

(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
2012年7月26日(26.07.2012)



(10) 国際公開番号
WO 2012/099220 A1

- (51) 国際特許分類:
G01B 11/24 (2006.01) G01B 9/021 (2006.01)
 - (21) 国際出願番号: PCT/JP2012/051125
 - (22) 国際出願日: 2012年1月19日(19.01.2012)
 - (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 2011-010842 2011年1月21日(21.01.2011) JP
 - (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): 兵庫県(Hyogo Prefectural Government) [JP/JP]; 〒6508567 兵庫県神戸市中央区下山手通5丁目10番1号 Hyogo (JP).
 - (72) 発明者; および
 - (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 佐藤 邦弘(SATO, Kunihiro) [JP/JP]; 〒6712201 兵庫県姫路市書写2167 兵庫県立大学 姫路書写キャンパス内 Hyogo (JP).
 - (74) 代理人: 板谷 康夫(ITAYA, Yasuo); 〒5300012 大阪府大阪市北区芝田2丁目7番18号 オークス梅田ビル新館8階 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, 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.
 - (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, MD, 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))

(54) Title: THREE-DIMENSIONAL SHAPE MEASUREMENT METHOD AND THREE-DIMENSIONAL SHAPE MEASUREMENT DEVICE

(54) 発明の名称: 3次元形状計測方法および3次元形状計測装置

【図1】

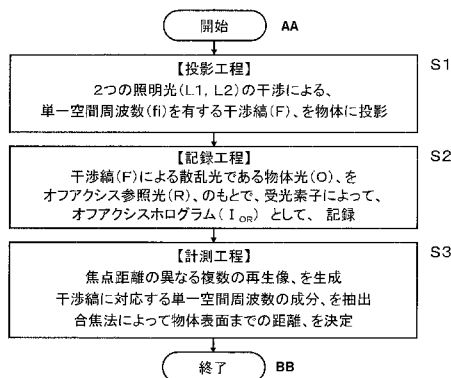


FIG. 1:
AA START
BB END
S1 PROJECTION STEP: INTERFERENCE PATTERN (F) HAVING A SINGLE SPATIAL FREQUENCY (FI) DUE TO INTERFERENCE BETWEEN TWO ILLUMINATION LIGHTS (L1, L2) IS PROJECTED ONTO THE OBJECT
S2 RECORDING STEP: OBJECT LIGHT (O), WHICH IS LIGHT DISPERSED BY THE INTERFERENCE PATTERN (F), IS RECORDED BY A LIGHT-RECEIVING ELEMENT AS AN OFF-AXIS HOLOGRAM (I_{OR}) UNDER AN OFF-AXIS REFERENCE LIGHT (R)
S3 MEASUREMENT STEP: PLURALITY OF REPRODUCED IMAGES HAVING VARYING FOCAL DISTANCES ARE GENERATED; COMPONENT OF SINGLE SPATIAL FREQUENCY CORRESPONDING TO INTERFERENCE PATTERN IS EXTRACTED; DISTANCE TO THE SURFACE OF THE OBJECT IS DETERMINED USING THE FOCUSING METHOD

(57) Abstract: A three-dimensional shape measurement method and a three-dimensional shape measurement device in which holography is used, wherein there is achieved a highly accurate three-dimensional measurement of the shape of a moving object. This measurement method comprises: a projection step for projecting an interference pattern (F) having a single spatial frequency (fi) on the surface of an object; a recording step for recording the projected interference pattern (F) as a digital hologram using a light-receiving element; and a measurement step for generating a plurality of reproduced images in which the focal distance has been changed from that of the recorded digital hologram, and deriving the distance to each point on the surface of the object through the application of a focusing method on the interference pattern (F) on each of the reproduced images. The measurement step comprises an interference pattern extraction step for extracting the component of the single spatial frequency (fi) that corresponds to the interference pattern from each of the reproduced images by spatial frequency filtering when the focusing method is applied. The interference pattern extraction step makes it possible to achieve a highly accurate measurement using the focusing method in which the effect of speckles can be reduced and the advantage of free-focus image reproduction using holography can be utilized.

(57) 要約:

[続葉有]



WO 2012/099220 A1

ホログラフィを用いる3次元形状計測方法および3次元形状計測装置において、運動物体の形状の高精度な3次元計測を実現する。本計測方法は、物体表面に単一空間周波数 (f_i) を有する干渉縞 (F) を投影する投影工程と、投影した干渉縞 (F) を受光素子によってデジタルホログラムとして記録する記録工程と、記録されたデジタルホログラムから焦点距離を変えた複数の再生像を生成し、各再生像における干渉縞 (F) に対する合焦法の適用によって物体表面の各点までの距離を求める計測工程とを備える。計測工程は、合焦法を適用する際に空間周波数フィルタリングによって各再生像から干渉縞に対応する単一空間周波数 (f_i) の成分を抽出する干渉縞抽出工程を備える。干渉縞抽出工程によって、スペックルの影響を低減でき、ホログラフィによる自由焦点画像再生の利点を生かした合焦法による高精度計測を実現できる。

明 細 書

発明の名称： 3次元形状計測方法および3次元形状計測装置

技術分野

[0001] 本発明は、デジタルホログラフィを用いた3次元形状計測方法および3次元形状計測装置に関する。

背景技術

[0002] 従来、物体の表面形状を非接触で計測する方法として、粗面物体に対する種々の光3次元計測方法が知られている。例えば、プロジェクタから対象物体上に格子パターンを投影して変形した格子像を用いるものがある。これには、格子像をモアレ像（等高線）として撮影するモアレ法、光の位相を変えて撮影するフェーズシフト法、画像内の結像位置から面状点群の空間座標を求める空間コード法などがある。さらに、対象物体上に照射したビーム光のスポットを撮影して画像内の結像位置から空間座標を求めるスポット光法、対象物体上にスリット光を照射して物体上の曲がった帯状の光の画像内の結像位置から空間座標の点列を求める光切断法などがある。この他に、物体を中心にして2方向から撮影した2つの画像を用いるステレオ法などがある。しかしながら、これらの計測法は主に静止物体を計測対象にしており、運動物体の高精度な3次元形状計測には限界がある。また、これらの方法はプロジェクタや撮影光学系（カメラ）に結像レンズを使用しており、そのため、画像の歪みや焦点ズレなどに起因する計測誤差が発生し、3次元計測の精度が制限される。

[0003] 近年、パルスレーザー光やCWレーザー光を強度変調した光を射出し、物体表面からの散乱反射光を毎秒30フレームで記録して、元の変調信号と反射して帰着した光の変調信号との位相差から対象物体までの距離を求めるTOF方式3次元距離測定カメラなどが出現している。しかしながら、その距離計測精度は1cm程度に留まっており、さらに1mm以下の精度を実現するには、光源におけるパルス化やCW波の強度変調の高速化、および信号処理回

路の高速化などが課題となっている。

[0004] また、従来から、ホログラフィを使った粗面形状の干渉計測法が研究されている。ホログラフィは物体光波面を記録して3次元空間における光波面や画像を再生する技術である。この干渉計測法は、干渉縞生成のために2枚のホログラムが必要であり、基本的には測定対象は静止物体に限られる。また、干渉計測法では、通常、干渉縞解析や位相接続が行われる。位相接続はスペックルの影響で誤差が発生しやすい。粗面形状の干渉計測ではスペックルが生じる。さらに、観察される干渉縞のコントラストは物体表面を外れると低下し、表面近くに局在する。干渉縞の位相接続においてはスペックルと干渉縞の局在とによって誤差が生じやすい。つまり、干渉計測法において必須の干渉縞解析や位相接続は、奥行きの高い物体や不連続面を持つ複雑形状物体に対して誤差が発生しやすいので、この干渉計測法は高精度3次元計測には適していない。

[0005] ところで、イメージセンサで記録した物体画像のコントラストから物体形状を求める方法として、合焦法がある。合焦法は、レンズの焦点距離を変化させながら複数の画像を記録し、記録した画像から物体表面の合焦位置（合焦点）を求めることにより、物体表面位置を求める。ところが、合焦法によって運動物体の3次元計測を行うには、焦点距離の異なる複数の画像を瞬時に記録する必要がある。そこで、マイクロ部品の動的形状計測を実現する方法として、ホログラフィによる自由焦点画像再生の利点を生かした合焦法が提案されている（例えば、特許文献1参照）。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特許第4023666号

発明の開示

[0007] しかしながら、上述した特許文献1に示される合焦法を用いる計測方法は、ミラーやレンズなどのような光を反射する部品を測定対象とするものであって、散乱光を放射する粗面物体に適用することはできない。これは、粗面

物体をレーザ光で照射するとスペックル（スペックルパターン）が発生し、スペックルがノイズとなるので、測定精度が著しく低下するという問題があることによる。従って、運動物体の形状の高精度な3次元計測方法は、従来知られていないといえる。ここで、高精度に計測できるとは、例えば、原理的に光の波長程度の精度で計測できるという意味である。一般に、物体の表面形状を非接触で計測する光3次元計測は、物体表面に標識を付加して計測点を指定する指定段階、標識を付加した表面位置を固定して記録する固定段階、標識を付加した点までの距離を求める計測段階という3段階の処理を経て行われる。TOF法では、前の2段階が連続して行われる。格子パターン、ビーム光のスポット、帯状の光などを物体表面に照射する方法では、全3段階が、順次、不連続に行われる。指定段階は、物差しをあてがう段階である。固定段階は、物差しを添えた物体の画像やホログラムを取得する段階である。計測段階は、画像やホログラム中の物差しを読み取る段階である。運動物体の高精度な3次元計測のためには、指定段階において、光の波長程度の精度の物差しであって位相接続が不要となる十分に長い物差しを用いることが必要である。さらに、固定段階において、運動物体の速度に応じた高速記録、例えば、時間差のない記録（ワンショット記録）ができること、計測段階において、スペックルの影響をなくすこと、が必要である。

[0008] 本発明は、上記課題を解消するものであって、簡単な構成により、運動物体の形状の高精度な3次元計測を実現できる3次元形状計測方法および3次元形状計測装置を提供することを目的とする。

[0009] 上記課題を達成するために、本発明の3次元形状計測方法は、物体表面に投影した干渉縞を記録したデジタルホログラムを用いて物体表面の3次元形状を計測する3次元形状計測方法において、物体表面に単一空間周波数 f_i を有する干渉縞 F を投影する投影工程と、投影工程によって物体表面に投影した干渉縞 F を受光素子によってデジタルホログラムとして記録する記録工程と、記録工程によって記録されたデジタルホログラムから焦点距離を変えた複数の再生像を生成し、各再生像における干渉縞 F に対する合焦法

の適用によって物体表面の各点までの距離を求める計測工程と、を備え、計測工程は、合焦法を適用する際に空間周波数フィルタリングによって各再生像から干渉縞に対応する単一空間周波数 f_i の成分を抽出する干渉縞抽出工程を備えることを特徴とする。

[0010] この3次元形状計測方法において、投影工程において物体表面に投影する干渉縞 F は正弦波光強度を有することが好ましい。

[0011] この3次元形状計測方法において、投影工程は、物体表面に投影する干渉縞 F を互いにコヒーレントな2つのレーザ光の干渉によって形成し、受光素子の受光面から見て物体表面の位置にかかわらず干渉縞 F の配置が一定となるように干渉縞 F を物体表面に投影することが好ましい。

[0012] この3次元形状計測方法において、記録工程は、干渉縞 F をオフアクシス参照光 R を用いるオフアクシスホログラム I_{OR} として記録することが好ましい。

[0013] この3次元形状計測方法において、計測工程は、再生用インライン参照光 L の位相 ϕ_L とオフアクシス参照光 R の位相 ϕ_R とに基づいてホログラムに空間ヘテロダイン変調を行う変調工程と、ホログラムから共役像成分を取り除くために空間周波数フィルタリングを行うフィルタリング工程とを有して、記録工程によって記録されたオフアクシスホログラム I_{OR} に対して変調工程とフィルタリング工程とをこの順またはこの逆順で行うことによりオフアクシスホログラム I_{OR} から複素振幅インラインホログラム J_{OL} を生成する複素振幅生成工程を備え、複素振幅生成工程によって生成された複素振幅インラインホログラム J_{OL} を用いて焦点距離を変えて生成される複数の再生像に対して干渉縞抽出工程を行うことが好ましい。

[0014] この3次元形状計測方法において、計測工程は、複素振幅生成工程によって生成された複素振幅インラインホログラム J_{OL} に対し、再生用インライン参照光 L の位相 ϕ_L を用いて空間ヘテロダイン変調を行うことにより再生用インライン参照光 L 成分を除去して受光素子の受光面で定義されるホログラム面における物体光波面を表す物体光複素振幅インラインホログラム g を生成

する第2変調工程と、物体光複素振幅インラインホログラム g をフーリエ変換して成る変換関数 G を求め、変換関数 G を平面波の分散関係を満たすフーリエ空間周波数 (u, v, w) を用いて平面波展開することにより所定焦点位置における波面ホログラム h を生成する平面波展開工程と、を備え、平面波展開工程によって生成された波面ホログラム h を用いて合焦点 z_p を決定することが好ましい。

[0015] この3次元形状計測方法において、記録工程は、複数の受光素子を用いて同時に複数のオフアクシスホログラム $I_{OR}(j)$ を取得し、計測工程は、各オフアクシスホログラム $I_{OR}(j)$ の各々から物体光複素振幅インラインホログラム $g(j)$ を生成すると共に、それらを互いに重ねて合成したホログラムを物体光複素振幅インラインホログラム g として用いることが好ましい。

[0016] この3次元形状計測方法において、計測工程は、平面波展開工程による波面ホログラム h をホログラム面よりも物体表面に近い焦点位置に生成し、その波面ホログラム h から測定点 $P(x_p, y_p)$ を含む微小ホログラム Δh を切り取り、微小ホログラム Δh に基づいて互いに焦点位置の異なる複数の微小ホログラム h' を生成し、それらの微小ホログラム h' を用いて合焦判定をして合焦点 z_p を決定することが好ましい。

[0017] この3次元形状計測方法において、計測工程は、微小ホログラム h' の絶対値の2乗から成る再生画像 $|h'|^2$ と窓関数 W との積を単一空間周波数 f_i を用いてフーリエ変換した関数を合焦測度 H として求め、その合焦測度 H の大きさによって合焦点 z_p を決定することが好ましい。

[0018] この3次元形状計測方法において、窓関数 W は、ガウス関数型の窓関数であることが好ましい。

[0019] この3次元形状計測方法において、計測工程は、微小ホログラム Δh の絶対値の2乗から成る再生画像 $|\Delta h|^2$ から当該再生画像 $|\Delta h|^2$ に対応する物体表面の勾配ベクトル Δ を求め、その勾配ベクトル Δ に基づいて窓関数 W の窓の大きさと向きとを調整することが好ましい。

