えば図16(B)に示すとおり、光位相変調器5Cの配置先を、±1次回折光の入射する領域の全体に設定しておけばよい（なお、図16(A)、(B)は、模式図であり、電極や配線などの図示も省略してある。）。

[0145] また、本システムの3次元モードでは、±1次回折光と0次回折光との間の位相差を変調するために、位相変調の対象を±1次回折光と0次回折光との何れか一方のみとしたが、双方としてもよいことは言うまでもない。その場合は、±1次回折光の入射する領域と0次回折光の入射する領域との双方に対して個別に光位相変調器5Cを配置すればよい。

[0146] なお、本システムでは回折光の位相を変調するために光位相変調器5Cを用いたが、これに限られるものではない。例えば、光位相変調器5Cの代わりに厚さが異なる屈折部材を用いることも想定範囲内であり、厚さの異なる屈折部材として、楔形や階段状のガラス部材などが挙げられる。0次回折光の入射する領域に楔形や階段状のガラス部材を配置し、所定の方にガラ

ス部材を移動させる、或いは、所定の軸を中心としてガラス部材を回転させることで、0次回折光が通過するガラス部材の厚さを周期的に変化させて、ガラス部材を通過する回折光の位相を変調することも可能である。

[0147] [構造化照明の位相シフトに関する補足]

なお、本システムの2次元モードでは、トランスデューサに与えられる交流電圧の周波数の変化パターンを、超音波定在波の波本数が $1/2$ 本ずつ変化するようなパターンとし、かつ、第1方向及び第2方向及び第3方向の各々の2光束構造化照明の位相シフトピッチを $2\pi/3$ とするために、スポット（有効径）Sの中心から超音波伝搬路の一端までの距離Dを、超音波伝搬路Rの伝搬方向の長さLの $1/3$ 倍に設定した（ $D=L/3$ ）が、これに限定されることはない。

[0148] 具体的には、超音波伝播路は、以下の条件を満たしていればよい。

[0149] 先ず、トランスデューサに与えられる交流電圧の周波数の変化パターンは、超音波定在波の波本数が $M/2$ 本ずつ変化するようなパターンであればよい（但し、 $|M|$ は1以上の整数）。

[0150] その場合、2光束構造化照明の位相シフトピッチを任意の値 $\Delta\phi$ に設定するためには、超音波伝搬路の一端からスポットSの中心までの距離Dと、超音波伝搬路の全長Lとは、 $D:L=\Delta\phi:M:2\pi$ の関係を満たせばよい。

[0151] 因みに、 $M=1$ とすれば、超音波定在波の本数が $1/2$ 本ずつしか変化しないので、その変化に起因して2光束構造化照明の縞本数に生じるズレを極めて小さく抑えることができる。

[0152] また、分離演算に使用する画像データの数kである場合は、 $\Delta\phi=2\pi/k$ とすれば、必要な画像データを確実に取得することができる。但し、 $|k|$ は3以上の整数であることが好ましい。

[0153] また、本システムの3次元モードでは、トランスデューサに与えられる交流電圧の周波数の変化パターンを、超音波定在波の波本数が $1/2$ 本ずつ変化するようなパターンとし、かつ、第1方向及び第2方向及び第3方向の各々の3光束構造化照明の位相シフトピッチを $2\pi/5$ とするために、スポッ

ト（有効径） S の中心から超音波伝搬路の一端までの距離 D を、超音波伝搬路 R の伝搬方向の長さ L の $1/5$ 倍に設定した（ $D = L/5$ ）が、これに限定されることはない。

[0154] 具体的には、超音波伝播路は、以下の条件を満たしていればよい。

[0155] 先ず、トランスデューサに与えられる交流電圧の周波数の変化パターンは、超音波定在波の波本数が $M/2$ 本ずつ変化するようなパターンであればよい（但し、 $|M|$ は1以上の整数）。

[0156] その場合、3光束構造化照明の位相シフトピッチを任意の値 $\Delta\phi$ に設定するためには、超音波伝搬路の一端からスポット S の中心までの距離 D と、超音波伝搬路の全長 L とは、 $D : L = \Delta\phi / M : 2\pi$ の関係を満たせばよい。
なお、標本面10に干渉縞を形成するためには、超音波光変調器3の超音波伝搬路 R における射出光束の通過領域（スポット）が、必ずしも超音波伝搬路 R の両端から離れた部分領域に制限されていなくてもよく、例えば、視野絞り5Bにより超音波伝搬路 R を通過した光束を絞る場合などには、超音波伝搬路 R における有効な射出光束の通過領域、すなわち、超音波伝搬路 R のうち標本面10の照明領域（観察領域、視野領域）に形成される干渉縞（構造化照明 S' ）に寄与する射出光束の通過した部分領域が、 $D : L = \Delta\phi / M : 2\pi$ の関係を満たしていればよい。

[0157] 因みに、 $M = 1$ とすれば、超音波定在波の本数が $1/2$ 本ずつしか変化しないので、その変化に起因して3光束構造化照明の縞本数に生じるズレを極めて小さく抑えることができる。

[0158] また、分離演算に使用する画像データの数 k である場合は、 $\Delta\phi = 2\pi/k$ とすれば、必要な画像データを確実に取得することができる。但し、 $|k|$ は5以上の整数であることが好ましい。

[0159] また、上述した説明では、超音波空間光変調器3におけるスポットの位置を2次元モードと3次元モードとの間で異ならせたが、この場合、モード切り換えの前後において超音波空間光変調器3の位置を移動させる必要が生じる。

[0160] そこで、本システムでは、超音波定在波の波本数を $1/2$ 本ずつ変化させることができるよう上述した正弦信号の切り換えパターンを設定しておくと共に、超音波伝搬路一端からスポット S の中心までの距離 D が $D : L = 1 : 6$ を満たすように、スポット S と超音波空間光変調器 3 との位置関係を予め調整しておくといよい。

[0161] この場合、2次元モードでは、超音波定在波の波本数を $1/2$ 本ずつ変化させることで、2光束構造化照明の位相シフトピッチを「 $2\pi/3$ 」とすることができる。

[0162] また、この場合、3次元モードでは、超音波定在波の波本数を 1 本ずつ変化させることで、3光束構造化照明の位相シフトピッチを「 $\pi/3$ 」とすることができる。

[0163] 図 17 には、 $D : L = 1 : 6$ としたときにおける超音波定在波の波本数と位相シフト量との関係を示した。

[0164] したがって、2次元モードにおける画像記憶・演算装置 13 は、図 17 において符号 a、c、e で示す 3 状態の各々で取得された 3 つの画像データを、前述した分離演算に使用すればよい。

[0165] 一方、3次元モードにおける画像記憶・演算装置 13 は、図 17 において符号 a～f で示す 6 状態の各々で取得された 6 つの画像データを、前述した分離演算に使用すればよい。

[0166] すなわち、本システムでは、スポット S と超音波空間光変調器 3 との位置関係を 2次元モードと 3次元モードとの双方に適した関係に予め調整しておくだけで、モード切り換えの前後における超音波空間光変調器 3 の移動を省くことができる。