[0020] また、本発明の3次元形状計測装置は、物体表面に投影した干渉縞を記録したデジタルホログラムを用いて物体表面の3次元形状を計測する3次元形状計測装置において、単一空間周波数 f_i と正弦波光強度とを有する干渉縞 F を互いにコヒーレントな2つのレーザ光の干渉によって形成して物体表面に投影する投影部と、投影部によって物体表面に投影した干渉縞 F を受光素子によってオフアクシスホログラム I_{OR} としてデジタルホログラムに記録する記録部と、記録部によって記録されたデジタルホログラムから焦点距離を変えた複数の再生像を生成し、各再生像における干渉縞 F に対する合焦法の適用によって物体表面の各点までの距離を求める計測部と、を備え、計測部は、各再生像から干渉縞に対応する単一空間周波数 f_i の成分を空間周波数フィルタリングによって抽出する干渉縞抽出部を備えることを特徴とする。

[0021] この3次元形状計測装置において、投影部は、物体表面に投影する干渉縞 F を、受光素子の受光面から見て物体表面の位置にかかわらず干渉縞 F の配置が一定となるように物体表面に投影することが好ましい。

[0022] 本発明の3次元形状計測方法によれば、投影像を記録したホログラムから単一空間周波数を有する干渉縞を抽出して合焦法を適用するので、スペックルによるノイズの影響を低減または除去して高精度な3次元計測を実現できる。また、本方法は、自由焦点画像を用いた合焦測度の計算から絶対距離を求めることができるので、干渉計測における干渉縞の位相飛びや干渉縞局在の問題などを回避することができ、奥行きの高い物体や不連続表面を持つ複雑形状の物体に対しても高精度な3次元計測が可能となる。

[0023] また、本発明の3次元形状計測装置によれば、上述した3次元形状計測方法による高精度な3次元形状計測を実現できる。

図面の簡単な説明

[0024] [図1]図1は本発明の一実施形態に係る3次元形状計測方法のフロー図である。

[図2]図2は同計測方法の実施に用いる光学システムの平面図である。

[図3]図3は同計測方法による干渉縞投影とホログラム取得の様子を示す同光学システムの斜視図である。

[図4]図4は同計測方法の実施に用いる干渉縞の構成を説明する平面図である。

[図5]図5(a)は同計測方法によってホログラムに記録された干渉縞画像の空間周波数スペクトルの例を示す周波数分布図であり、図5(b)は図5(a)における単一周波数部分を抜き出した3次元表示の周波数分布図である。

[図6]図6は参照光のホログラムを取得する様子を示す同光学システムの平面図である。

[図7]図7は光学システムの他の例を示す平面図である。

[図8]図8は同光学システムにおいて参照光のホログラムを取得する様子を示す平面図である。

[図9]図9は同計測方法における計測工程のフロー図である。

[図10]図10は同計測工程におけるホログラム変換工程のフロー図である。

[図11]図11(a)は同計測工程におけるホログラム変換工程の他の実施形態を説明するブロック図であり、図11(b)は図11(a)の変形例を示すブロック図である。

[図12]図12は同計測工程における合焦反復工程のフロー図である。

[図13]図13は同計測方法における他の実施形態に係る計測工程を説明する斜視図である。

[図14]図14は同計測工程における合焦反復工程のフロー図である。

[図15]図15は同計測工程における他の実施形態に係る合焦法工程のフロー図である。

[図16]図16はさらに他の実施形態に係る3次元形状計測方法および装置を説明するための受光素子と物体との関係を示す平面図である。

[図17]図17は同計測方法を説明するためのホログラムと再生像との関係を示す平面図である。

[図18]図18は本発明の一実施形態に係る3次元形状計測装置のブロック構成図である。

[図19]図19(a)は本発明の3次元形状計測方法および3次元形状計測装置を用いて取得された干渉縞の画像であり、図19(b)は同画像に撮像された物体の配置を示す斜視図である。

[図20]図20は図19(a)における画像領域3cの拡大画像である。

[図21]図21は図20における画像領域3eの拡大画像である。

[図22]図22は図21の画像の2次元空間周波数の分布を示す3次元表示スペクトル図である。

[図23]図23は合焦測度が焦点からの位置に対して変化する様子の一例を示すグラフである。

[図24]図24は図20の干渉縞画像を与えるホログラムから本発明の計測方法を用いて計測された平面物体までの距離の変化図である。

発明を実施するための形態

[0025] 以下、本発明の3次元形状計測方法および3次元形状計測装置（以下、計測方法、計測装置などともいう）について、図面を参照して説明する。図1～図12は本発明の一実施形態に係る計測方法および装置を示す。図1のフローチャートに示すように、本発明の計測方法は、物体表面に投影した干渉縞Fを記録したデジタルホログラムを用いて物体表面の3次元形状を計測する方法であり、投影工程(S1)と、記録工程(S2)と、計測工程(S3)とを備えている。投影工程(S1)では、2つの照明光L1, L2の干渉によって生成される単一空間周波数 f_i を有する干渉縞Fを物体に投影する。記録工程(S2)では、干渉縞Fの散乱光である物体光Oを、オフアクシス参照光Rのもとで受光素子によって、オフアクシスホログラム I_{OR} として記録する。計測工程(S3)では、記録工程(S2)で記録したオフアクシスホログラム I_{OR} に基づいて焦点距離の異なる複数の再生像を生成し、再生像から干渉縞Fに対応する単一空間周波数の成分を抽出し、合焦法によって物体表面までの距離を決定する。投影工程(S1)と記録工程(S2)と

は、例えば、図2に示す光学システムを用いて実施され、計測工程(S3)は、計算処理によって実施される。この計測方法は、ホログラフィによって自由焦点画像を再生できるという利点を生かした合焦法による計測方法に、スペックルの影響を回避するための単一空間周波数成分の抽出処理を組み合わせたものである。以下では、図2～図8によって投影工程(S1)と記録工程(S2)とを詳細説明し、その後、図9～図12によって計測工程(S3)を詳細説明する。

[0026] (光学システム)

図2に示すように、本計測方法に用いる光学システム10は、単色のコヒーレント光源であるレーザ2と、レーザ2からのレーザ光を照明光L1, L2と参照光Rとに成形して投射するためのレンズ21等から成る光学素子群と、受光素子4(イメージセンサ)と、レーザ2と受光素子4とを制御するコンピュータ5と、を備えている。受光素子4は、図中に示した座標軸z方向に受光面を向けて配置される。受光素子4の中央z方向前方(撮像軸上)には、3次元形状を計測する対象となる物体3が配置される。また、直交座標系xyzのxy方向は、矩形の受光素子4の各辺に沿って定義されている。また、x方向とz方向とを水平方向として例示しているが、光学システム10は、一般に任意の姿勢で使用することができる。

[0027] 照明光L1用の光学素子群は、レーザ2からの光路に沿って、レンズ21, 22、ビームスプリッタBS1、ミラーM1、ビームスプリッタBS2、ミラーM2、レンズ23、およびプリズム20を備えて構成されている。照明光L2用の光学素子群は、前記ビームスプリッタBS2によって分岐された他の光路に沿って、ミラーM3、レンズ24、および前記プリズム20を備えて構成されている。レンズ21, 22は、レーザ光を径の大きな平行光に拡径する。ビームスプリッタBS1は、レーザ光を照明光L1, L2用と参照光R用とに分岐する。ビームスプリッタBS2は、レーザ光を2つの照明光L1, L2に分岐する。レンズ23, 24は、平行光を球面波光にする。プリズム20は、受光素子4の視野から外れた下方位置(図3参照)に、

頂角を物体方向（照射方向）に向けて配置され、その頂角を挟む反射面によって、レンズ23、24からの光を反射して、照明光L1、L2として物体3に向けて投射する。参照光R用の光学素子群は、前記ビームスプリッタBS1によって分岐された他の光路に沿って、ミラーM4、M5、およびレンズ25を備えて構成されている。レンズ25は、平行光を球面波光にして受光素子4の受光面に向けて投射する。

[0028] （投影工程S1）

図2、図3に示すように、球面波照明光L1、L2は互いに重なり、照明光L12となって、物体3を照明する。球面波照明光L1、L2は、球面波の中心から十分遠方において平面波PW1、PW2と見做すことができる。図4に示すように、2つの平面波PW1、PW2が重なって干渉すると、3次元空間において一様に分布した干渉パターンが現れる。この干渉パターンは、例えば、2つの平面波PW1、PW2の波数ベクトル（ k_1 、 k_2 とする）の合成波数ベクトル（ k_{12} とする）に直交する平面内において単一空間周波数（ f_i とする）を有する干渉縞Fとなる。また、このような干渉パターンの照明光L12を物体に投光し、その物体表面での拡散光を合成波数ベクトル k_{12} の方向から観測すると、物体表面における位置にかかわらず、一方向において明暗が一様に変化する干渉縞Fが観測される。図2、図3の光学システム10の構成の場合、受光素子4から見てy方向の明暗模様（縦縞模様）がx方向（横方向）に単一空間周波数 f_i で繰り返される干渉縞Fが観測される。

[0029] ここで、「干渉縞F」と「物体表面に干渉縞Fを現出させる干渉パターンを有する照明光L12」とを同一視し、さらに、「物体表面に干渉縞Fを投影する」とは「照明光L12を物体に投光して物体表面に干渉縞Fを現出させる」ことである、とする。これらの前提のもとで、投影工程（S1）は、物体表面に投影する干渉縞Fを互いにコヒーレントな2つのレーザ光、すなわち球面波照明光L1、L2の干渉によって形成し、受光素子4の受光面から見て物体表面の位置にかかわらず干渉縞Fの配置が一定となるように物体

表面に投影する工程である。言い換えると、受光素子4で撮像した干渉縞Fは、物体形状によって湾曲されることなく一定間隔の縞模様となる。光学システム10は、このような投影工程(S1)を実行可能とするように、受光素子4の撮像軸と照明光L12の波数ベクトル k_{12} とが同一平面内に含まれる配置とされている。なお、プリズム20の配置は、図3に示した受光素子4の下方ではなく、上方とすることもできる。また、プリズム20を頂角方向軸周りに 90° 回転して、受光素子4の横すなわち左または右に配置したり、その他の、受光素子4の周辺の任意の位置に配置することもできる。横配置の場合は、干渉縞Fの向きは横向きとなり、対角位置配置の場合は、干渉縞Fの向きは斜め向きとなる。

[0030] また、単色のコヒーレント光源であるレーザ2からのレーザ光である球面波照明光L1, L2は、通常、正弦波光強度を有しており、従って、これら光の干渉による干渉縞Fは正弦波光強度を有する。このような干渉縞Fを用いることにより、干渉縞Fの空間周波数を純度の高い単一空間周波数 f_i とすることができる。この、周波数 f_i の大きさは、照明光L1, L2の波数ベクトル k_1, k_2 の交差角度を調整することによって設定することができる。ここで、単一空間周波数 f_i の設定についてさらに説明する。球面波照明光L1, L2の中心に点光源を想定し、受光素子4の受光面がそれらの点光源と同じz方向位置に垂直に配置されているとする(図2、図4におけるz方向位置ずれは無視される)。さらに、点光源間の距離T、受光素子4のx方向幅D、レーザ2による光の波長 λ の記号を用いる。すると、点光源から十分遠い距離z(すなわち $T \ll z$)離れた平面上における再生像のxy方向の分解能 δ は $\delta = (z/D)\lambda$ となる。また、干渉縞Fの縞間隔 α は $\alpha = (z/T)\lambda$ となり、この縞間隔 α は、点光源の間隔Tを変化させることにより、容易に調節することができる。また、干渉縞Fを記録再生して形状計測に用いるためには各干渉縞Fを識別して認識する条件として、条件 $\delta < \alpha$ 、従って $(z/D)\lambda < (z/T)\lambda$ であるから、 $D > T$ を満たす必要がある。つまり、点光源間の距離Tを受光素子4の幅Dよりも小さく設定する必

要がある。

[0031] また、物体表面に投影した干渉縞Fを有効に利用するためには、干渉縞Fが明暗の干渉縞として適切に観測され、記録される必要がある。つまり、干渉縞Fの明暗変化が弱いと、投影した干渉縞Fをうまく記録し再生することができなくなる。例えば、金属やガラスのように光を反射する物体や、プラスチックや生体のように物体内に光が侵入して拡散する物体などを、3次元形状計測の対象物とする場合、そのままでは干渉縞Fを適切に記録できないので、物体表面で散乱される散乱光強度を強くするなどの処置が必要である。このような物体に対しては、物体表面において照明光を散乱させるために、例えば、高屈折率かつ低光吸収率の酸化チタンのような粉末を物体表面に塗布すればよい。このような反射面の粗面化によって照明光の散乱をより効果的に行うと、より高周波側の空間周波数を有する干渉縞Fのホログラムを記録することが可能になる。表面が適切に粗くて、干渉縞Fを適切に観測できる粗面物体の場合には、この粉末塗布のような処理は不要である。

[0032] いずれにしても、本計測方法は、粗面の物体表面に投影した干渉縞Fの再生像を用いるものである。このような粗面の物体表面をコヒーレントなレーザー光で照射すると、物体表面の凹凸によってスペックルが不可避免的に発生する。スペックルは、物体表面で散乱された光が相互に干渉することにより、光強度がランダムに変化して発生する明暗パターンであり、広い空間周波数帯域幅を有している。ホログラフィを使った粗面物体の3次元形状計測では、このスペックルの影響を低減しなければ、測定精度が著しく低下する。

[0033] 図5(a)は、単一空間周波数 f_i を有する干渉縞Fを記録したホログラムによる再生画像から求めた空間周波数分布を示す。この図は、図3に示したように、 y 軸方向の干渉縞が x 軸方向に一定間隔で、すなわち、単一空間周波数 f_i で並んでいる干渉縞Fを、一様な拡散面に投影した場合の再生画像における空間周波数分布である。この分布図は、一般的な再生画像における x y 方向の空間周波数(f_x, f_y)において、 $f_x = f_i, f_y = 0$ である場合の図に相当する。この図から分かるように、再生画像は、干渉縞F

に起因する空間周波数 f_i , $-f_i$ の2つの交流成分 S_P , S_N と周波数 0 の直流成分 S_0 、および、散乱光の相互干渉に起因する広い周波数帯を持つスペックル S_S が重なった画像である。そこで、図5 (b) に示すように、ホログラムに記録した干渉縞 F の再生画像に対して、後述する処理を行うことにより、空間周波数 f_i の交流成分 S_P のみを $(\Delta f_x, \Delta f_y)$ の狭い範囲で (具体的には、例えば、ピーク値のみを) 取り出して、低強度で広く分布したスペックルのスペクトル成分の影響を低減または除去することができる。このようなフィルタリング処理が効果を奏するためには、正弦波光強度分布と単一空間周波数 f_i とを有する干渉縞 F を用いることが有効である。すなわち、物体表面に付与する画像情報として正弦波光強度分布を持つ単一空間周波数の干渉縞を物体表面に投影し、再生画像から干渉縞と同一空間周波数の成分のみを取り出す。この方法により、再生画像からスペックルの影響を除去して物体表面上に付与した画像情報のみを取り出すことができる。