[0167] また、本システムの音響光学媒体 15 は、3つの超音波伝搬路 R a、R b、R c をスポット S の中心に関して非対称な関係で配置していたが（図 4 参照）、例えば図 18 に示すとおり対称な関係で配置してもよい。因みに、図 4 に示す例の利点は、音響光学媒体 15 の外形の凹凸が少ないところにあり、図 18 に示す例の利点は、3つの超音波伝搬路 R a、R b、R c の環境が

完全に一致するところにある。

[0168] また、本システムでは、超音波伝播路 R a、R b、R c の長さを共通とし、トランスデューサ 18 a、18 b、18 c に与えられる交流電圧の周波数の変化パターンを共通としたが、非共通としてもよい。但し、その場合も、超音波伝搬路 R a、R b、R c の各々は、上述した条件を満たすものとする。

また、本実施形態の説明では、回折光による干渉縞の位相を変化させるために、超音波伝播路 R a、R b、R c で生起される超音波定在波の波本数（即ち、超音波定在波の波長）を所定のパターンで変化させると共に、超音波定在波の波長を変化させる方法の一つとして、超音波光変調器 3 のトランスデューサ 18 a、18 b、18 c に与えられる交流電圧の周波数を変化させることを説明したが、この方法に限られないことは言うまでもない。

[0169] 例えば、3次元モードにおいて±1次回折光と0次回折光との間の位相差を変調するために、マスク 5 A における+1次回折光の入射領域と−1次回折光の入射領域とに対して個別に光位相変調器 5 C を配置した場合（例えば、光位相変調器 5 C 及び補正用ブロック 5 C' の配置を図 19 のようにした場合）は、次のようにしてもよい。

[0170] 先ず、2次元モードでは、0次回折光を遮光し、+1次回折光に対して位相オフセット α を付与し、−1次回折光に対して位相オフセット $-\alpha$ を付与する（つまり、0次回折光に対する+1次回折光の位相オフセットと、0次回折光に対する−1次回折光の位相オフセットとを、等量反対符号に設定する。）。この状態でも、適正な2光束構造化照明を生成できる。そして、2光束構造化照明の位相を切り換える際には、前述した超音波定在波の波長を所定パターンで切り換える代わりに、位相オフセット量 α を所定パターンで切り換える。例えば、位相オフセット量 α を $2\pi/3$ のピッチで3通りに切り換えれば、2光束構造化照明の位相を $2\pi/3$ のピッチで3通りに切り換えることができる。

[0171] 一方、3次元モードでは、0次回折光を開放し、+1次回折光に対して位

相オフセット α を付与し、 -1 次回折光に対して位相オフセット $-\alpha$ を付与し、その状態から前述した変調を行う。この状態でも、適正な3光束構造化照明を生成できる（図20は、この場合の位相変調パターンを示す図である）。そして、3光束構造化照明の位相を切り換える際には、前述した超音波定在波の波長を所定パターンで切り換える代わりに、位相オフセット量 α を所定パターンで切り換える。例えば、位相オフセット量 α を $2\pi/5$ のピッチで5通りに切り換えれば、3光束構造化照明の位相を $2\pi/5$ のピッチで5通りに切り換えることができる。

[0172] なお、ここでは、2次元モードにおける位相オフセット量 α の変化ピッチと、3次元モードにおける位相オフセット量 α の変化ピッチとを個別に設定したが、共通にしてもよい。すなわち、位相オフセット量 α を $2\pi/6$ ずつ切り換えることができるようにシステムを予め構成しておき、2次元モードでは、位相オフセット量 α が0、 $2(2\pi)/6$ 、 $4(2\pi)/6$ である3状態の各々で取得された3つの画像データを前述した分離演算に使用し、3次元モードでは、0、 $2\pi/6$ 、 $2(2\pi)/6$ 、 $3(2\pi)/6$ 、 $4(2\pi)/6$ 、 $5(2\pi)/6$ である6状態の各々で取得された6つの画像データを前述した分離演算に使用してもよい。

[0173] また、上述した実施形態では、干渉縞（2光束干渉縞、3光束干渉縞）を形成するための回折光として、 ± 1 次回折光及び0次回折光の組み合わせを用いたが、他の組み合わせを用いてもよい。3光束干渉縞を形成するためには、回折次数の間隔が等間隔な3つの回折光による3光束干渉を生起させればよいので、例えば、0次回折光、1次回折光、2次回折光の組み合わせ、 ± 2 次回折光及び0次回折光の組み合わせ、 ± 3 次回折光及び0次回折光の組み合わせ、などを用いることが可能である。

[0174] なお、本明細書において開示した以下の全ての文献について参照引用する（incorporated by reference）。

1) 米国特許発明第6239909号公報

2) US 8115806

3) Proceedings of the SPIE - The International Society for Optical Engineering (2000) vol.3919, p.141-50

符号の説明

[0175] 1 : 可干渉光源、2 : コレクタレンズ、3 : 超音波空間光変調器、4 : レンズ、5 A : マスク、5 C : 光位相変調器、5 C' : 補正用ブロック、5 B : 視野絞り、9 : 対物レンズ、10 : 標本、12 : 撮像装置、13 : 画像記憶・演算装置、19 : 制御装置、14 : 画像表示装置、15、15' : 音響光学媒体、16 : 圧電体、18 : トランスデューサ、19 A : 駆動回路、19 A-1 : 高周波交流電源、19 A-2 : 切り換えスイッチ

請求の範囲

- [請求項1] 光源からの射出光束中に配置され、その射出光束を横切る方向に音波伝搬路を配した光変調器と、
- 前記音波伝搬路の媒体を振動させるための駆動信号を前記光変調器へ与えることにより、前記音波伝搬路内に音波定在波を生起させる駆動手段と、
- 前記音波伝搬路を通過した前記射出光束の少なくとも3つの回折光を干渉させ、その干渉縞を被観察物に形成する照明光学系と、
- 前記回折光の少なくとも1つの回折光の位相を所定の周期で制御する制御手段と、
- を備えたことを特徴とする構造化照明装置。
- [請求項2] 請求項1に記載の構造化照明装置において、
- 前記制御手段は、
- 前記回折光の少なくとも2つの回折光の位相差が前記被観察物において π となるように前記位相を制御することを特徴とする構造化照明装置。
- [請求項3] 請求項1又は2に記載の構造化照明装置において、
- 前記制御手段は、
- 変調信号により前記回折光の位相を変調することを特徴とする構造化照明装置。
- [請求項4] 請求項3に記載の構造化照明装置において、
- 前記制御手段は、
- 前記変調信号の周波数を、前記駆動信号が有する周波数の $1/N$ 倍に設定すると共に、前記変調信号のデューティ比を、 $1/(2N)$ 以下に設定する（但し、 N は1以上の整数）
- ことを特徴とする構造化照明装置。
- [請求項5] 請求項3又は4に記載の構造化照明装置において、
- 前記制御手段は、

前記回折光の少なくとも 1 つの回折光の光路に配置された位相変調器と、前記位相変調器を前記変調信号で駆動する駆動部とを備えることを特徴とする構造化照明装置。

[請求項6] 請求項 1 ～請求項 5 の何れか一項に記載の構造化照明装置において、
前記回折光は、0 次回折光と、 ± 1 次回折光であることを特徴とする構造化照明装置。