[0034] 上記において、照明光 L_1 , L_2 として球面波光を用いる旨説明したが、所望の干渉縞 F を物体表面に投影できる照明光であればよく、照明光 L_1 , L_2 をそれぞれ平面波で構成してもよい。また、照明光 L_1 , L_2 として、レーザ2を光源とするレーザ光を分岐して用いる旨説明したが、レーザ2とは別途の光源を照明光 L_1 , L_2 用の光源としてもよい。この場合、照明光の波長は、レーザ2からのレーザ光の波長 λ とは独立に、任意に設定することができる。また、測定精度を落として、簡易の形状測定を行う場合には、干渉縞 F を、干渉縞ではなく、スリット光などで構成してもよい。また、干渉縞 F の光強度分布は、より純粋な正弦波光強度分布であればあるほど、よりきれいな空間周波数分布が得られて測定精度を上げることができるが、必ずしも厳密な正弦波光強度分布である必要はない。

[0035] (記録工程 S_2)

図2に戻って、記録工程を説明する。図2に示すように、参照光 R は、撮像軸に対して傾いた方向、すなわちオフアクシス方向 (軸外し方向) から受光素子4の受光面の中央に向けて照射される。受光素子4には、物体3の表

面に投影された干渉縞Fに基づく物体光Oが入射する。物体光Oは、物体3の粗面からの散乱光である。受光素子4の受光面からは、物体3と共に、規則正しくx方向に並んだ縦縞の干渉縞Fが見える。光学システム10は、受光素子4によって、物体光Oと参照光Rとの干渉像をデジタルホログラムであるオフアクシスホログラム I_{OR} として記録する。本計測方法における記録工程(S2)では、形状を計測する対象となる物体3の1つの姿勢に対して1枚のオフアクシスホログラム I_{OR} を記録すればよい。運動している物体については、運動中における必要とされる姿勢毎に1枚ずつのオフアクシスホログラム I_{OR} を記録すればよい。つまり、本計測方法では、いわゆる位相シフトデジタルホログラフィにおいて、物体の1つの姿勢に対して必要とされる、互いに位相状態の異なる複数のオフアクシスホログラムのうち1枚のホログラムだけが取得できればよい。このようなワンショット記録を行うための光学システム10は容易に構成することができる。

[0036] 次に、図6を参照して、参照光Rのデータの取得について説明する。後述する計測工程においてオフアクシスホログラム I_{OR} をインラインホログラムに変換するために、参照光Rのデータが必要である。そこで、図6に示すように、参照光Rを投射するための光学素子群と受光素子4の配置はオフアクシスホログラム I_{OR} を記録したときの状態のままとして、別途に、再生用インライン参照光Lを受光素子4に投射するための光学素子群を設定する。再生用インライン参照光Lは、参照光Rの情報をホログラムとして記録するための光である。参照光L用の光学素子部群は、ビームスプリッタBS1で分岐された光路に沿って、ミラーM1, M6, M7、およびレンズ26を備えて構成されている。レンズ26は、参照光Lを球面波に変換し、その球面波を受光素子4に投射する。光学システム10は、受光素子4によって参照光Rと再生用インライン参照光Lの干渉像をデジタルホログラムであるオフアクシスホログラム I_{LR} として記録する。これにより、オフライン参照光Rと再生用インライン参照光Lとの間の位相差をホログラムとして記録することができる。再生用インライン参照光Lは、その波長 λ は参照光Rの波長 λ

と同じであり、その光軸は、通常、受光素子4の中央正面方向とすればよい。オフアクシスホログラム I_{LR} は、受光素子4に対して投射する参照光Rの条件に変更がない限り、1回の記録で済ませることができる。すなわち、オフアクシスホログラム I_{LR} は、一定条件のもとで、物体3の各姿勢や物体3とは別の物体について記録されたオフアクシスホログラム I_{OR} に対して共用することができる。本計測方法における記録工程は、結像レンズを通さずに物体光Oをオフアクシスホログラムとしてワンショット記録するので、歪みの無い干渉縞Fの像を記録でき、再生像も歪みの無い像となる。

[0037] 図7、図8は、光学システム10の他の構成例を示す。図7に示す光学システム10は、上述の図2に示した光学システムにおける参照光R用の光学素子群を、よりコンパクトに配置したシステムである。参照光R用の光学素子群は、ビームスプリッタBS1で分岐された光路に沿って、ミラーM4、およびレンズ27、28を備えて構成されている。レンズ27、28は、図2の場合よりもより短距離で、参照光Rの径を広げる。このような構成に対応させるため、受光素子4は、受光面の向きをy軸（不図示）回りに 90° 回転すると共に移動してプリズム20の横に配置変更されている（受光軸がx方向）。また、物体光Oを 90° 反射させて、配置変更された受光素子4に入射させるため、ハーフミラーHM1が新たに導入されている。プリズム20は、受光素子4の正面位置を外した位置に配置されているので、プリズム20からの照明光L1、L2は、ハーフミラーHM1には当たらない。この光学システム10において、重要なことは、受光素子4から見て、干渉縞Fが、物体3の表面形状によらず、歪むことなく一定位置に見えることである。

[0038] 図8に示す光学システム10は、参照光Rの情報を取得するために再生用インライン参照光Lを投射する場合のシステムである。参照光L用の光学素子群は、ビームスプリッタBS1で分岐された光路に沿って、ミラーM8、M9、M10、およびレンズ29を備えて構成されている。参照光Lは、前記物体光Oと同様の方向からレンズ29を介して投射され、ハーフミラーH

M1によって反射されて、受光素子4に正面方向から入射する。これにより、参照光Rの情報がオフアクシスホログラム I_{LR} として記録される。この場合においても、参照光Rの投射条件が、一定条件のもとに保持されている限り、オフアクシスホログラム I_{LR} の記録は、一定条件の下で1回の記録で済ませることができる。従って、参照光L用の光学素子群の空間的配置の広がりには、許容できるものである。

[0039] (計測工程S3)

次に、図9、図10、図11、図12を参照して計測工程を説明する。図9に示すように、計測工程は、ホログラム変換工程(#1)と合焦反復工程(#2)とを順番に行って物体の3次元形状計測を行う工程である。最初のホログラム変換工程(#1)は、記録工程で記録した1枚のオフアクシスホログラム I_{OR} から $z=0$ における物体光波面を表す1枚の物体光複素振幅インラインホログラム g を生成する工程である。この工程は合焦法の対象となるホログラム g を準備する工程であり、計測工程における前処理工程である。次の合焦反復工程(#2)は、全体画像を表す1枚のホログラム g の各測定点毎に合焦法を適用して合焦点を求めることにより、形状計測を実質的に実行する工程である。言い換えると、ホログラム変換工程(#1)は、ワンショットデジタルホログラフィを使って正確な複素振幅インラインホログラムとして記録した投影干渉縞を、複素振幅インラインホログラムから数値計算を行って無歪画像として再生する工程である。また、合焦反復工程(#2)は、再生画像から投影干渉縞と同じ空間周波数の成分を取り出し、この成分に対して合焦法を適用してホログラム記録面から物体表面上の測定点までの距離を特定する工程であり、複数種類の処理方法を適用することができる。以下、順番にこれらの工程を詳細説明する。

[0040] (ホログラム変換工程#1)

図10に示すように、ホログラム変換工程は、複素振幅生成工程(S31)と第2変調工程(S32)とを順番に行って、オフアクシスホログラム I_{OR} を変換して複素振幅ホログラム J_{OL} を生成し、複素振幅ホログラム J_{OL} から

合焦法の対象となるホログラム g を生成する。

[0041] (複素振幅生成工程 S 3 1)

ここで、数式表現による画像記録を説明する。ホログラム画像記録には、照明光、参照光、物体光などが関与する。そこで、受光素子 4 の表面における位置座標 (x, y) および時間変数 t を用いて、物体光 $O(x, y, t)$ 、オフアクシス参照光 $R(x, y, t)$ 、および再生用インライン参照光 $L(x, y, t)$ 等と表し、それぞれ一般的な形で、下式 (1) (2) (3) のように表す。これらの光は、互いにコヒーレントな角周波数 ω の光である。各式中の係数、引数、添え字などは、一般的な表現と意味に解釈される。また、以下の各式において、位置座標 (x, y) 等の明示などは、適宜省略される。

[0042] [数1]

$$O(x,y,t) = O_0(x,y)\exp[i(\phi_0(x,y)-\omega t)] \quad (1)$$

$$R(x,y,t) = R_0(x,y)\exp[i(\phi_R(x,y)-\omega t)] \quad (2)$$

$$L(x,y,t) = L_0(x,y)\exp[i(\phi_L(x,y)-\omega t)] \quad (3)$$

[0043] 上式における物体光 O とオフアクシス参照光 R とが作る合成光の光強度 $I_{OR}(x, y)$ 、および再生用インライン参照光 L とオフアクシス参照光 R とが作る合成光の光強度 $I_{LR}(x, y)$ は、それぞれ下式 (4) (5) で表される。これらは、それぞれ受光素子 4 を用いてオフアクシスホログラム I_{OR} 、およびオフアクシスホログラム I_{LR} として記録される。

[0044] [数2]

$$I_{OR}(x,y) = O_0^2 + R_0^2 + O_0 R_0 \exp[i(\phi_0 - \phi_R)] + O_0 R_0 \exp[-i(\phi_0 - \phi_R)] \quad (4)$$

$$I_{LR}(x,y) = L_0^2 + R_0^2 + L_0 R_0 \exp[i(\phi_L - \phi_R)] + L_0 R_0 \exp[-i(\phi_L - \phi_R)] \quad (5)$$

[0045] 上式 (4) (5) において、右辺の第 1 項は物体光 O または再生用インライン参照光 L の光強度成分、第 2 項はオフアクシス参照光 R の光強度成分である。また、各式の第 3 項と第 4 項は、それぞれ物体光 O または再生用イン

ライン参照光Lがオフアクシス参照光Rによって変調されて作られる直接像成分と共役像成分とを表す。

[0046] 空間周波数フィルタリングを適用して式(4)(5)の第3項のみを取り出すと、物体光を記録した複素振幅ホログラム J_{OR} と再生用インライン参照光Lを記録した複素振幅ホログラム J_{LR} が、それぞれ下式(6)(7)のように求められる。

[0047] [数3]

$$J_{OR}(x,y) = O_0(x,y)R_0(x,y)\exp[i(\phi_O(x,y) - \phi_R(x,y))] \quad (6)$$

$$J_{LR}(x,y) = L_0(x,y)R_0(x,y)\exp[i(\phi_L(x,y) - \phi_R(x,y))] \quad (7)$$

[0048] 上述の空間周波数フィルタリングは、各式(4)(5)を周波数空間における表現にするフーリエ変換と、バンドパスフィルタによるフィルタリングと、その後の逆フーリエ変換とによって行われる。オフアクシス参照光Rとして球面波を用いると、周波数空間において、光強度成分および共役像成分から直接像成分を分離することが容易となるが、参照光Rが必ずしも球面波でなくても直接像成分を分離することができる。なお、受光素子4における画素が画素ピッチpで2次元配列されているとすると、受光素子4を用いて記録可能なホログラムの最高空間周波数帯域幅は、空間周波数 $f_s = 1/p$ となる。

[0049] 式(6)を式(7)で割ると、式(6)からオフアクシス参照光Rの振幅 R_0 と位相 ϕ_R とを取り除くことができ、再生用インライン参照光Lに対する複素振幅インラインホログラム J_{OL} が下式(8)のように求められる。この割り算の処理は、空間ヘテロダイン変調の処理であり、複素振幅オフアクシスホログラム J_{OR} から参照光R成分(強度と位相の両方)を除去する処理となっている。

[0050] [数4]

$$J_{OL}(x,y) = (O_0(x,y)/L_0(x,y))\exp[i(\phi_O(x,y) - \phi_L(x,y))] \quad (8)$$

[0051] 上記から分かるように、オフ軸参照光Rを再生用インライン参照光Lを用いて記録した1枚のオフ軸ホログラム I_{LR} から複素振幅ホログラム J_{LR} を事前に求めておくことにより、1枚のオフ軸ホログラム I_{OR} から画像再生に必要な複素振幅インラインホログラム J_{OL} を求めることができる。

[0052] (複素振幅生成工程の変形例)

次に、図11(a)(b)を参照して、複素振幅ホログラム J_{LR} の求め方の他の例を説明する。上記式(4)の光強度 $I_{OR}(x, y)$ を電子的にオフ軸ホログラム I_{OR} として記録すると、第3項の直接像成分と第4項の共役像成分とが分離されて、それぞれ異なる空間周波数帯域に記録される。そこで、2次元空間周波数領域において、直接像成分と共役像成分とが、物体光の光強度 O_0^2 の成分と重ならないようにして3次元像をオフ軸ホログラム I_{OR} として記録したものとする。

[0053] 図11(a)に示すように、オフ軸ホログラム I_{OR} に対して空間ヘテロダイン変調を行って参照光Lに対するインラインホログラム I_H を求める。この空間ヘテロダイン変調は、式(4)の両辺に参照光R, Lの各位相の差 $(\phi_R - \phi_L)$ を有する因子 $\exp[i(\phi_R - \phi_L)]$ を乗じることによって行われる。これにより下記の式(5)に示すインラインホログラム I_H が算出される。

[0054] [数5]

$$\begin{aligned} I_H &= I_{OR} \times \exp[i(\phi_R - \phi_L)] \\ &= (O_0^2 + R_0^2) \exp[i(\phi_R - \phi_L)] \\ &\quad + O_0 R_0 \exp[i(\phi_0 - \phi_L)] + O_0 R_0 \exp[-i(\phi_0 - 2\phi_R + \phi_L)] \end{aligned} \quad (9)$$

[0055] 上記の空間ヘテロダイン変調により、式(4)の右辺第3項と第4項の光変調干渉縞から、それぞれ式(9)の右辺第2項と第3項が得られる。式(9)の右辺第2項からは直接像が再生され、第3項からは共役像が再生される。そこで、式(9)に対して空間周波数フィルタリングを行い、直接像を

記録した第2項のみを分離して取り出す。すると、像再生のための正確な複素振幅インラインホログラム J_{oL} が求められる。さらに述べると、式(9)の右辺第1項と第3項は、参照光Rおよび参照光Lの両方の位相 ϕ_R と ϕ_L を含んでいるが、第2項は参照光Lの位相 ϕ_L だけを含むものとなっている。すなわち、式(9)の右辺第2項はインライン成分のみからなり、右辺第1, 3項はオフアクシス成分を含むものである。

[0056] 上述の変換処理は、図11(a)に示すように、ホログラム I_H に対して、高速フーリエ変換 (FFT) を施してホログラム I_{HF} とし、このホログラム I_{HF} に対して、空間周波数分布の中央部を残すウィンドウによってフィルタリング処理を行ってホログラム $\langle I_{HF} \rangle$ とし、ホログラム $\langle I_{HF} \rangle$ に再度、高速フーリエ変換 (逆変換) を施して行われ、最終の複素振幅インラインホログラム J_{oL} を生成する。