[請求項7] 請求項 6 に記載の構造化照明装置において、
前記 0 次回折光を基準とした前記 $+1$ 次回折光の位相を α だけオフセットすると共に、前記 0 次回折光を基準とした前記 -1 次回折光の位相を $-\alpha$ だけオフセットするオフセット手段を更に備え、
前記制御手段は、
前記 ± 1 次回折光の位相がオフセットされた状態から前記変調を行うことにより、前記干渉縞のコントラストを制御すると共に、それらのオフセットの量 α を所定のパターンで切り換えることにより、前記干渉縞の位相を切り換える
ことを特徴とする構造化照明装置。

[請求項8] 請求項 1 ～請求項 6 の何れか一項に記載の構造化照明装置において、
前記干渉縞は、
前記音波伝搬路の両端から離れた所定の部分領域を通過した前記射出光束により形成されたものであり、
前記駆動手段は、
前記音波定在波の波長を所定のパターンで切り換えることにより、前記干渉縞の位相を切り換える
ことを特徴とする構造化照明装置。

[請求項9] 請求項 8 に記載の構造化照明装置において、
前記駆動手段は、

前記音波定在波の全体の波本数が $M/2$ 本ずつ変化するようなパターンで前記音波定在波の波長を変化させることが可能であり（但し、 $|M|$ は1以上の整数）、

前記干渉縞の位相シフトピッチを $\Delta\phi$ とおくと、前記音波伝搬路の何れか一方の端部から前記部分領域までの距離 D と、前記音波伝搬路の全長 L とは、 $D:L = \Delta\phi/M : 2\pi$ の関係を満たす

ことを特徴とする構造化照明装置。

[請求項10]

請求項8又は請求項9に記載の構造化照明装置において、

前記駆動手段は、

前記光変調器へ与える前記駆動信号の周波数を所定のパターンで切り換えることで、前記音波定在波の波長を切り換える

ことを特徴とする構造化照明装置。

[請求項11]

請求項1～請求項10の何れか一項に記載の構造化照明装置において、

前記射出光束の3つの回折光を前記干渉縞に反映させる3次元モードと、前記射出光束の2つの回折光のみを前記干渉縞に反映させる2次元モードとの間で前記構造化照明装置のモードを切り換える切換手段を更に備えた

ことを特徴とする構造化照明装置。

[請求項12]

請求項11に記載の構造化照明装置において、

前記干渉縞は、

前記音波伝搬路の両端から離れた所定の部分領域を通過した前記射出光束により形成されたものであり、

前記駆動手段は、

前記音波定在波の波長を所定のパターンで切り換えることにより、前記干渉縞の位相を切り換え、

前記音波伝搬路の何れか一方の端部から前記部分領域までの距離 D と、前記音波伝搬路の全長 L とは、 $D:L = 1:6$ の関係を満たす

ことを特徴とする構造化照明装置。

[請求項13] 請求項1～請求項12の何れか一項に記載の装置構造化照明装置において、

前記超音波光変調器は、

前記射出光束の通過領域で交差した複数の前記音波伝搬路を有し、それら音波伝搬路の間で有効な音波伝搬路を切り換えることにより、前記音波定在波の方向を切り換えることが可能である

ことを特徴とする構造化照明装置。

[請求項14] 請求項1～請求項13の何れか一項に記載の構造化照明装置と、

前記照明装置で照明された被観察物からの観察光束を検出する検出器で取得された、前記音波定在波のパターンの異なる複数の状態での各々の像に基づき、前記被観察物の超解像画像を算出する演算手段を更に備えた

ことを特徴とする構造化照明顕微鏡。

[請求項15] 光源からの射出光束中に配置され、その射出光束を横切る方向に音波伝搬路を配した光変調器を用意する光変調手順と、

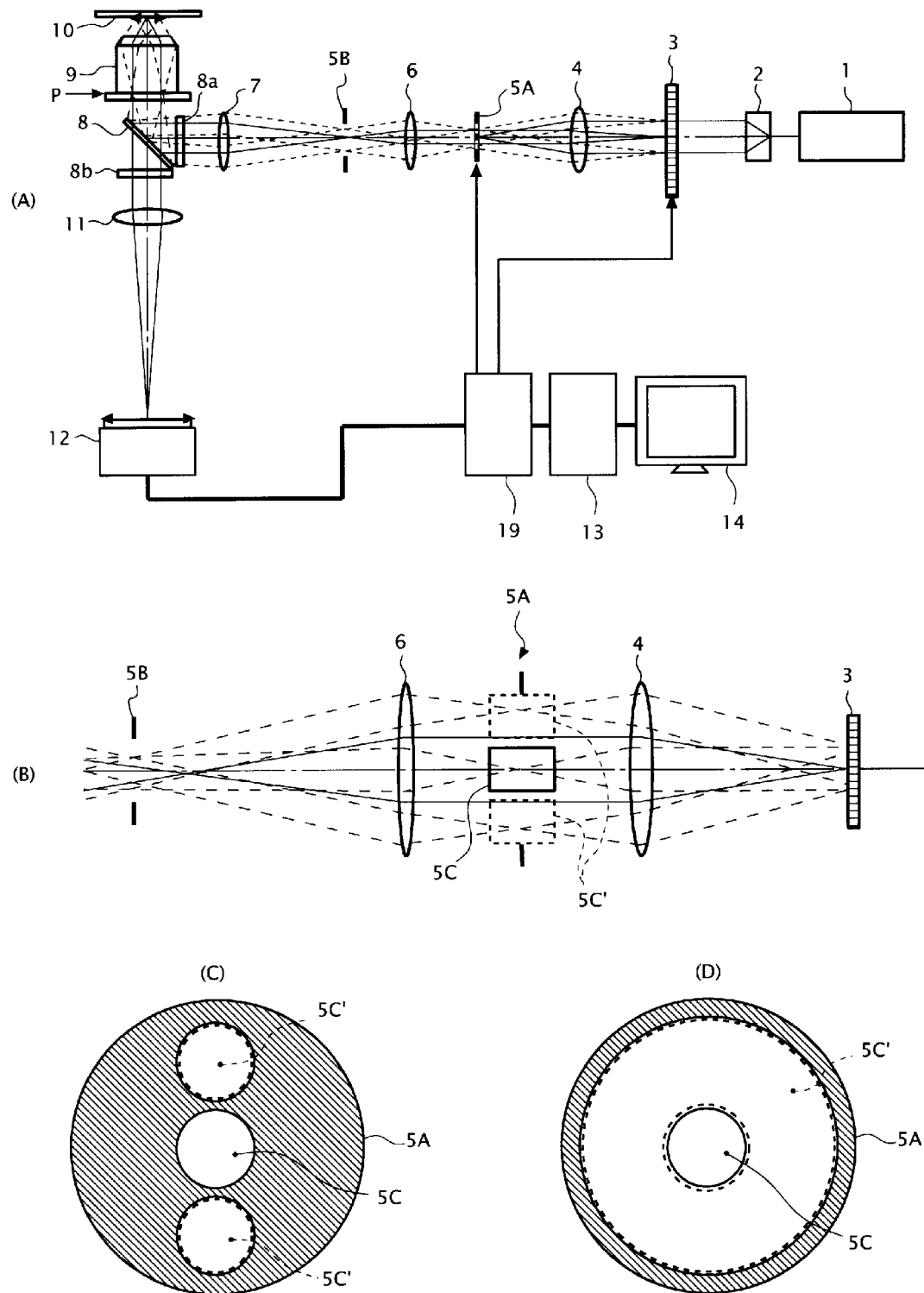
前記音波伝搬路の媒質を振動させるための駆動信号を前記光変調器へ与えることにより、前記音波伝搬路内に音波定在波を生起させる駆動手順と、

前記音波伝搬路を通過した前記射出光束の少なくとも3つの回折光を干渉させ、その干渉縞を被観察物に形成する照明手順と、

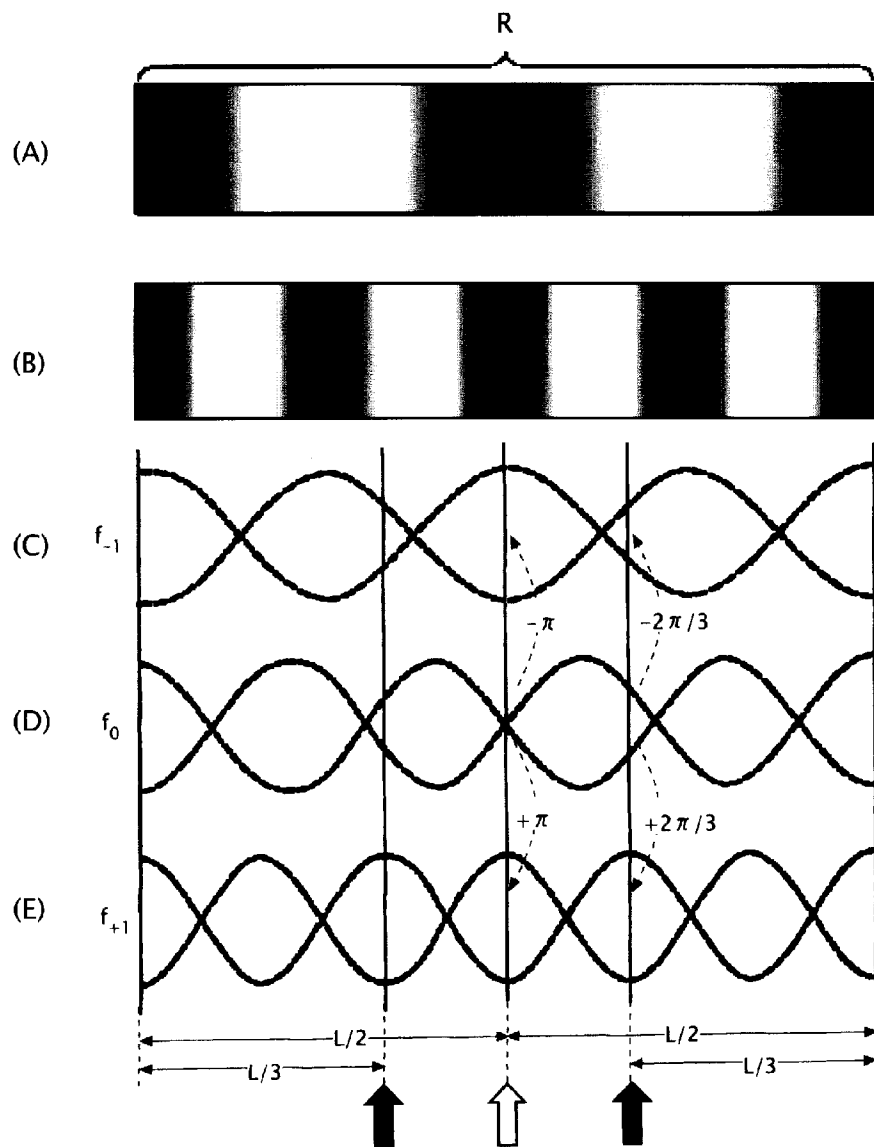
前記回折光の少なくとも1つの回折光の位相を所定の周期で制御する制御手順と、

を含むことを特徴とする構造化照明方法。

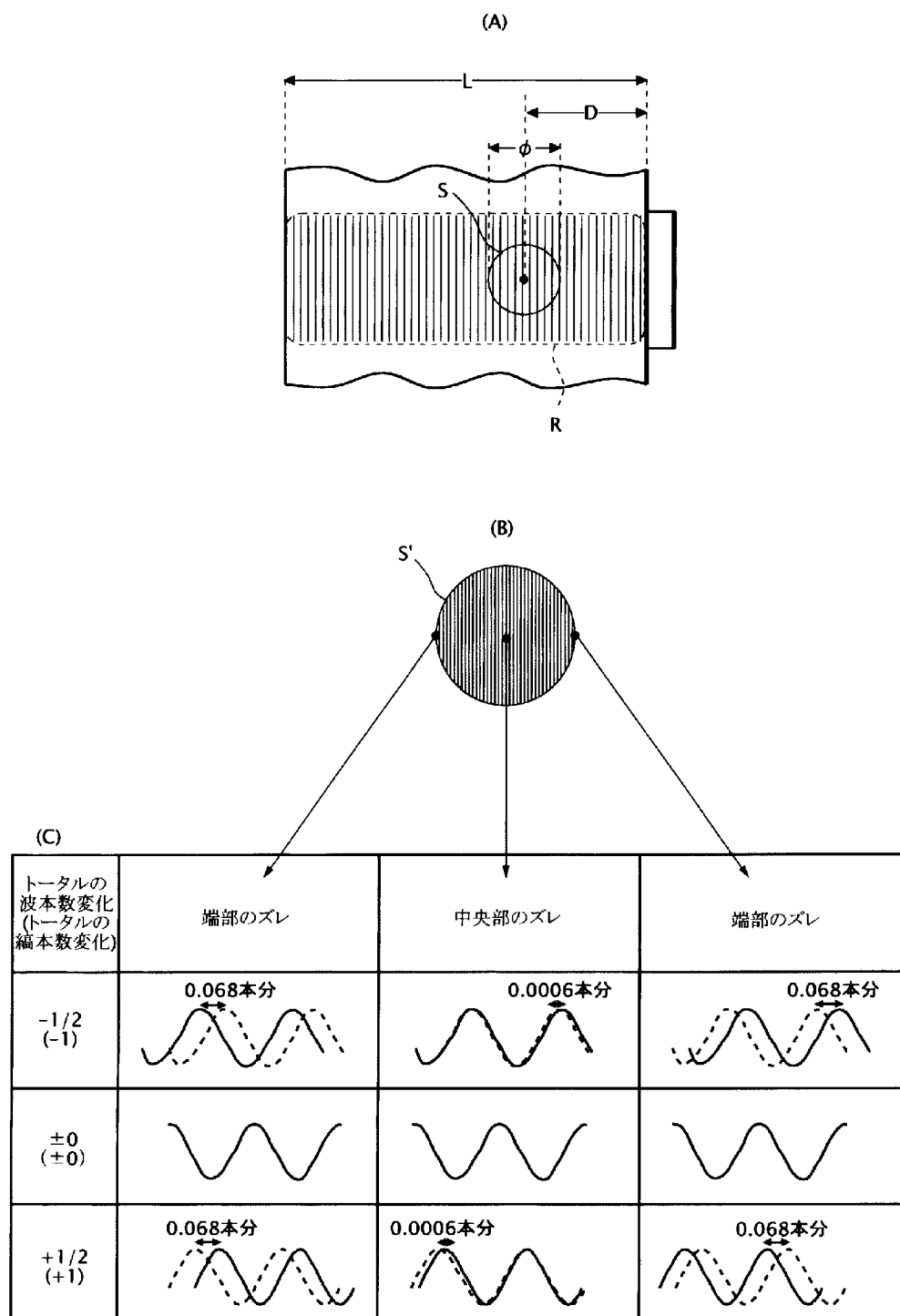
[図1]