[0057] なお、図11(b)に示すように、先に空間周波数フィルタリングを行って、その後に、空間ヘテロダイン変調を行っても同じ結果が得られる。すなわち、オフアクシスホログラム I_{oR} に対して、フーリエ変換、フィルタリング、逆フーリエ変換を行って、それぞれホログラム I_F , $\langle I_F \rangle$, I' が得られ、その後の空間ヘテロダイン変調Hによって、1成分の最終の複素振幅インラインホログラム J_{oL} が得られる。

[0058] (第2変調工程S32)

上記工程によって得られた複素振幅インラインホログラム J_{oL} から正確な光波面を再生するために、ヘルムホルツ方程式の厳密解である平面波を用いて物体光を展開する。そこで、まず、複素振幅インラインホログラム J_{oL} に対して、再生用インライン参照光Lの位相 $\phi_L(x, y)$ を用いる空間ヘテロダイン変調を行う。この変調を第2変調と称することにする。位相 $\phi_L(x, y)$ を用いる空間ヘテロダイン変調は、例えば、式(8)に示される複素振幅インラインホログラム J_{oL} に、 $\exp(i\phi_L(x, y))$ を乗じることで実施される。この空間ヘテロダイン変調の結果、下式(10)に示す物体光複素振幅インラインホログラム $g(x, y)$ が得られる。この物体光複素振

幅インラインホログラム $g(x, y)$ は、受光素子 4 の受光面における物体光波面、すなわち、受光面の法線方向に z 座標軸をとり、受光面の位置を $z = 0$ としたときの $z = 0$ における物体光波面を表す。

[0059] [数6]

$$g(x,y) = (O_0(x,y)/L_0(x,y)) \exp(i\phi_0(x,y)) \quad (10)$$

[0060] 以上がホログラム変換工程 (# 1) の説明である。このホログラム変換工程により、オフアクシスホログラム I_{OR} から合焦法の対象となるホログラム g が生成される。再度述べると、計測工程 (S 3) におけるホログラム変換工程 (# 1) は、複素振幅生成工程 (S 3 1) と、第 2 変調工程 (S 3 2) とを備えている。そして、複素振幅生成工程 (S 3 1) は、再生用インライン参照光 L の位相 ϕ_L とオフアクシス参照光 R の位相 ϕ_R とに基づいてホログラムに空間ヘテロダイン変調を行う変調工程と、ホログラムから共役像成分を取り除くために空間周波数フィルタリングを行うフィルタリング工程と、を含み、記録工程 (S 2) によって記録されたオフアクシスホログラム I_{OR} に対して、これらの変調工程とフィルタリング工程とをこの順またはこの逆順で行うことにより、オフアクシスホログラム I_{OR} から複素振幅インラインホログラム J_{OL} を生成する工程である。

[0061] また、第 2 変調工程 (S 3 2) は、複素振幅生成工程 (S 3 1) によって生成された複素振幅インラインホログラム J_{OL} に対し、再生用インライン参照光 L の位相 ϕ_L を用いて空間ヘテロダイン変調を行うことにより再生用インライン参照光 L 成分を除去して受光素子の受光面で定義されるホログラム面における物体光波面を表す物体光複素振幅インラインホログラム g を生成する工程である。

[0062] (合焦反復工程 # 2)

図 1 2 に示すように、合焦反復工程は、平面波展開工程 (S 3 3) と、干渉縞抽出工程 (S 3 4) と、合焦判定工程 (S 3 5) と、再生位置変更工程 (S 3 7) とを備えて、物体光複素振幅インラインホログラム g に記録され

ている物体形状を求める工程である。

[0063] (平面波展開工程 S 3 3)

平面波展開工程は、物体光複素振幅インラインホログラム $g(x, y)$ をフーリエ変換して成る変換関数 G を求め、変換関数 G を平面波の分散関係を満たすフーリエ空間周波数 (u, v, w) を用いて平面波展開することにより所定焦点位置における波面ホログラム (h) を生成する。電磁波に関するヘルムホルツ方程式の厳密解として平面波がある。この厳密解である平面波を用いて、物体光 O を記録したホログラムを展開することによって、正確な光波面を再生することができる。そこで、まず、上式 (10) におけるホログラム $g(x, y)$ をフーリエ変換して、 $z = 0$ における変換関数 G を、下式 (11) のように求める。

[0064] [数7]

$$G(u, v) = \iint g(x, y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (11)$$

[0065] 次に、平面波の分散関係を満たすフーリエ空間周波数 (u, v, w) を用いて、下式 (12) のように、変換関数 G を平面波展開することにより、 $z = d$ における $x - y$ 平面上の波面 $h(x, y, d)$ を求める。また、 d は正数に限らず任意の値とすることができる。なお、 (u, v, w) における u, v はそれぞれ x, y 方向のフーリエ空間周波数である。また、 z 方向のフーリエ空間周波数 w は、下式 (13) に示すように、パラメータとして波長 λ を含む u, v の関数として、平面波の分散式から求められる。

[0066] [数8]

$$h(x, y) = \iint G(u, v) \exp[i2\pi w(u, v)d] \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv \quad (12)$$

$$w(u, v) = \sqrt{1/\lambda^2 - u^2 - v^2} \quad (13)$$

[0067] 任意の距離 $z = d$ における波面ホログラム $h(x, y)$ は式 (12) より求められ、再生光の光強度は $|h(x, y)|^2$ より計算できる。この波面ホ

ログラム $h(x, y)$ は、受光素子 4 の受光面（ホログラム面）における境界条件 $g(x, y)$ を満たすヘルムホルツ方程式の厳密解である。この波面ホログラム $h(x, y)$ を、その絶対値の 2 乗 $|h(x, y)|^2$ によって各画素毎の光の強度を求めて、電子ディスプレイに画面表示することにより、平面波展開を用いた無歪高分解能の画像を見ることができる。式 (12) における $z = d$ の値を変えることにより、記録された 3 次元画像中の任意の位置（焦点位置）の画像を表示することができる。

[0068] （干渉縞抽出工程 S 3 4）

位置 $z = d$ における再生画像 $|h(x, y, d)|^2$ に対して空間周波数フィルタリングを行い、干渉縞 F の単一空間周波数 f_i 成分のみを抜き出すことにより、干渉縞 F を抽出して、スペックルの影響を低減した画像である干渉縞画像 K が得られる。なお、図 5 (b) およびその説明を参照。この干渉縞抽出のための空間周波数フィルタリングは、再生画像 $|h(x, y, d)|^2$ に高速フーリエ変換 (FFT) を施し、この周波数空間においてフィルタリング処理を行った後、再度、高速フーリエ変換（逆変換）を施すことによって実現される。

[0069] （合焦判定工程 S 3 5）

スペックルの影響を低減した干渉縞画像 K は、位置 $z = d$ 、すなわち画像再生位置（焦点距離）を任意に変化させて生成することができる。従って、焦点距離の異なる複数の干渉縞画像 K を用いて、各測定点 $P(x_p, y_p)$ 毎に、例えばコントラストによる合焦測度（合焦を判定するための尺度）を求めて合焦判定をすることにより合焦位置すなわち合焦点 z_p を決定して、スペックルの影響を低減した状態で物体形状計測を行うことができる。

[0070] （合焦反復工程の他の実施形態）

図 1 3、図 1 4 は合焦反復工程（# 2）の他の実施形態を示す。この実施形態は、波面ホログラム $h(x, y, d)$ の全体を合焦法の対象とする替わりに、2 種類の微小ホログラム $\Delta h, h'$ を設定して各微小ホログラムに対して合焦法を適用する。この微小ホログラム $\Delta h, h'$ を用いる点が上述の

図12に示される実施形態とは異なる。図13に示すように、微小ホログラム Δh は、波面ホログラム h をホログラム面($z=0$)よりも物体3の表面に近い所定の位置 $z=z_0$ に生成し、その波面ホログラム h から測定点 $P(x_p, y_p)$ を含む微小ホログラムを切り取ったものである。微小ホログラム h' は、微小ホログラム Δh に基づいて生成され、互いに、例えば Δz 毎に、焦点位置の異なる複数の微小ホログラムが生成される。なお、微小ホログラム Δh は、合焦判定の対象とされる点において、微小ホログラム h' と見做される。微小ホログラム Δh を切り出すサイズは、 x 方向および y 方向の形状測定精度(分解能)に基づいて、十分な精度と適切な処理時間となるように設定する。合焦点方式による距離計測では、干渉縞再生画像が最も鮮明に収束する焦点距離を検索することにより物体表面上の各測定点までの距離を求める。従って、この合焦点方式による距離計測においては測定点の周りに投影干渉縞の明暗の差が含まれるに十分な広がりが必要であり、微小ホログラム Δh はそのようなサイズで切り出される。なお、「切り出す」とは、演算範囲を数値限定するという意味であり、計算上は、例えば矩形の窓関数を用いて行うことができる。

[0071] 図14に示すように、この実施形態の平面波展開工程(S43)における処理内容は、上述の図12の平面波展開工程(S33)における処理内容と同じである。しかしながら、本実施形態の平面波展開工程(S43)における波面ホログラム h の生成は、繰り返すことなく、物体3の表面に近い所定の位置 $z=z_0$ で1回だけ行えばよい。この位置 $z=z_0$ は、オフアクシスホログラム I_{OR} 記録時の情報に基づいて設定したり、別途の低精度の簡易的な処理によってオフアクシスホログラム I_{OR} から求めた物体の大略位置に基づいて設定したりすればよい。次の微小ホログラム設定工程(S44)では、所定の測定点 $P(x_p, y_p)$ を含む微小ホログラム Δh が切り出される。

[0072] 次の干渉縞抽出工程(S45)では、微小ホログラム h' (1回目は微小ホログラム Δh のこと)の再生画像 $|h'|^2$ に対して空間周波数フィルタリ

ングを行い、干渉縞Fの単一空間周波数 f_i 成分のみを抜き出すことにより、干渉縞Fを抽出して、スペックルの影響を低減した画像である微小な干渉縞画像 K' が生成される。合焦判定工程(S46)では、干渉縞画像 K' から合焦測度を求めて合焦判定が行われる。合焦ならば合焦点 z_p が測定点P(x_p, y_p)における物体形状データとして記録される。合焦判定は、以下に説明する繰り返し処理の中で、合焦測度を位置 z 毎に記憶しておき、例えば、合焦測度の最大値を検出し、その最大値を与える位置 z を合焦点 z_p とすればよい。

[0073] 合焦判定工程(S46)において合焦と判定されなかった場合(S47でNO)、微小ホログラム Δh に基づいて、 $z = z_0 + \Delta z$ (一般に $z = z_0 + n \times \Delta z$)の位置に、微小ホログラム h' が生成される(S48)。この生成処理は、上式(11)(12)と同等の、下式(14)(15)によって行う。

[0074] [数9]

$$G(u, v) = \iint \Delta h(x, y) \exp[-i2\pi(ux + vy)] dx dy \quad (14)$$

$$h'(x, y) = \iint G(u, v) \exp[i2\pi w(u, v)\Delta z] \exp[i2\pi(ux + vy)] du dv \quad (15)$$

[0075] 上式(11)(12)によって新たに生成された微小ホログラム h' を用いて、ステップ(S45)からの処理が繰り返される。また、合焦判定工程(S46)において合焦と判定され(S47でYES)、計測処理が終了ではないとされた場合(S49でNO)、測定点P(x_p, y_p)の移動が行われて(S50)、ステップ(S44)からの処理が繰り返される。所定の測定点P(x_p, y_p)の全点について形状計測が終了した場合(S49でYES)、合焦反復工程が終了し、3次元形状計測が終了する。

[0076] この実施形態においては、上述のように、微小ホログラム h' は、情報量の少ない微小ホログラム Δh に基づいて生成されるものではあるが、局所的な合焦判定に必要な情報を備えることができる。このような計測方法によれ

ば、計算処理の負荷を低減でき、効率良く高精度の3次元形状計測を行うことができる。また、必要であれば、 $z = z_0$ の位置を複数設定して、 z 方向位置の異なる複数の微小ホログラム Δh と、それらに基づく微小ホログラム h' を用いるようにしてもよい。また、事前情報または前処理としての低精度測定に基づいて、 $x y$ 面内の領域毎に $z = z_0$ の位置を変えるようにしてもよい。

[0077] (合焦反復工程のさらに他の実施形態)

図15、図16は合焦反復工程(#2)のさらに他の実施形態を示す。この実施形態は、空間窓関数を用いて合焦法を行うものであり、上述の図14において破線で囲んで示したステップ(S44)～(S48)における処理の高精度化を図るものである。概要を述べると、この合焦反復工程は、微小ホログラム h' の絶対値の2乗から成る再生画像 $|h'|^2$ と窓関数 W との積を単一空間周波数 f_i を用いてフーリエ変換した関数を合焦測度 H として求め、その合焦測度 H の大きさによって合焦判定をする。窓関数 W として、例えばガウス関数型の窓関数を用いることができる。窓関数 W の形状を設定する際に、微小ホログラム h' に対応する物体上の微小表面の傾斜を反映させる。窓関数 W と微小ホログラム h' とは、窓関数 W がカバーする領域を微小ホログラム h' の領域に包含するように、相互のサイズが設定される。また、窓関数 W のサイズは、測定点の周りに投影干渉縞の明暗の差が含まれるに十分な広がりを持つように設定される。

[0078] 図15において、微小ホログラム設定工程(S51)は、上述の図14によって説明した微小ホログラム設定工程(S44)と同様である。次の表面勾配取得工程(S52)は、微小ホログラム Δh に画像として含まれる物体3の微小表面の勾配ベクトル Δ を取得する。勾配ベクトル Δ は、 $x y$ 平面すなわちホログラム面、言い換えれば受光素子4の受光面を勾配ゼロの基準として、これらの面から物体上の微小表面が、どの方向にどれだけ傾いているかを表すベクトル量である。勾配ベクトル Δ は、例えば、物体の微小表面における等高線方向を表す角度と面の傾き角度とを用いて表現される。

[0079] 勾配ベクトル Δ の求め方を説明する。勾配ベクトル Δ は、例えば、微小ホログラム Δh の絶対値の2乗から成る再生画像 $|\Delta h|^2$ を単一空間周波数 f_i を用いてフーリエ変換し、そのフーリエ変換によって得られる関数の絶対値から成る2次元コントラスト画像を用いて求められる。このコントラスト画像は、干渉縞 F による細かい変化成分（交流成分）を除いた画像であり、再生画像 $|\Delta h|^2$ 全体における大きな形状変化を表現する画像である。

[0080] 次の窓関数設定工程（S53）は、上記の勾配ベクトル Δ に合わせて窓関数 W の形状を設定する。測定点 $P(x_p, y_p)$ 付近に再生される投影干渉縞の空間分布は、物体表面の勾配ベクトル Δ の大きさとその方向に依存する。従って、測定精度を高めるために、窓関数 W の幅や形を決めるパラメータの値は、測定点付近に再生される干渉縞コントラストの空間分布、つまりを勾配ベクトル Δ を用いて設定することが有効である。また、合焦点方式による距離計測においては、測定点周辺の投影干渉縞の合焦測度を表すための広がりが必要であり、このために $x-y$ 平面上の各測定点に対して測定点 $P(x_p, y_p)$ を中心とした空間窓関数 $W(x-x_p, y-y_p)$ を設定する。これらの窓関数 W に関する設定については、以下の合焦測度計算工程（S54）、合焦判定工程（S55）、および反復処理のステップ（S57）の説明の後に説明する。