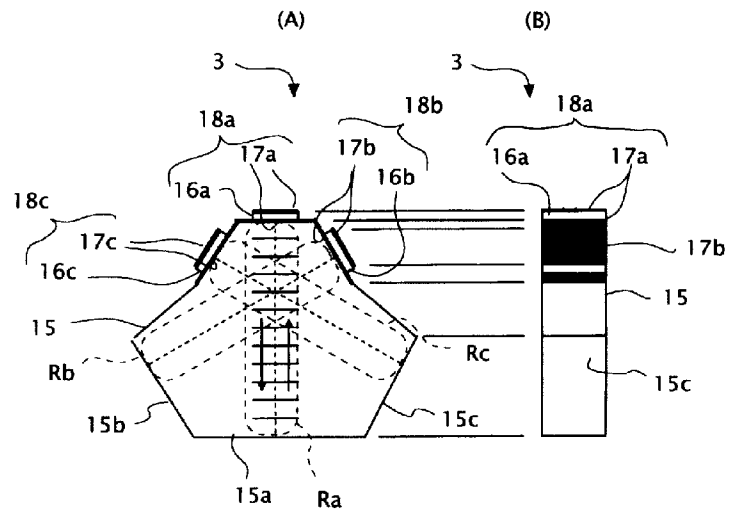
[図2]



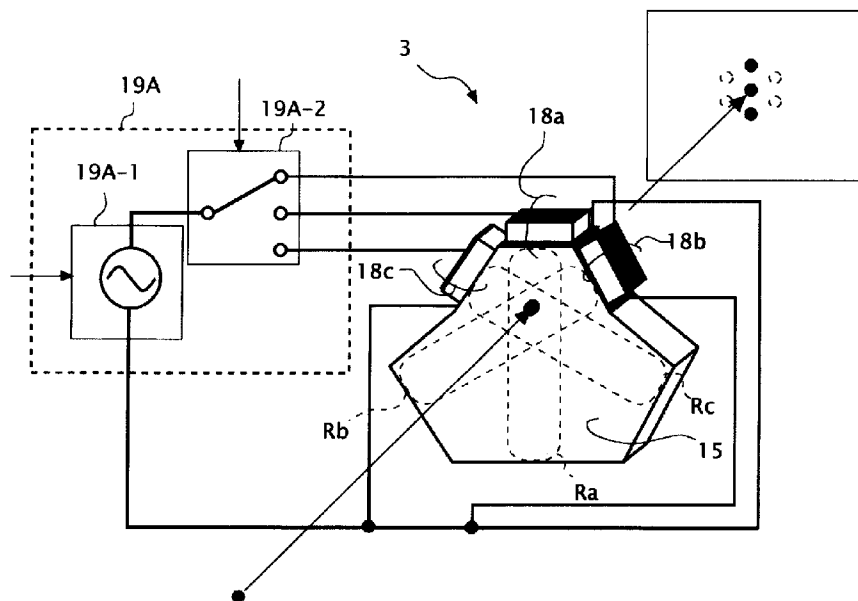
[図3]



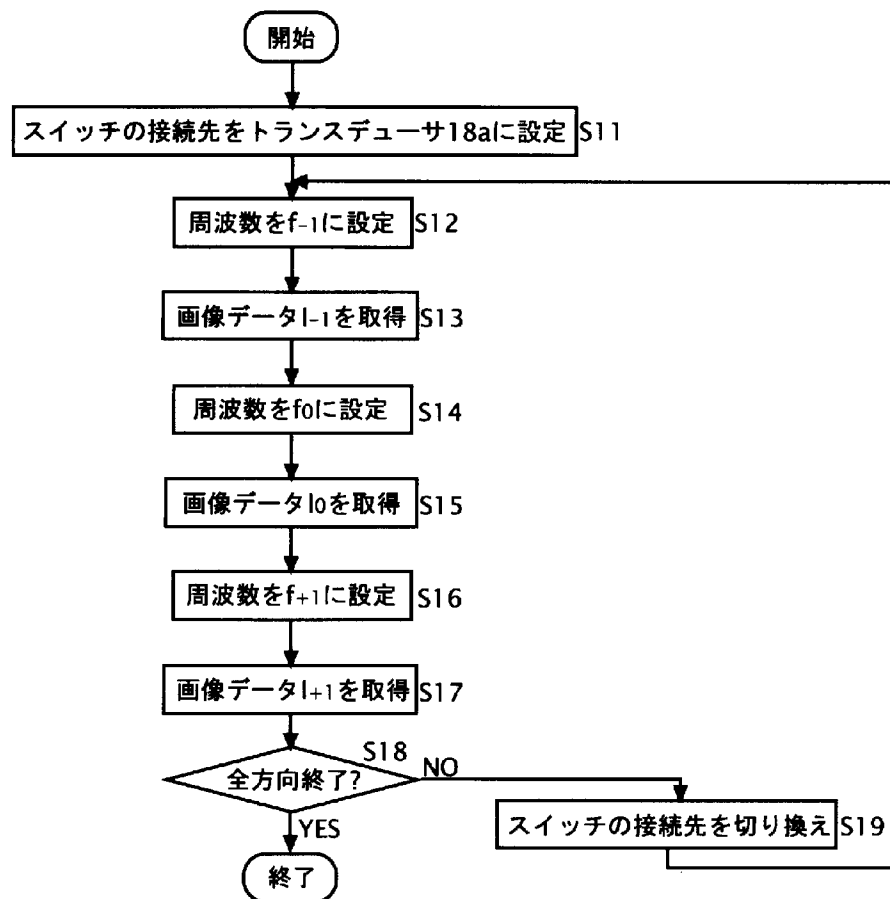
[図4]