[0081] 合焦測度計算工程（S54）は、微小ホログラム h' の絶対値の2乗から成る再生画像 $|h'(x, y, z)|^2$ と窓関数 $W(x-x_p, y-y_p)$ との積をフーリエ変換して成る下式（16）の関数 H に基づいて合焦測度を設定する。窓関数 W として、例えばガウス関数型の下式（17）に示す関数 W を用いることができる。

[0082] [数10]

$$H(f_x, f_y, z) = \iint |h(x, y, z)|^2 W(x-x_p, y-y_p) \exp[-i2\pi(f_x x + f_y y)] dx dy \quad (16)$$

$$W(x-x_p, y-y_p) = \exp\left\{-\left(\frac{x-x_p}{a}\right)^2 - \left(\frac{y-y_p}{b}\right)^2\right\} \quad (17)$$

[0083] 上式(16)の関数 H は、 $f_x = f_i$ 、 $f_y = 0$ とすることにより、すなわち、単一空間周波数 f_i を用いてフーリエ変換処理を行うことにより、投影干渉縞 F と同じ空間周波数 f_i のみを持つ成分 $H(f_i, 0, z)$ となる。この成分 H の大きさ $|H(f_i, 0, z)|$ は、物体表面に焦点が合っている度合いを表し、焦点が合った $z = z_p$ において最大になる。従って、合焦判定工程(S55)は、 $H(f_i, 0, z)$ を合焦測度として用いることにより、合焦測度 H の大きさ、すなわち絶対値 $|H|$ の最大値で合焦と判定し、測定点 (x_p, y_p) における物体表面までの距離 z_p を決定する。合焦判定工程(S55)において合焦との判定が成されなかった場合(S56でNO)、微小ホログラム Δh に基づいて、再生位置 z の異なる微小ホログラム h' を生成し(S57)、ステップ(S56)でYESとなるまでステップ(S53)からの処理が繰り返される。ステップ(S57)における処理は、図14におけるステップ(S48)の処理と同じである。

[0084] 上式(16)(17)の合焦測度用の関数 H と窓関数 W とを用いることにより、高精度の3次元形状計測を効率的に行うことができる。これを説明する。一般に、各測定点 (x_p, y_p) に対して合焦点 z_p を検索するには、焦点距離を変化させながら画像再生する必要がある。この場合、測定点周辺の画像のみが必要であって物体全体の画像は必要でない。従って、微小ホログラム Δh を用いて任意焦点画像を次々と再生し、合焦法によって物体表面における測定点までの距離を求めることにより、合焦点検索のための画像再生に要する計算時間を大幅に短縮することができる。この微小ホログラム Δh のサイズは、窓関数 W のサイズ(窓幅)よりも大きく取る必要がある。

[0085] 次に、勾配ベクトル Δ と窓関数 W について説明する。関数 $H(f_i, 0, z)$ には、投影干渉縞の交流成分 $A(f_i, 0, z)$ と除去されなかった残留スペckル成分 $S(f_i, 0, z)$ とが含まれる。すなわち、 $H = A + S$ である。スペckル成分 $S(f_i, 0, z)$ は、合焦法における測定誤差の主な原因となる。交流成分 $A(f_i, 0, z)$ は、窓関数 W の窓の面積に比例する。他方、ランダムノイズであるスペckル成分 $S(f_i, 0, z)$ は

、窓関数の寸法に比例する。従って、窓の面積を大きく取るほどスペckル成分の比率 $\eta = S(f_i, 0, z) / H(f_i, 0, z)$ を小さくすることができる。しかしながら、窓の面積を大きくすると、測定点 $P(x_p, y_p)$ の位置の不確かさが増す。ところで、干渉縞 F の再生像は、焦点の合った物体表面上の等高線に沿って再生される。そして、等高線と垂直な方向の干渉縞強度の空間分布の幅 ρ (例えば、1本の縞画像の明暗分布の半値幅) は、物体表面の勾配ベクトル Δ の大きさ (同じ記号で勾配 Δ と表記する) に反比例する。

[0086] ここで、上記の点について、干渉縞 F の縞間隔 α と、受光素子 4 の幅 D (寸法) と、ホログラムの開口数 $NA = D / (2z)$ と、物体表面の勾配 Δ とを用いて説明する。干渉縞再生像の焦点深度 ζ は、 $\zeta = \alpha / (NA)$ と見積もられ、干渉縞強度分布の幅 ρ は、 $\rho = \alpha / ((NA) \Delta)$ と見積もられる。つまり、スペckル成分の比率 $\eta = S(f_i, 0, z) / A(f_i, 0, z)$ を小さく抑えるには、等高線に垂直な方向の窓関数の幅 WT を $WT < \rho$ の範囲内に設定する必要がある。物体表面の等高線方向および表面の勾配、従って等高線に垂直な方向は、表面勾配取得工程 (S52) において、干渉縞の再生像 $|\Delta h|^2$ から勾配ベクトル Δ として取得されている。

[0087] 干渉縞 F の縞間隔 α を小さくすると、焦点深度 ζ が小さくなり距離変化に対する合焦測度の感度が高くなるので、距離測定の精度を高めることができる。また、物体表面の勾配 Δ が小さくなってホログラム面と平行に近づくと、干渉縞強度分布の幅 ρ は広くなり、上述の窓関数の幅 WT を広く取ることができ、測定精度を高めることができる。等高線方向に関しては、位置の不確かさが合焦測度に及ぼす影響が小さいので、この方向の窓関数幅を大きく取ることによってスペckルの影響を小さく抑えることが可能になる。これらのことに基づいて、例えば、上式 (17) における窓関数 W の形状パラメータ a, b を調整すればよい。また、上式 (17) の窓関数 W は、窓の方向が x 方向と y 方向とに固定された関数となっているが、この窓関数 W を xy 面内で回転させることにより、等高線方向に沿った形状の窓関数 W とするこ

とができる。

[0088] 以上に示したように、再生像の解像限界を超えない範囲で干渉縞Fの縞間隔 α を小さく、物体表面の勾配 Δ を小さく、等高線方向の窓関数幅を大きくすればするほど相対的な測定精度を高くすることができる。物体表面の勾配 Δ は、受光素子4に対する物体3の相対配置に依存するので、可能な限り配置を調整すればよい。

[0089] (複数の記録ホログラムを用いた高精度化)

図16、図17は本計測方法の他の実施形態を示す。本実施形態は、図16に示すように、物体3の表面に投影された干渉縞の像をホログラムに記録するために、3つの受光素子41、42、43を用いるものである。干渉縞F(不図示)の構成は、例えば、図3に示した構成と同じとする。受光素子41、42、43は、干渉縞F(不図示)の縞の配列方向(x方向)に沿って配置される。受光素子の個数は、一般に複数とすることができる。このように、x方向(水平方向)に配列した複数の受光素子を用いて、垂直方向の干渉縞を記録し、複数枚の記録ホログラムを使ってx方向の開口数が大きい複素振幅インラインホログラムを作成することができる。

[0090] このように、例えば垂直方向の投影干渉縞を用いる3次元計測において、水平方向の分解能 δ を上げることにより測定精度を高めることができる。そこで、水平方向に配置したn個の受光素子を用いて干渉縞を同時にワンショット記録し、同時に複数のオフアクシスホログラム $I_{OR}(j)$ 、 $j=1, \dots, n$ を取得する。これらのオフアクシスホログラム $I_{OR}(j)$ 、 $j=1, \dots, n$ の各々から物体光複素振幅インラインホログラム $g(j)$ 、 $j=1, \dots, n$ を生成する。その後、図17に示すように、各ホログラム $g(j)$ 、 $j=1, \dots, n$ を互いに重ねて合成し、合成したホログラムを物体光複素振幅インラインホログラム g とする。このようにして合成した物体光複素振幅インラインホログラム g を用いることにより、水平方向分解能 δ を高めた投影干渉縞の画像を再生することができ、従って、距離計測の精度を効果的に高めることができる。

[0091] さらに説明する。一般に、大開口数ホログラム $g(x, y)$ を用いることにより、再生画像の分解能を高めることができる。しかしながら、FFTを用いて大開口数ホログラムから画像再生を行う場合、サンプリング点数が過大になると計算時間が増大して、画像再生が難しくなる。ところで、互いに周波数帯域の異なるデータは、波の重ね合わせの原理によると、互いに足し合わせた状態で計算処理をすることができる。すなわち、異なる周波数帯域に記録されたそれぞれの情報は空間的に重ねても失われずに保存される。このことを利用すると広帯域のホログラムを重ねて広い帯域かつ小開口数のホログラムを作成することができる。また、複素振幅インラインホログラム J_{\perp} や物体光複素振幅インラインホログラム $g(x, y)$ は、分割した各領域に画像を再生するための情報を保持している。この事実を利用して、広帯域の大開口数ホログラム $g(x, y)$ を重ねることにより、小開口のホログラムに広い帯域情報を取り込んだホログラムを作成することができる。言い換えると、水平方向の全幅が $n \times D$ の大きなホログラム g を n 分割して $g(j)$, $j = 1, \dots, n$ とし、これらを互いに重ねて、水平方向の幅が D の合成ホログラム $\Sigma g(j)$ を生成すると、合成ホログラム $\Sigma g(j)$ は周期的なホログラムになる。この合成ホログラム $\Sigma g(j)$ から高分解能な画像を再生することができる。また、合成ホログラム $\Sigma g(j)$ に対する計算処理時間は、全幅が $n \times D$ のホログラム g の場合の n 分の 1 に短縮される。なお、幅 D が、再生画像の大きさより小さくなると、再生像が隣同士で重なって再生されるので、幅 D は再生像よりも大きく設定する必要がある。

[0092] (3次元形状計測装置)

図18は3次元形状計測装置1を示す。計測装置1は、投影部11と、記録部12と、計測部13と、これらを制御する制御部14とを備えている。投影部11は、単一空間周波数 f_i と正弦波光強度とを有する干渉縞 F を互いにコヒーレントな2つのレーザ光の干渉によって形成して物体表面に投影する。投影部11は、干渉縞 F を形成するためのレーザ光を発する光源11aと、光源11aからのレーザ光を物体表面まで導く光学システム11bと

を備えている。光源 11a は、例えば、図 2 に示したレーザ 2 であり、この場合、記録部 12 で用いる光源 12a（後述）が共用される。光学システム 11b は、例えば、図 2 に示した照明光 L1, L2 用の光学素子群等から構成される。

[0093] 記録部 12 は、投影部 11 によって物体表面に投影した干渉縞 F を受光素子によってオフアクシスホログラム I_{OR} としてデジタルホログラムに記録する。記録部 12 は、オフアクシス参照光 R や再生用インライン参照光 L 用のレーザ光を発する光源 12a と、受光素子 12b と、光源 12a からのレーザ光を受光素子 12b まで導く光学システム 12c とを備えている。光源 12a は、例えば、図 2 に示したレーザ 2 であり、この場合、投影部 11 で用いる光源 11a が共用される。受光素子 12b は、例えば CCD などのイメージセンサであり、例えば、図 2 における受光素子 4 である。光学システム 12c は、例えば、図 2 に示した参照光 R 用の光学素子群、および図 6 に示した参照光 L 用の光学素子群等から構成される。投影部 11 は、物体表面に投影する干渉縞 F を、受光素子 4 の受光面から見て物体表面の位置にかかわらず干渉縞 F の配置が一定となるように物体表面に投影する。また、記録部 12 は、オフアクシス参照光 R と再生用インライン参照光 L とによるオフアクシスホログラム I_{LR} を記録する。

[0094] 計測部 13 は、記録部 12 によって記録されたデジタルホログラム I_{OR} と I_{LR} から焦点距離を変えた干渉縞 F の複数の再生像を生成し、各再生像における干渉縞 F に対する合焦法の適用によって物体表面の各点までの距離を求める。計測部 13 は、複素振幅生成部 13a と、第 2 変調部 13b と、平面波展開部 13c と、干渉縞抽出部 13d と、合焦判定部 13e と、微小ホログラム処理部 13f と、窓関数処理部 13g とを備えている。ブロック中の各部名に付記した (J_{OL}) 等の記号は、主たる出力データまたは処理対象データを示す。

[0095] 複素振幅生成部 13a は、記録部 12 によって記録されたオフアクシスホログラム I_{OR} から複素振幅インラインホログラム J_{OL} を生成する。第 2 変調

部 1 3 b は、複素振幅インラインホログラム J_{OL} に対し空間ヘテロダイン変調を行うことによりホログラム面における物体光複素振幅インラインホログラム g を生成する。平面波展開部 1 3 c は、物体光複素振幅インラインホログラム g をフーリエ変換して成る変換関数 G をフーリエ空間周波数 (u, v, w) を用いて平面波展開することにより波面ホログラム h を生成する。なお、平面波展開部 1 3 c によって、自由焦点画像（任意焦点画像）を生成することができる。また、平面波展開部 1 3 c は、広帯域の大開口数ホログラム g を分割して互いに重ねて小開口のホログラムに広帯域情報を取り込んだホログラム $\Sigma g(j)$ を生成する開口合成処理を行う。

[0096] 干渉縞抽出部 1 3 d は、各種の再生像にフィルタリング処理を行って、干渉縞 F に対応する単一空間周波数 f_i の成分を抽出することによりスペックル成分を低減し、合焦判定の対象となる干渉縞 F の情報を低ノイズ比で含む画像やホログラムを生成する。合焦判定部 1 3 e は、波面ホログラム h や、微小ホログラム $\Delta h, h'$ などから生成した焦点位置の異なる再生像を用いて合焦を判定して測定点 $P(x_p, y_p)$ 毎の合焦点 z_p を決定する。微小ホログラム処理部 1 3 f は、波面ホログラム h から微小ホログラム Δh を切り出すか、または切り出すための窓関数を設定し、または微小ホログラム Δh から微小ホログラム h' を生成する処理を行う。窓関数処理部 1 3 g は、微小ホログラム h' の絶対値の 2 乗から成る再生画像 $|h'|^2$ と窓関数 W との積を干渉縞 F の単一空間周波数 f_i を用いてフーリエ変換することにより合焦測度 H を生成する。計測部 1 3 は、合焦測度 H の大きさ $|H|$ によって合焦判定をして合焦点を決定する。

[0097] 制御部 1 4 は、モニターディスプレイ、制御信号やデータの入出力装置、メモリなどを備えた一般的な計算機で構成される。上述の計測部 1 3 の各部分は、主にソフトウェアで構成され、これらは、例えば、制御部 1 4 のプログラム記憶部に記憶され、随時呼び出されて動作する。制御部 1 4 は、図 2、図 6 等に示したコンピュータ 5 の役割を担当する。このような 3 次元形状計測装置 1 は、上述した 3 次元形状計測方法を実行して 3 次元形状計測を行う