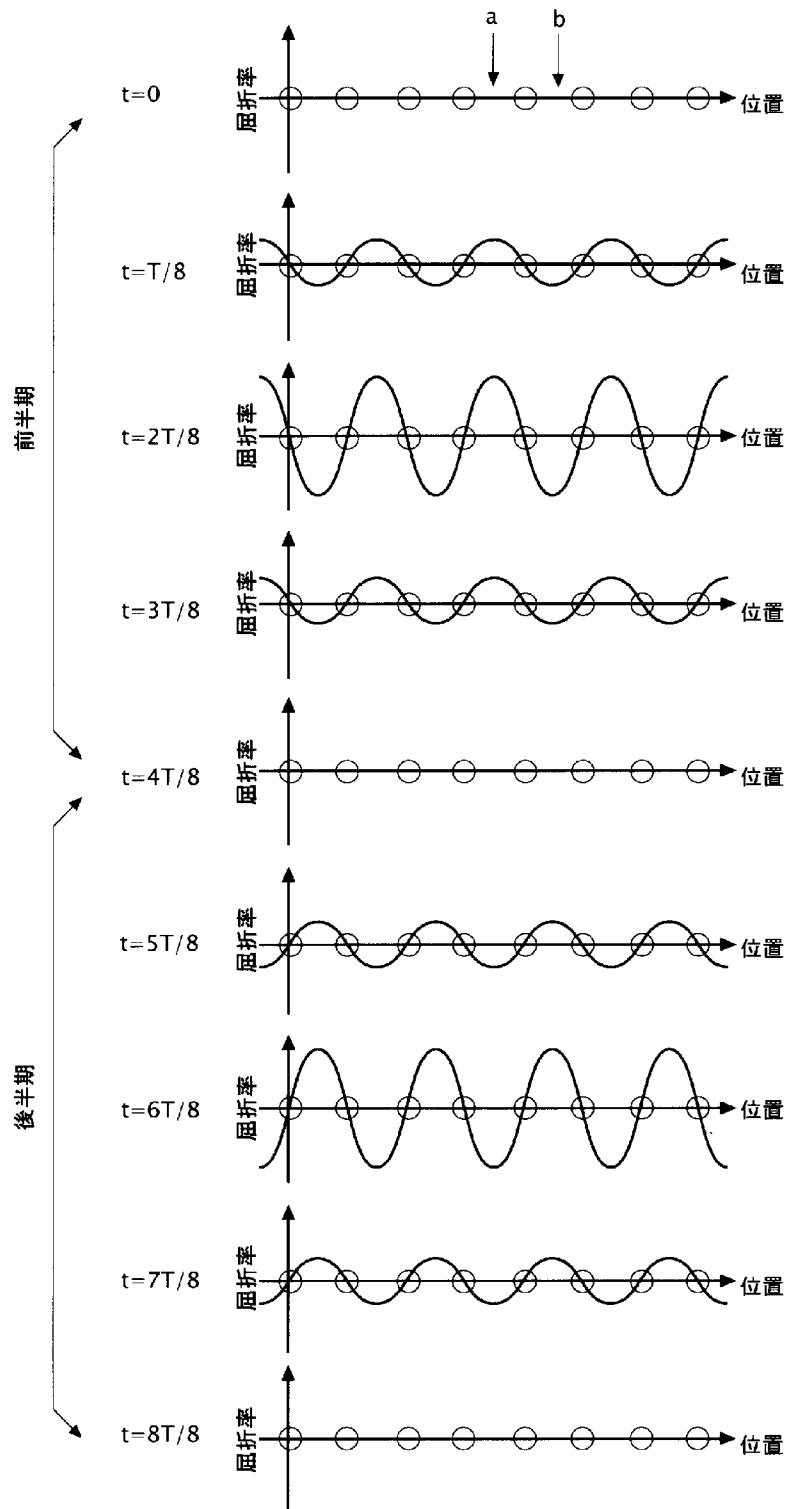
[図5]



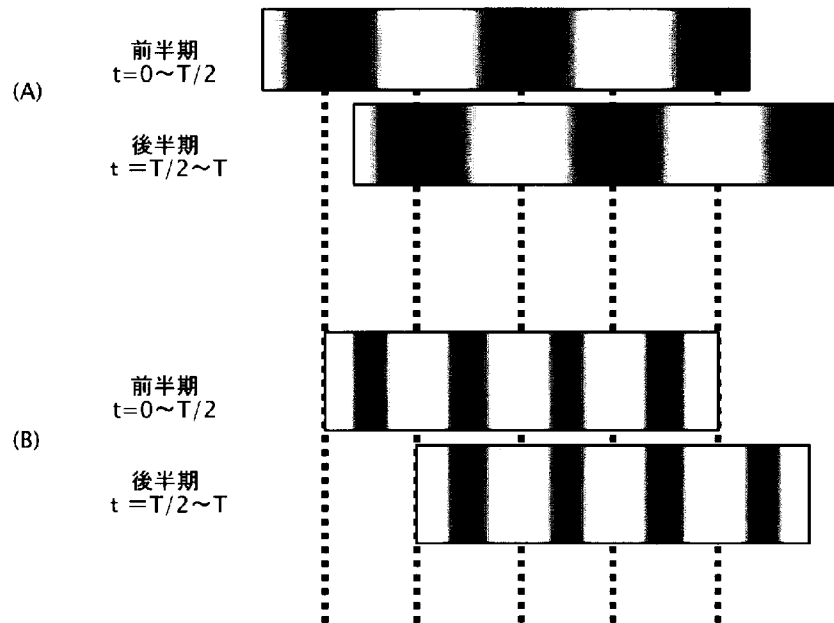
[図6]



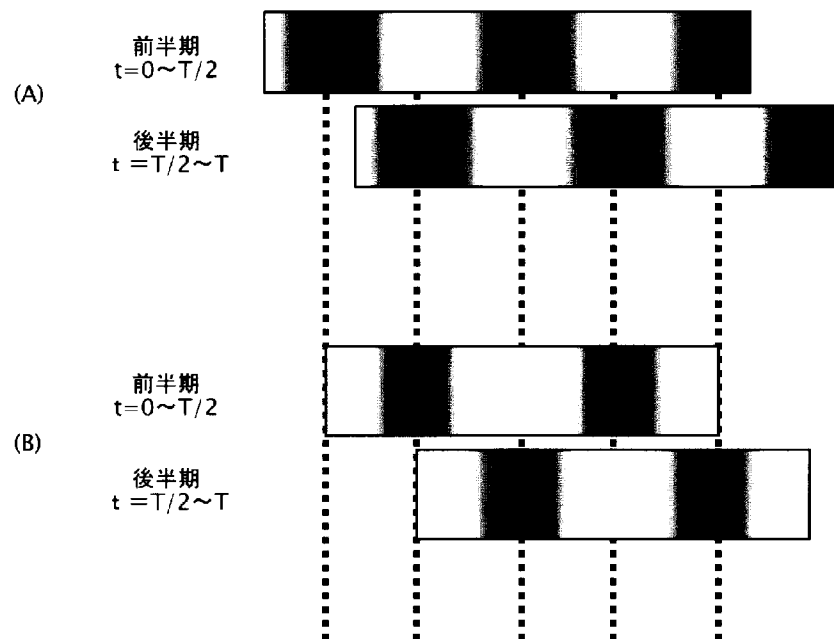
[図7]