ことができる。

[0098] 本発明の3次元形状計測装置1によれば、ワンショット記録法を用いて正確で無歪な高分解能自由焦点画像を記録し、またスペックルの影響を低減して再生することができるので、合焦法によって、4次元空間（空間+時間）における運動物体の位置や形状、変形などを高精度計測することができる。すなわち、計測装置1によれば、1枚のオフアクシスホログラム I_{LR} をワンショット記録した条件の下で、物体3の種々の形状や姿勢毎に各1枚のオフアクシスホログラム I_{OR} をそれぞれワンショット記録しておくことにより、後処理によって、各オフアクシスホログラム I_{OR} 毎に、物体3の形状や姿勢における形状計測を行うことができる。従って、ワンショット記録の利点を生かして、運動物体の3次元計測の課題を解決することができる。また、計測装置1によれば、結像レンズを通さずに必要なホログラムを記録できるので、結像レンズの使用によって生じる焦点ズレや画像歪みなどの課題を回避することができる。従って、空気中に限らず、空気とは異なる屈折率を有する水中などで記録した物体においても歪みのない高精度な形状計測を行うことができる。また、光源12a（レーザ2）としてパルスレーザを用いることにより、高速運動物体の高速記録による形状計測が可能になる。

[0099] （実施例）

図19乃至図24によって、3次元形状計測方法の実施例を説明する。本発明の計測方法による高精度計測の有利性を確認するために、拡散平面（光拡散性の平面）までの距離を計測する距離計測実験を行った。計測物体は、面精度が波長以下の $2\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ の立方体ガラスの表面に厚さ $10\text{ }\mu\text{ m}$ 以下の白色塗料を塗布したものである。この計測物体を、イメージセンサから約 85 cm の位置に物体側面を 45 度傾けて配置した。干渉縞は、この計測物体の表面に縦方向の縞模様と成るように投影した。従って、これらの配置は、図3に示した配置と同じである。計測物体の表面上の干渉縞を上述のワンショットホログラフィを用いて記録した。得られた複素振幅インラインホログラムは、画素ピッチ $7.4\text{ }\mu\text{ m}$ 、画素数 4096×4096 を有し、こ

のホログラムから数値計算によって画像を再生した。

[0100] 図19(a)は、物体3の表面近傍位置において再生された画像を示し、図19(b)はこの再生画像に対応する計測物体3の部位を示す。これらの図において、x方向が水平であり、y方向が垂直であり、物体3の面3a、3bが縦方向の干渉縞と共に記録、再生されている。再生像中の領域3cの拡大図が図20に示されている。なお、図19(a)(b)における模様3dは、位置確認のための模様である。図20の再生画像3cにおいて、縞間隔が約 $200\mu\text{m}$ の干渉縞がx方向約6mmの幅内に再生されている。

[0101] また、図21は、図20における領域3eの拡大図を示す。この図21に示した画像のサイズは、微小ホログラム Δh のサイズに相当し、窓関数Wのサイズはこの画像内に収まるサイズである。また、図22は、図21の再生画像3eの2次元周波数空間($f_x - f_y$ 空間)におけるスペクトル分布を示す。このスペクトル分布において、高いピークを有する直流成分 S_0 のピークと、その両側に f_x 方向に並んだ空間周波数 f_i 、 $-f_i$ に対応する2つの交流成分 S_P 、 S_N のピークとが現れ、さらに、スペックル成分 S_S が、スペクトル分布図における広い周波数幅を持つバックグラウンド成分として現れている。このスペックル成分 S_S の影響を低減しなければ、干渉縞の再生画像が不鮮明になる。なお、このスペクトル分布図において、3つのピーク S_0 、 S_P 、 S_N を通る f_x 方向における断面が、図5(a)の図に対応する。なお、図21の画像のサイズよりも大きなサイズのデータに基づいて、すなわち干渉縞の本数を増やして図22のスペクトル分布を得ると、交流成分 S_P 、 S_N のピークがより高く、より細くなるが、 $x-y$ 面内の位置分解能は低下する。

[0102] 図23は、ある測定点 $P(x_p, y_p)$ に対して再生画像を用いて計測した合焦測度曲線、すなわち図15によって説明した合焦測度 $|H(f_i, 0, z)|$ の一例を、合焦点 z_p からの z 方向の隔たり距離依存性として示す。この場合のホログラム記録は、イメージセンサから85cmの距離に約45度傾けて置いた拡散平面に間隔約 $80\mu\text{m}$ の干渉縞を投影して記録したも

のである。この図は、合焦点 z_p の前後奥行き約 2 mm の幅でコントラストの高い、すなわち合焦測度の大きい干渉縞が再生されていることを示し、合焦測度曲線は、この幅内で合焦点 $z = z_p$ に対してほぼ対称のきれいな曲線になっている。そこで、合焦測度曲線を取得した後に、この曲線に対してモデル曲線をフィッティングさせることにより、合焦点 z_p における曲線のピーク、従って合焦点 z_p を自動検出することができる。また、このようなフィッティングは、数点の合焦測度値によって行うことができるので、粗い距離間隔 Δz で再生した数枚の再生画像を用いて合焦点 z_p を効率的に検出することができる。

[0103] 図 24 は、図 19 (b) に示した物体 3 の面 3 b における中央水平方向に沿って表面位置を計測した結果を示す。この計測では、縞間隔約 80 μm の干渉縞を投影し、空間窓関数として窓半径約 0.5 mm の円形のガウス関数型の窓を採用した。計測対象の拡散平面は、イメージセンサから 85 cm の距離に約 45 度傾けて配置した面である。図 24 の計測結果において、計測距離の平均二乗誤差として 72 μm の値が得られた。なお、この計測では、光透過性の白色塗料を塗布したガラスを被写体として用いており、高コントラストは得られず、また高空間周波数の干渉縞投影はできていない。測定誤差 72 μm は、主に再生画像中のスペックルによるものとみなすことができる。高屈折率と低光吸収率を有する、例えば、酸化チタンの粉末を塗布することにより、高コントラスト、かつ高空間周波数の干渉縞投影を行うことができるので、この場合には、より高精度の計測が可能である。

[0104] なお、本発明は、上記構成に限られることなく種々の変形が可能である。例えば、上述した各実施形態の構成を互いに組み合わせた構成とすることができる。物体表面に投影する干渉縞 F は、複数の単一空間周波数 f_i の組み合わせとすることができる。例えば、互いに異なる単一空間周波数 f_1 , f_2 を有する 2 種類の干渉縞 F_1 , F_2 を形成してこれらを物体表面に投影することができる。この場合、各干渉縞 F_1 , F_2 を形成するために、2 つのレーザ光の組を 2 組用いて、各組で各干渉縞 F_1 , F_2 を形成すればよい。

また、2種類の干渉縞 F_1 、 F_2 の向き（縞の配列方向）は、同一方向でも、直交方向でも、斜交方向でもよい。一般的に言えば、本発明は、複数種類の干渉縞 F_i であって、各干渉縞 F_i がそれぞれ単一空間周波数 f_i を有し、各単一空間周波数 f_i が、空間周波数の空間（ f_x 、 f_y ）において互いに分離可能、すなわちフィルタリング可能である複数種類の干渉縞 F_i を用いることができる。つまり、干渉縞の方向が異なれば、各方向において空間周波数が同じでもよい。例えば、2種類の互いに直交する干渉縞 F_1 、 F_2 の場合、 $f_x = f_y = f_1 = f_2$ であってもよい。向きの異なる複数の干渉縞を用いると、物体表面の勾配ベクトル Δ に応じて、適切な干渉縞を選択して窓関数 W を設定することができる。

[0105] ここで、再生用インライン参照光の位相 ϕ_L を求める方法について補足説明する。再生用インライン参照光 L として点光源からの球面波光を用いる場合、受光素子4から参照光 L の点光源までの距離（ γ とする）が分かれば、位相 ϕ_L を計算によって求めることができる。距離 γ は、スケールが既知の物体のホログラムを参照光 L によって記録し、そのホログラムから再生した物体像の寸法を、前記スケールが既知の物体の寸法と比較することにより求めることができる。また、再生用インライン参照光 L として平面波を用いることができる。この場合、前記距離 γ が無限大であると考えられることができる。平面波の位相 ϕ_L は受光素子4の受光面上で一定であり、参照光 L の干渉縞のホログラムを用いて容易に決定することができる。また、オフ軸参照光 R と再生用インライン参照光 L とは球面波光に限定されない。

産業上の利用可能性

[0106] 本発明は、変形、変位、振動している運動物体および静止物体の3次元形状を記録して計測する分野、例えば、意匠デザイン分野、塑性加工分野、流体機器分野、ロボットビジョン分野、製品検査分野、医療・美容分野などで利用することができる。また、本発明は、製造現場における部品検査、運転状態にある部品や機器の性能評価および不具合解析などに利用ことができ、高速運動や高速回転をしている部品や機器の振動や変形、移動などの時

系列に沿った連続計測、高速または実時間での計測に利用できる。また、本発明は、空気中の被写体だけでなく、空気とは異なる屈折率を有する水などの媒質中の運動物体や静止物体の形状計測などに利用できる。

[0107] (解像度限界と測定距離の関係)

本発明の形状計測方法において、再生像の横方向（x y 方向）の分解能 δ は、ホログラムの開口数 $NA = D / (2z)$ と光波長 λ を用いて $\delta = \lambda / (NA) = 2\lambda z / D$ と表され、ホログラム幅 D が一定の下では分解能 δ は測定位置までの距離 z に比例する。一方、縞間隔 α の再生干渉縞の場合、焦点深度 ζ は、大略 $\zeta = \alpha / (NA)$ と表される。奥行き方向（z 方向）の分解能は、焦点深度 ζ に比例する。縞間隔 α を分解能 δ に比例した値 $\alpha = k\delta$ に設定すると $\zeta = \alpha / (NA) = k\lambda / (NA)^2 = 4k\lambda z^2 / D^2$ となり、焦点深度 ζ は距離 z の二乗に比例する。従って、ホログラム幅 D が一定の下では距離 z が大きくなるほど、分解能 δ の値は大きくなり、奥行き方向の距離検出の分解能の値は距離 z の二乗に比例して大きくなる。つまり、解像度限界は距離 z によって変化し、距離 z が大きくなるほど再生像の分解能も距離検出の分解能も低下し、逆に、距離 z が小さくなるほど再生像の分解能も距離検出の分解能も向上する。ホログラム幅 D が一定の下で距離 z と分解能との関係の具体的な数値例を示すと、下表 1 のようになる。

[0108] [表1]

| 距離 z | 横方向（x y 方向）の分解能 δ | 奥行き方向（z 方向）の分解能（焦点深度 ζ に比例） |
|--------|--------------------------|-----------------------------------|
| 10 cm | 2 ~ 3 μm | 波長限界の精度 |
| 1 m | 20 ~ 30 μm | 数 10 μm |
| 10 m | 200 ~ 300 μm | 数 mm |

[0109] (時間分解能)

本発明の形状計測方法において、時間分解能は、毎秒当たりのホログラム画像取得数（フレーム数）によって決まる。また、このフレーム数は、本発明の形状計測方法がワンショット記録記録方法であるので、形状計測装置 1 の投影部 11 と記録部 12 の動作速度によって決まる。そこで、投影部 11

の光源 11a (2) として、短パルスレーザ光源、例えば、数 $nsec$ 程度の時間幅の短いパルスレーザ光を用い、記録部 12 の受光素子 12a (4) として、専用のメモリを有する高速の CMOS を用いることにより、例えば、1 億フレーム (10^8 画像/秒) を実現できる。この場合、時間分解能は、 10^{-8} 秒となる。

[0110] (具体的なアプリケーション)

本発明の形状計測方法は、上記の表 1 に示すように、小さなところでは、顕微鏡的な世界から、大きなところでは、数 10 m を超える世界まで、距離 z に対する大きなダイナミックレンジを有する測定方法である。従って、小さなものから、大きなものまで、適切な距離 z と従来にない分解能のもとで形状を計測することができる。また、本発明は、上記のように、例えば 10^{-8} 秒という従来にない時間分解能のもとで形状を記録することができるので、クランクシャフトのような奥行きのある回転体や、さらに大型で深い奥行きを持つ多段タービンブレードや送水用の渦巻ポンプブレードなどの、高速回転中の形状計測、変位計測、振動解析などに適用することができる。さらに、爆発現象の時間変化、弾道の衝撃による物体形状の変形や亀裂の発生とその成長、弾性表面波の伝搬などの記録と解析などの手段として適用することができる。

[0111] (従来との測定法との比較)

上記の適用可能性は、本発明が、以下のような特徴を持つことによる； (1) 照明用光源として短パルスレーザ光源を使用可能、(2) イメージセンサのキャリブレーションが不要、(3) 深度の大きい物体形状を計測可能、(4) オーバーハング形状や不連続面を持つ複雑形状の計測が可能、(5) 高精度計測が可能、(6) 水中物体の形状計測が可能。これらの特徴を兼ね備えた計測技術は、従来存在しない。例えば、運動物体に対する 3 次元形状計測技術として現在実用化されている技術に、デジタル写真測量技術と TOF 距離測定技術とがある。デジタル写真測量技術は、ステレオ法を原理としており、計測の前に使用カメラのパラメータ (画像距離、主点位置、レンズ

歪み係数)を正確に求めるためイメージセンサのキャリブレーションを行う必要がある。また、運動物体に対する計測精度と計測深度とは、使用カメラの解像限界と焦点深度によって制限される。TOF距離測定技術は、カメラと被写体間を往復する光の往復時間により距離を検出するものであり、オーバーハング形状も計測できる。しかしながら、実用化されている装置の距離検出分解能は1cm程度に留まっており、高精度に計測するにはカメラレンズの歪み補正を行う必要がある。

[0112] また、従来の形状計測技術と比較した場合、本発明は以下のような優位性を有する。本発明ではホログラムの記録に結像レンズを用いないので、デジタル写真測量技術におけるようなイメージセンサのキャリブレーションが不要である。また、ワンショット記録したインラインホログラムから正確な自由焦点画像を再生するので、カメラを使用する従来の測定法に比べて深度の大きい物体形状を計測できる。短パルスのレーザ光源を用いることにより、超音速移動物体、回転物体、爆発や弾道の衝撃試験などにおける、ナノ秒程度の高速事象の計測が可能である。さらに、合焦点法によって距離検出を行うので、TOF距離測定技術と同じようにオーバーハング形状や不連続面を持つ複雑形状の計測が可能である。レーザ光で粗面物体を照射するとスペckルが発生するが、本発明では距離計測の高精度化を達成するために均一微細な等間隔の干渉縞投影と空間周波数サンプリングによってスペckルによる影響を除去している。

[0113] 本願は日本国特許出願2011-010842に基づいており、その内容は、上記特許出願の明細書及び図面を参照することによって結果的に本願発明に合体されるべきものである。

符号の説明

- [0114]
- | | |
|----|-----------|
| 1 | 3次元形状計測装置 |
| 10 | 光学システム |
| 11 | 投影部 |
| 12 | 記録部 |

- 1 3 計測部
- 1 3 d 干渉縞抽出部
- 2, 1 1 a, 1 2 a レーザ (光源)
- 3 物体
- 4, 4 1 ~ 4 3、1 2 b 受光素子 (イメージセンサ)
- f i 単一空間周波数
- g 物体光複素振幅インラインホログラム
- g (j) 物体光複素振幅インラインホログラム
- h 波面ホログラム
- h ' 微小ホログラム
- Δh 微小ホログラム
- z p 合焦点
- F 干渉縞
- G 変換関数
- H 合焦測度
- L 再生用インライン参照光
- O 物体光
- P 測定点
- R オフアクシス参照光
- W 窓関数
- I_{OR} オフアクシスホログラム
- $I_{OR} (j)$ オフアクシスホログラム
- J_{OL} 複素振幅インラインホログラム
- ϕ_L 再生用インライン参照光の位相
- ϕ_R オフアクシス参照光の位相

請求の範囲

- [請求項1] 物体表面に投影した干渉縞を記録したデジタルホログラムを用いて物体表面の3次元形状を計測する3次元形状計測方法において、
物体表面に単一空間周波数 f_i を有する干渉縞 F を投影する投影工程と、
前記投影工程によって物体表面に投影した干渉縞 F を受光素子によってホログラムとして記録する記録工程と、
前記記録工程によって記録されたホログラムから焦点距離を変えた複数の再生像を生成し、各再生像における干渉縞 F に対する合焦法の適用によって物体表面の各点までの距離を求める計測工程と、を備え、
前記計測工程は、前記合焦法を適用する際に空間周波数フィルタリングによって前記各再生像から前記干渉縞に対応する単一空間周波数 f_i の成分を抽出する干渉縞抽出工程を備えることを特徴とする3次元形状計測方法。
- [請求項2] 前記投影工程において物体表面に投影する干渉縞 F は正弦波光強度を有することを特徴とする請求項1に記載の3次元形状計測方法。
- [請求項3] 前記投影工程は、物体表面に投影する干渉縞 F を互いにコヒーレントな2つのレーザ光の干渉によって形成し、前記受光素子の受光面から見て物体表面の位置にかかわらず干渉縞 F の配置が一定となるように前記干渉縞 F を物体表面に投影することを特徴とする請求項1または請求項2に記載の3次元形状計測方法。
- [請求項4] 前記記録工程は、前記干渉縞 F をオフアクシス参照光 R を用いるオフアクシスホログラム I_{OR} として記録することを特徴とする請求項1乃至請求項3のいずれか一項に記載の3次元形状計測方法。
- [請求項5] 前記計測工程は、
再生用インライン参照光 L の位相 ϕ_L と前記オフアクシス参照光 R の位相 ϕ_R とに基づいてホログラムに空間ヘテロダイン変調を行う変

調工程と、ホログラムから共役像成分を取り除くために空間周波数フィルタリングを行うフィルタリング工程とを有して、前記記録工程によって記録されたオフアクシスホログラム I_{OR} に対して前記変調工程とフィルタリング工程とをこの順またはこの逆順で行うことにより前記オフアクシスホログラム I_{OR} から複素振幅インラインホログラム J_{OL} を生成する複素振幅生成工程を備え、

前記複素振幅生成工程によって生成された複素振幅インラインホログラム J_{OL} を用いて焦点距離を変えて生成される複数の再生像に対して前記干渉縞抽出工程を行うことを特徴とする請求項4に記載の3次元形状計測方法。

[請求項6]

前記計測工程は、

前記複素振幅生成工程によって生成された複素振幅インラインホログラム J_{OL} に対し、前記再生用インライン参照光 L の位相 ϕ_L を用いて空間ヘテロダイン変調を行うことにより再生用インライン参照光 L 成分を除去して前記受光素子の受光面で定義されるホログラム面における物体光波面を表す物体光複素振幅インラインホログラム g を生成する第2変調工程と、

前記物体光複素振幅インラインホログラム g をフーリエ変換して成る変換関数 G を求め、前記変換関数 G を平面波の分散関係を満たすフーリエ空間周波数 (u, v, w) を用いて平面波展開することにより所定焦点位置における波面ホログラム h を生成する平面波展開工程と、を備え、

前記平面波展開工程によって生成された波面ホログラム h を用いて合焦点 z_p を決定することを特徴とする請求項5に記載の3次元形状計測方法。

[請求項7]

前記記録工程は、複数の受光素子を用いて同時に複数のオフアクシスホログラム $I_{OR}(j)$ を取得し、

前記計測工程は、前記各オフアクシスホログラム $I_{OR}(j)$ の各

々から前記物体光複素振幅インラインホログラム $g(j)$ を生成すると共に、それらを互いに重ねて合成したホログラムを物体光複素振幅インラインホログラム g として用いることを特徴とする請求項6に記載の3次元形状計測方法。

[請求項8] 前記計測工程は、前記平面波展開工程による波面ホログラム h を前記ホログラム面よりも物体表面に近い焦点位置に生成し、その波面ホログラム h から測定点 $P(x_p, y_p)$ を含む微小ホログラム Δh を切り取り、前記微小ホログラム Δh に基づいて互いに焦点位置の異なる複数の微小ホログラム h' を生成し、それらの微小ホログラム h' を用いて合焦点 z_p を決定することを特徴とする請求項6または請求項7に記載の3次元形状計測方法。

[請求項9] 前記計測工程は、前記微小ホログラム h' の絶対値の2乗から成る再生画像 $|h'|^2$ と窓関数 W との積を前記単一空間周波数 f_i を用いてフーリエ変換した関数を合焦測度 H として求め、その合焦測度 H の大きさによって合焦判定をして合焦点 z_p を決定することを特徴とする請求項8に記載の3次元形状計測方法。

[請求項10] 前記窓関数 W は、ガウス関数型の窓関数であることを特徴とする請求項9に記載の3次元形状計測方法。

[請求項11] 前記計測工程は、前記微小ホログラム Δh の絶対値の2乗から成る再生画像 $|\Delta h|^2$ から当該再生画像 $|\Delta h|^2$ に対応する物体表面の勾配ベクトル Δ を求め、その勾配ベクトル Δ に基づいて前記窓関数 W の窓の大きさと向きとを調整することを特徴とする請求項9または請求項10に記載の3次元形状計測方法。

[請求項12] 物体表面に投影した干渉縞を記録したデジタルホログラムを用いて物体表面の3次元形状を計測する3次元形状計測装置において、
単一空間周波数 f_i と正弦波光強度とを有する干渉縞 F を互いにコヒーレントな2つのレーザ光の干渉によって形成して物体表面に投影する投影部と、

前記投影部によって物体表面に投影した干渉縞 F を受光素子によってオフアクシスホログラム I_{OR} としてデジタルホログラムに記録する記録部と、

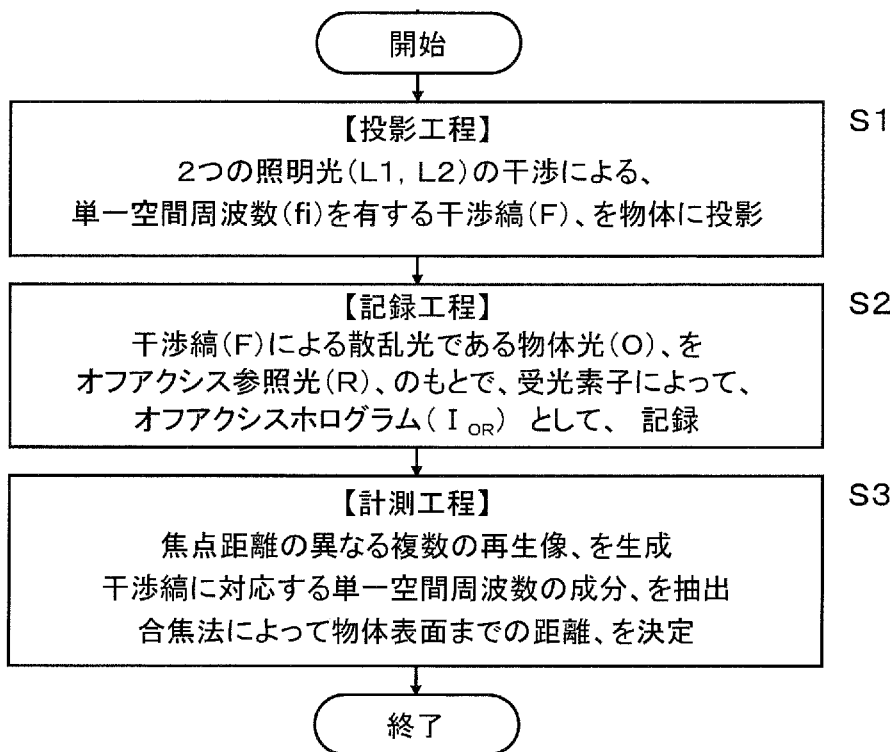
前記記録部によって記録されたデジタルホログラムから焦点距離を変えた複数の再生像を生成し、各再生像における干渉縞 F に対する合焦法の適用によって物体表面の各点までの距離を求める計測部と、を備え、

前記計測部は、前記各再生像から前記干渉縞に対応する単一空間周波数 f_i の成分を空間周波数フィルタリングによって抽出する干渉縞抽出部を備えることを特徴とする3次元形状計測装置。

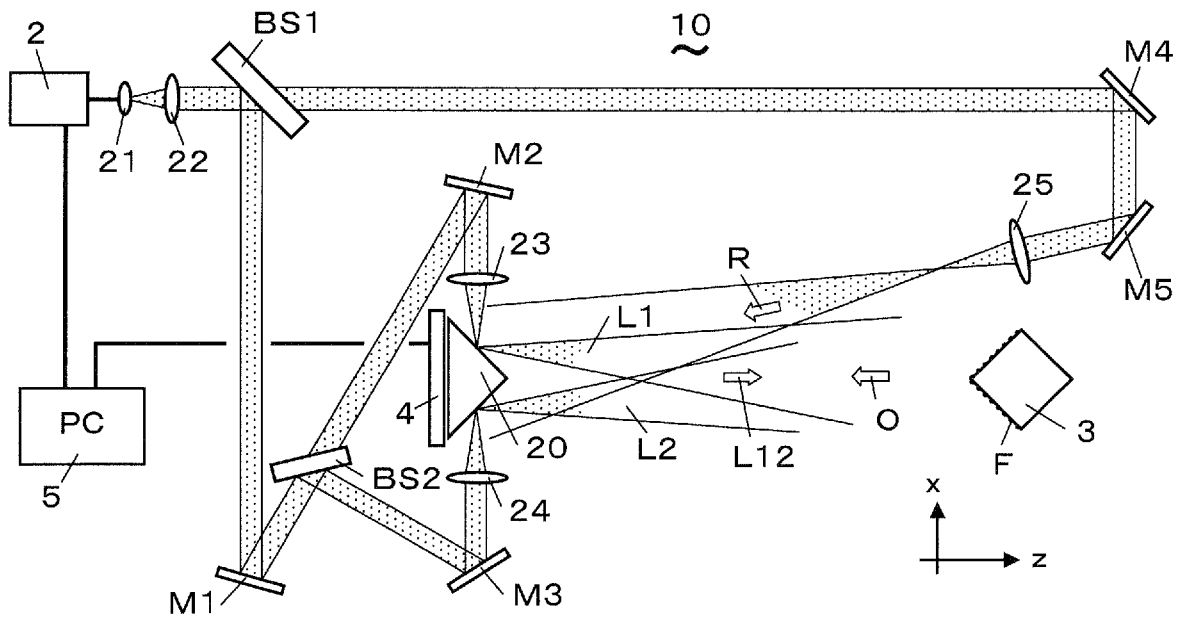
[請求項13]

前記投影部は、物体表面に投影する干渉縞 F を、前記受光素子の受光面から見て物体表面の位置にかかわらず干渉縞 F の配置が一定となるように物体表面に投影することを特徴とする請求項12に記載の3次元形状計測装置。

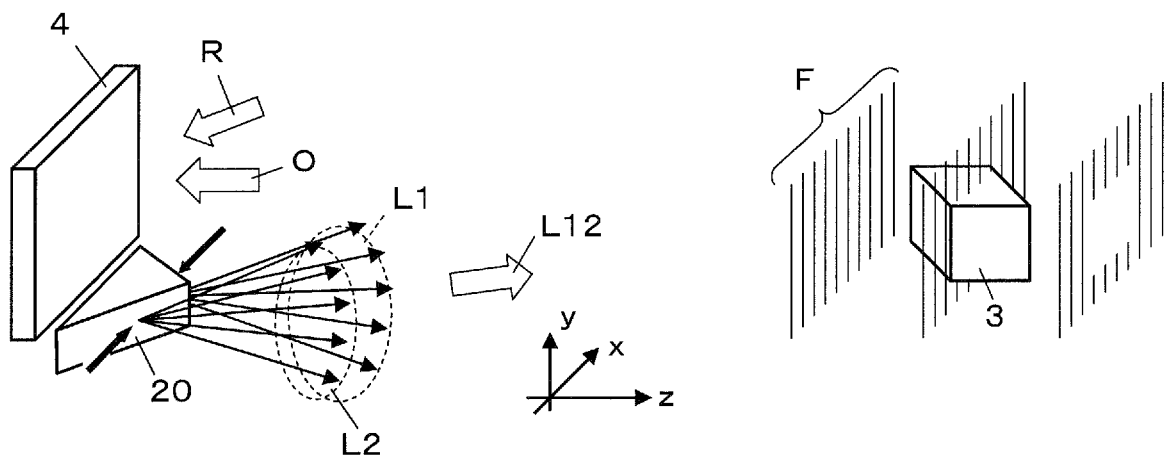
[図1]



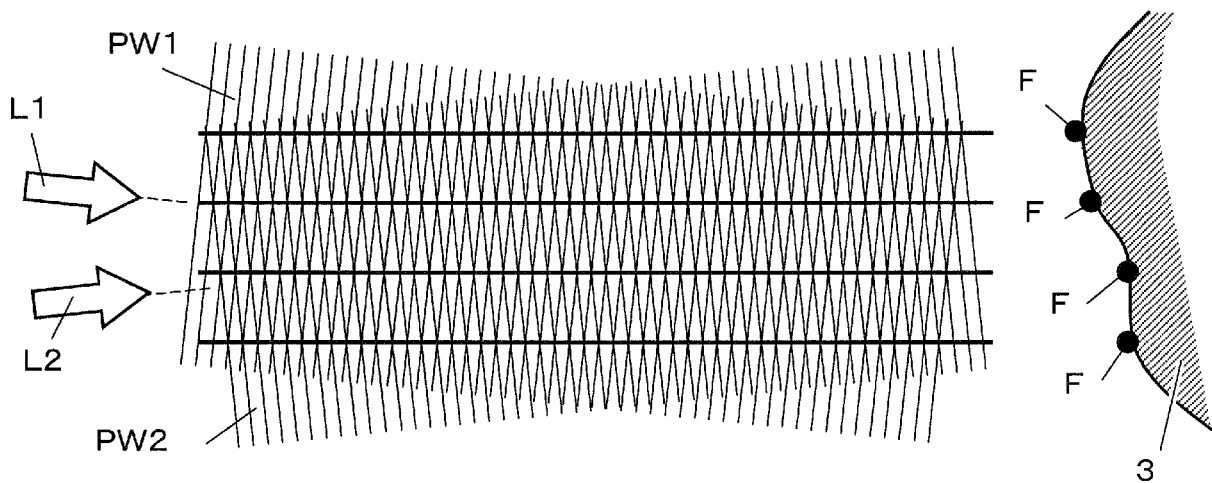
[図2]