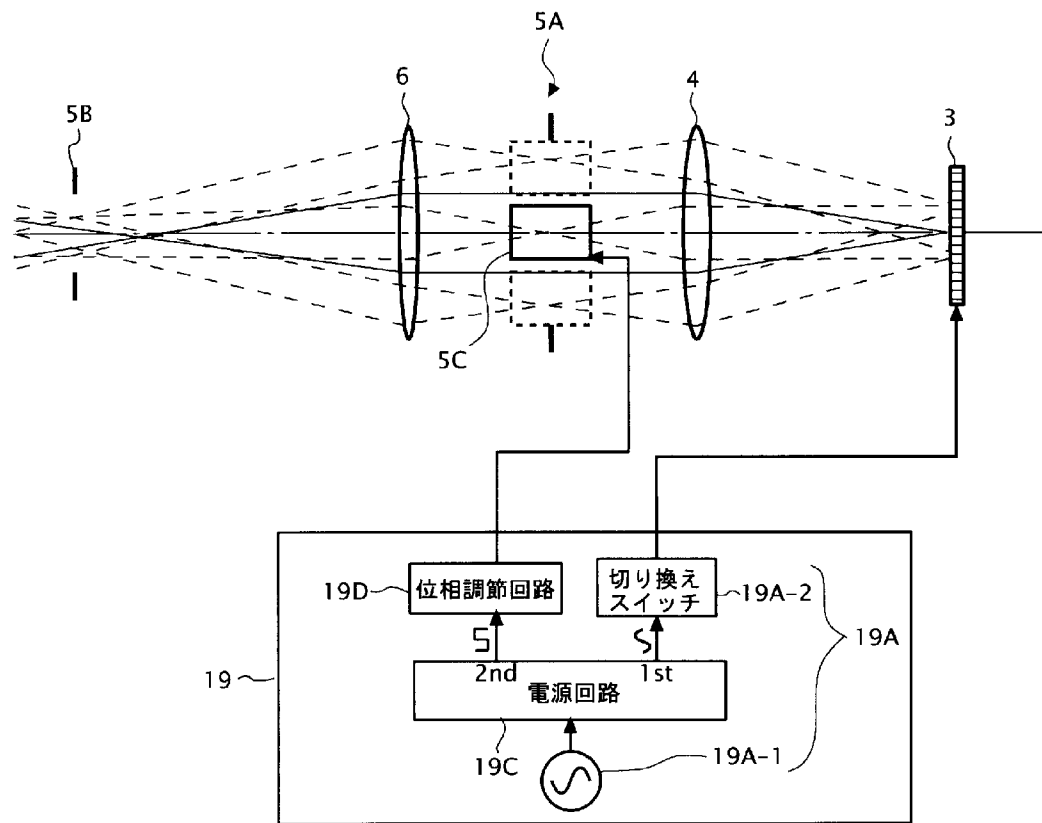
[図8]



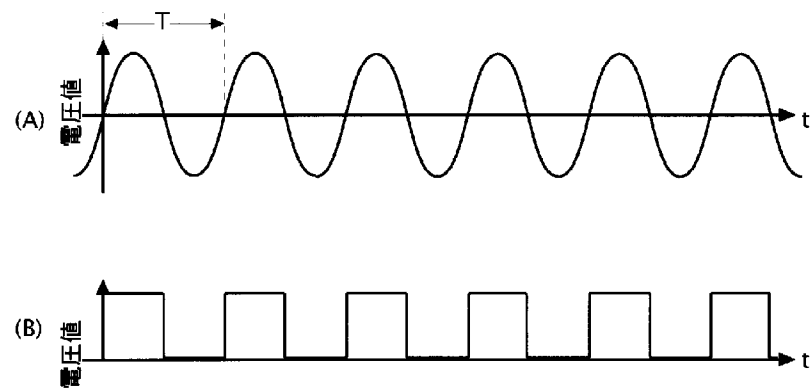
[図9]



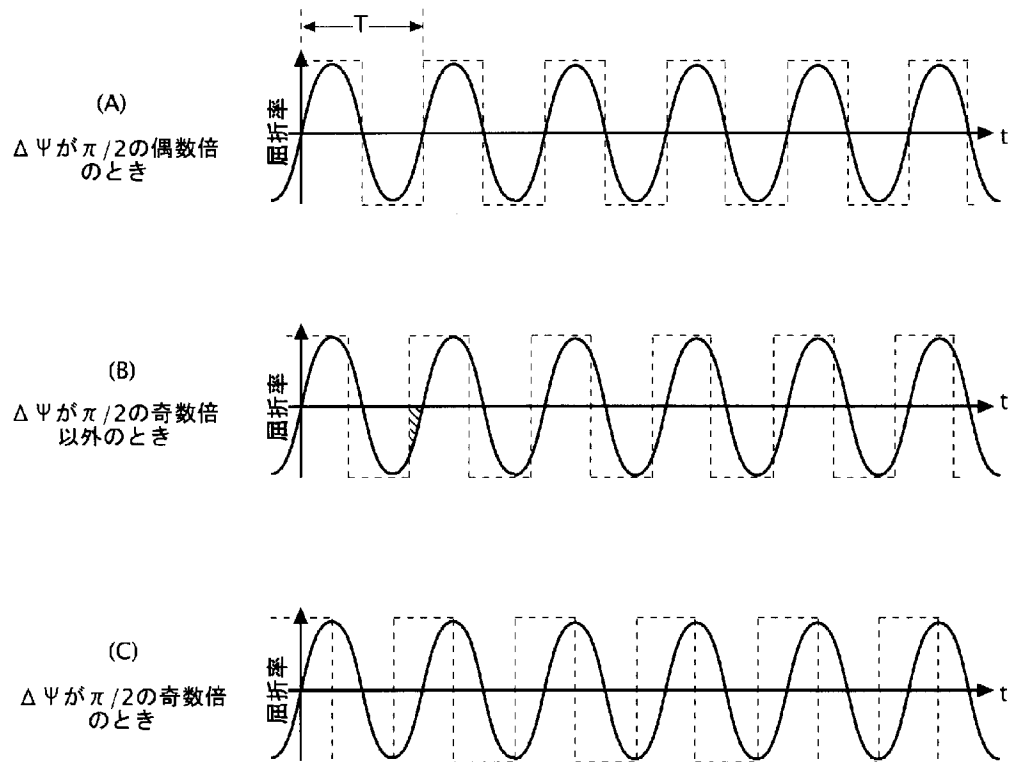
[図10]



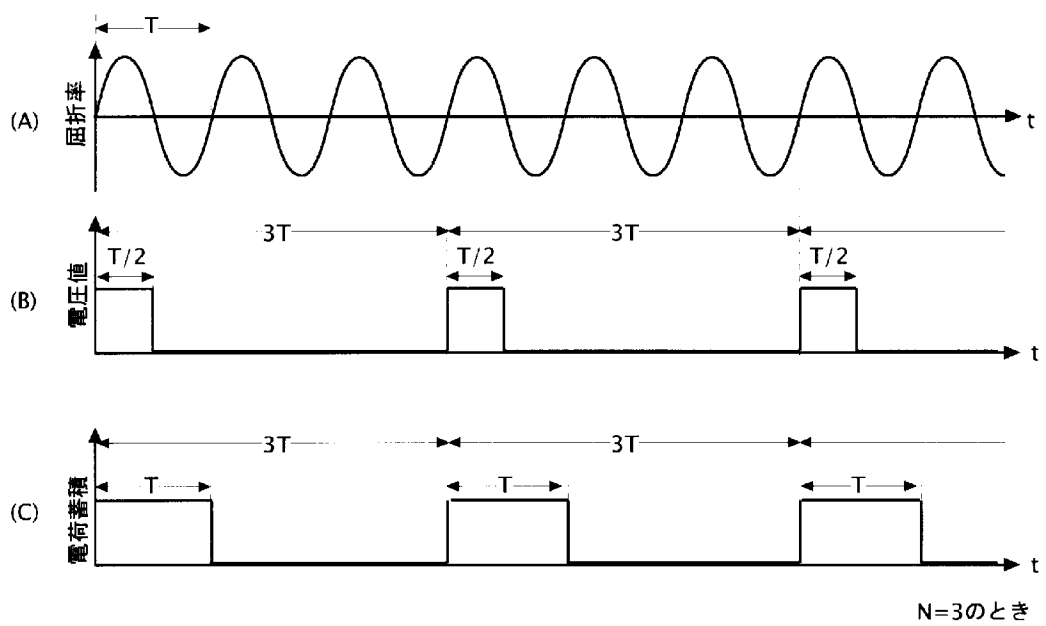
[図11]



[図12]



[図13]



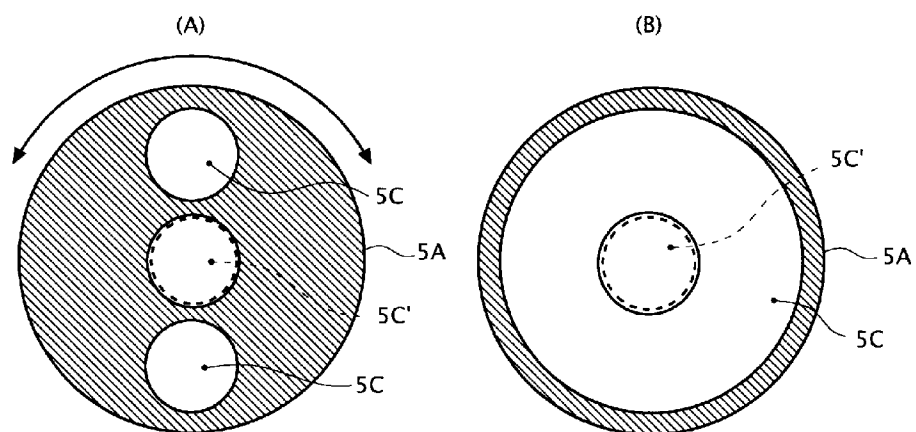
[図14]

	前半期	後半期
1次回折光	0	0
0次回折光	π	0
-1次回折光	0	0

[図15]

	前半期	後半期
1次回折光	π	0
0次回折光	0	0
-1次回折光	π	0

[図16]

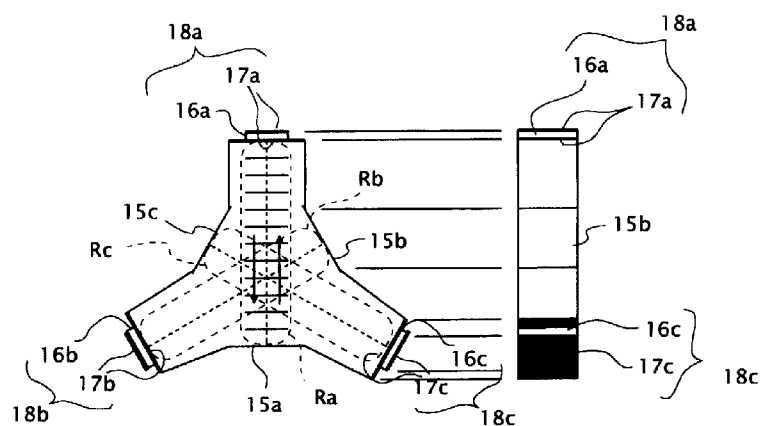


[図17]

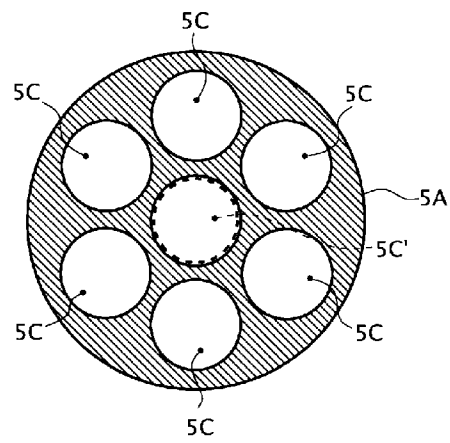
	a	b	c	d	e	f
波本数 変化量(本)	0	1/2	1	3/2	2	5/2
縞の位相 シフト量(rad)	0	$2\pi/6$	$2(2\pi)/6$	$3(2\pi)/6$	$4(2\pi)/6$	$5(2\pi)/6$

D:L=1:6

[図18]



[図19]



[図20]

	前半期	後半期
1次回折光	$\alpha + \pi$	α
0次回折光	0	0
-1次回折光	$-\alpha + \pi$	$-\alpha$

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/004548

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G02B21/06 (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)

G02B21/06

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 1996-2012

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2012 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2012

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2007-279287 A (Nikon Corp.), 25 October 2007 (25.10.2007), entire text; all drawings (Family: none)	1-15
A	JP 2007-199572 A (Nikon Corp.), 09 August 2007 (09.08.2007), entire text; all drawings (Family: none)	1-15
A	WO 2007/043313 A1 (Nikon Corp.), 19 April 2007 (19.04.2007), entire text; all drawings & US 2008/0192337 A1 & EP 1936423 A1	1-15

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"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)

"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

"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

"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

"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

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
24 September, 2012 (24.09.12)Date of mailing of the international search report
09 October, 2012 (09.10.12)Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/004548

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2010-540999 A (Carl Zeiss MicroImaging GmbH), 24 December 2010 (24.12.2010), entire text; all drawings & EP 2195696 A & WO 2009/043546 A1 & DE 102007047466 A	1-15
A	WO 2010/037487 A1 (CARL ZEISS MICROIMAGING GMBH), 08 April 2010 (08.04.2010), entire text; all drawings & JP 2012-504252 A & EP 2347294 A & DE 102008049878 A	1-15
A	JP 2008-216778 A (Nikon Corp.), 18 September 2008 (18.09.2008), entire text; all drawings (Family: none)	1-15
A	WO 2011/135819 A1 (Nikon Corp.), 03 November 2011 (03.11.2011), entire text; all drawings (Family: none)	1-15

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C））

Int.Cl. G02B21/06 (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（I P C））

Int.Cl. G02B21/06

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	1 9 2 2 - 1 9 9 6 年
日本国公開実用新案公報	1 9 7 1 - 2 0 1 2 年
日本国実用新案登録公報	1 9 9 6 - 2 0 1 2 年
日本国登録実用新案公報	1 9 9 4 - 2 0 1 2 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）

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
A	JP 2007-279287 A（株式会社ニコン） 2007. 10. 25, 全文、全図（ファミリーなし）	1-15
A	JP 2007-199572 A（株式会社ニコン） 2007. 08. 09, 全文、全図（ファミリーなし）	1-15
A	WO 2007/043313 A1（株式会社ニコン） 2007. 04. 19, 全文、全図 & US 2008/0192337 A1 & EP 1936423 A1	1-15

☒ 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

の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

2 4 . 0 9 . 2 0 1 2

国際調査報告の発送日

0 9 . 1 0 . 2 0 1 2

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（I S A / J P）
郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5
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）

菊岡 智代

2 V

2 9 1 5

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 7 1

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	JP 2010-540999 A (カール ツァイス マイクロイメージング ゲーエムベーハー) 2010. 12. 24, 全文、全図 & EP 2195696 A & WO 2009/043546 A1 & DE 102007047466 A	1-15
A	WO 2010/037487 A1 (CARL ZEISS MICROIMAGING GMBH) 2010. 04. 08, 全文、全図 & JP 2012-504252 A & EP 2347294 A & DE 102008049878 A	1-15
A	JP 2008-216778 A (株式会社ニコン) 2008. 09. 18, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-15
A	WO 2011/135819 A1 (株式会社ニコン) 2011. 11. 03, 全文、全図 (ファミリーなし)	1-15