[図3]

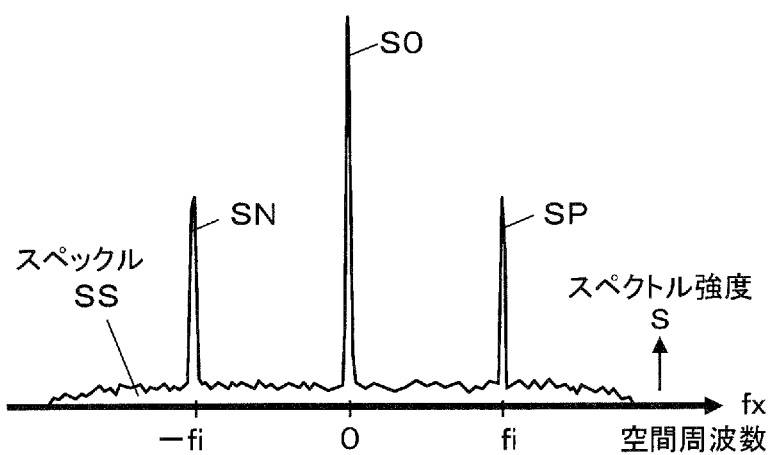


[図4]

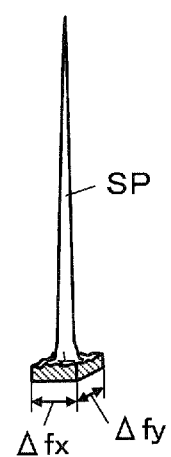


[図5]

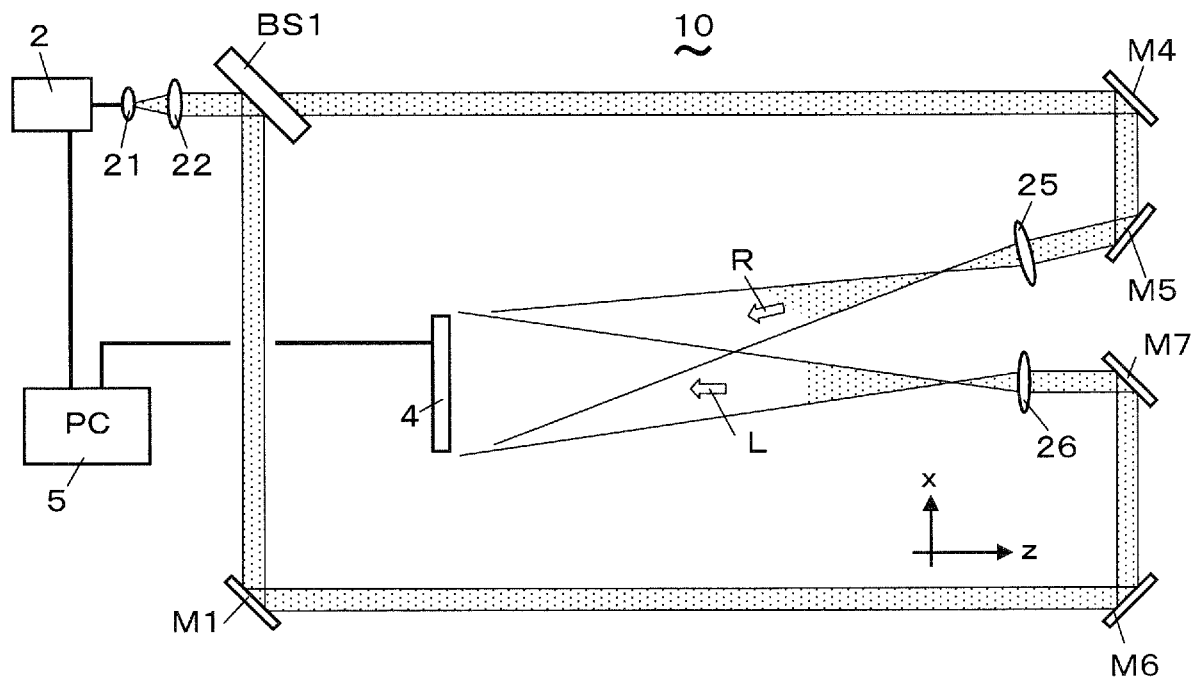
(a)



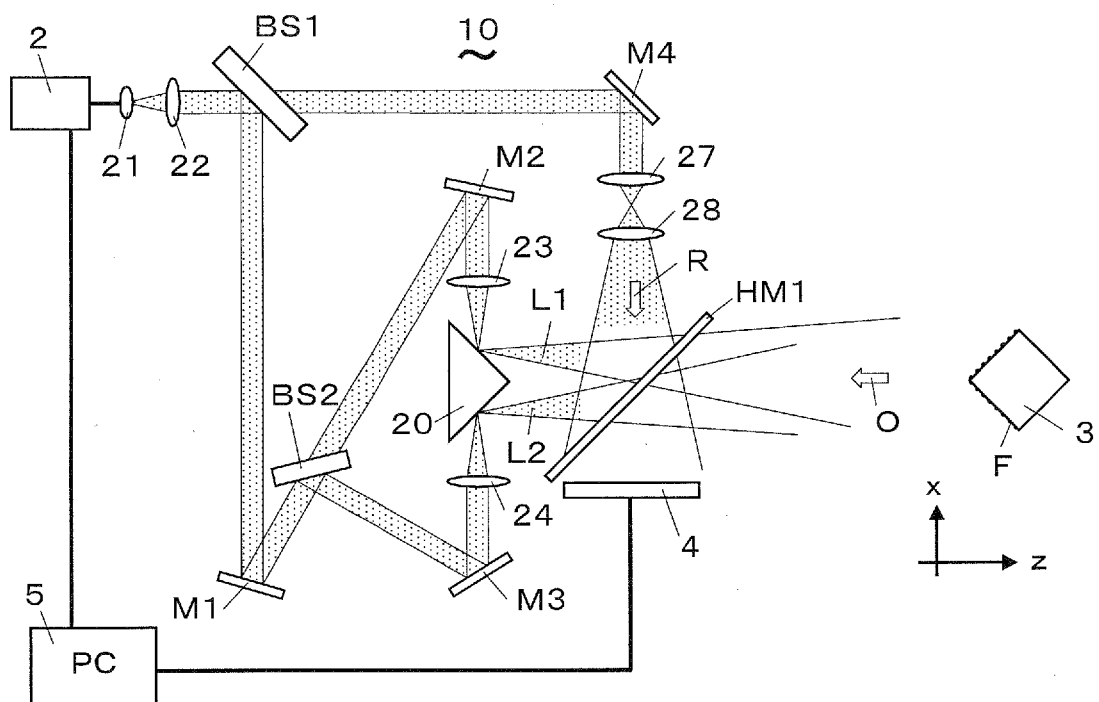
(b)



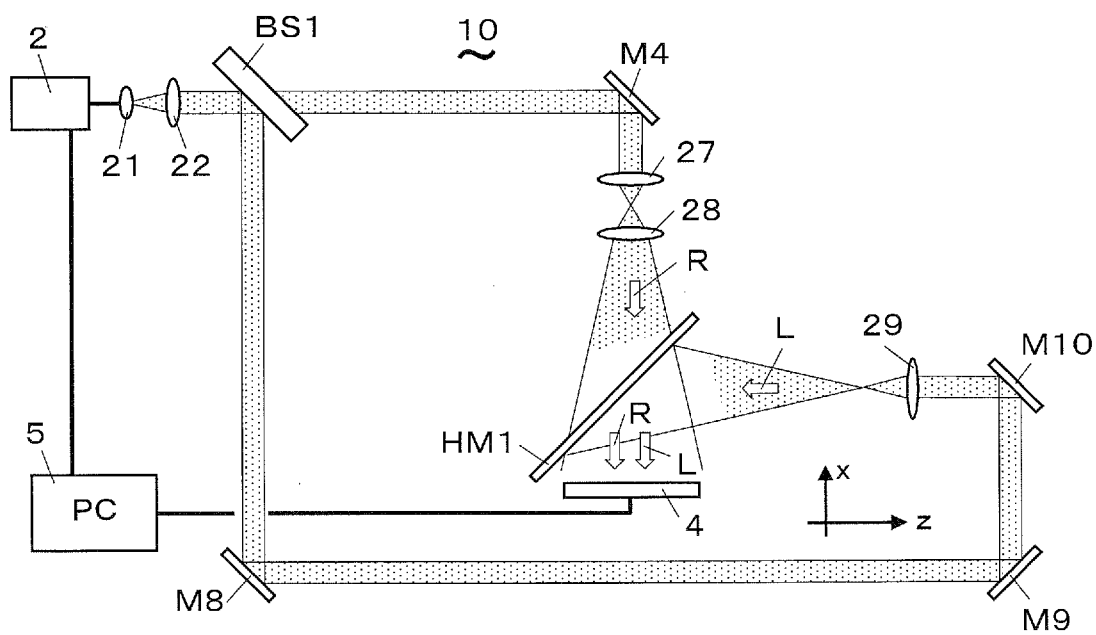
[図6]



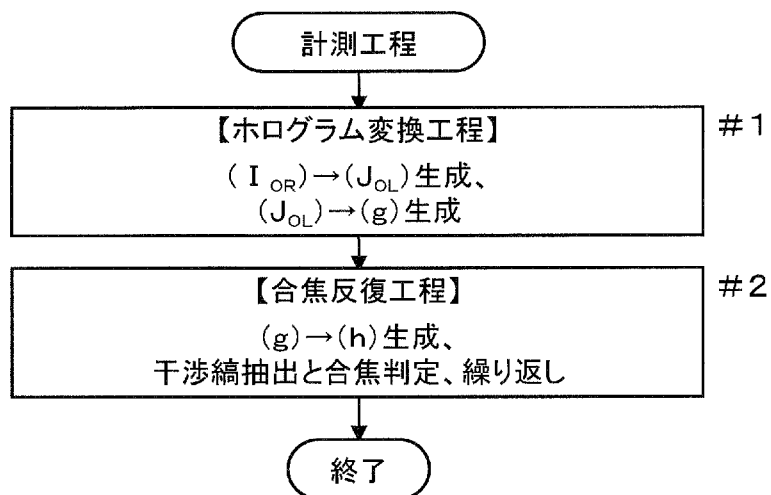
[図7]



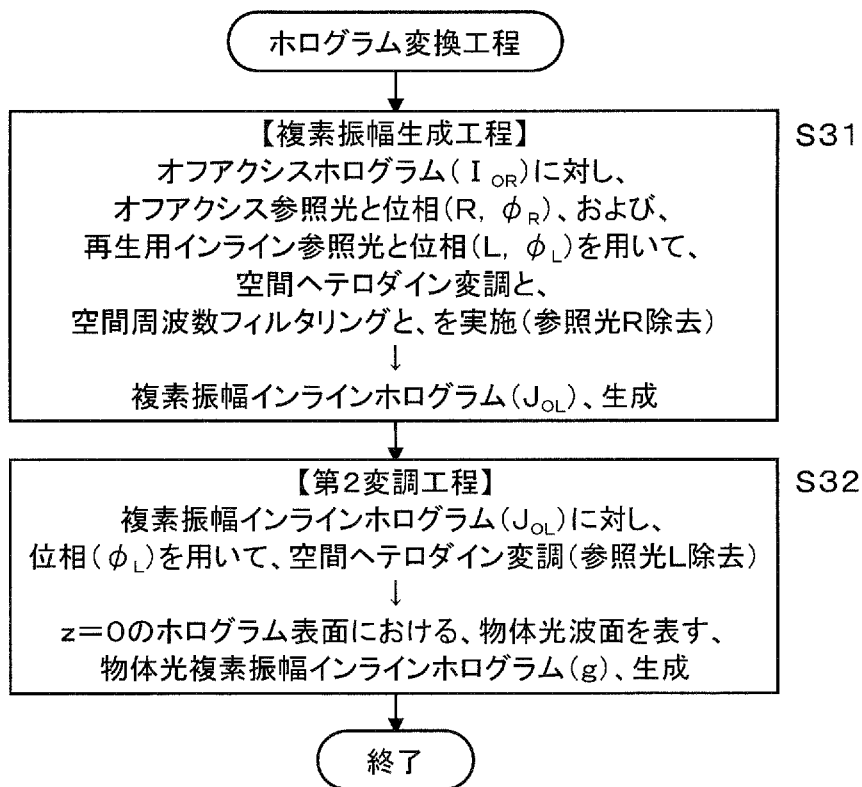
[図8]



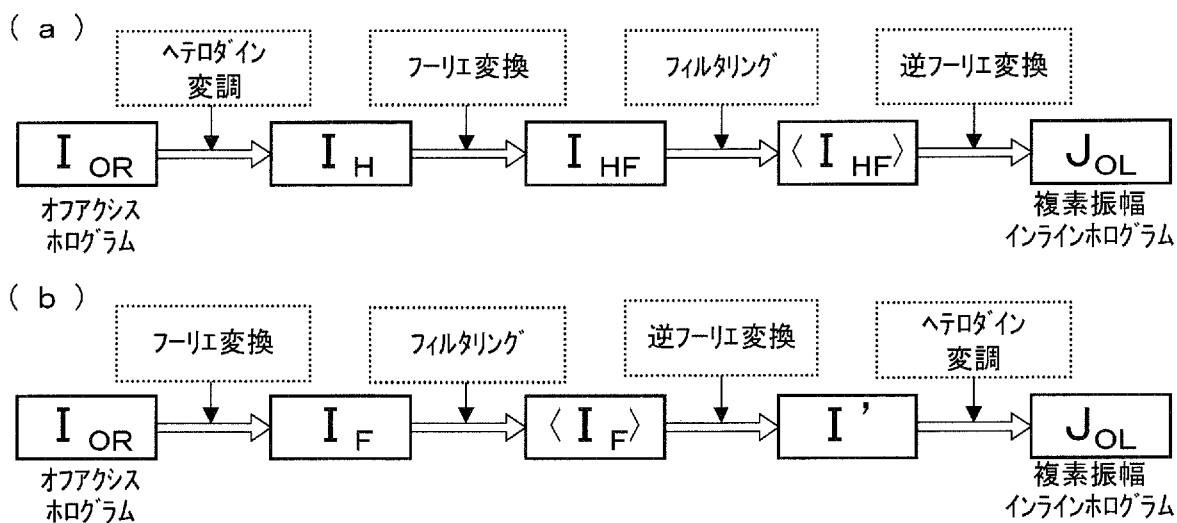
[図9]



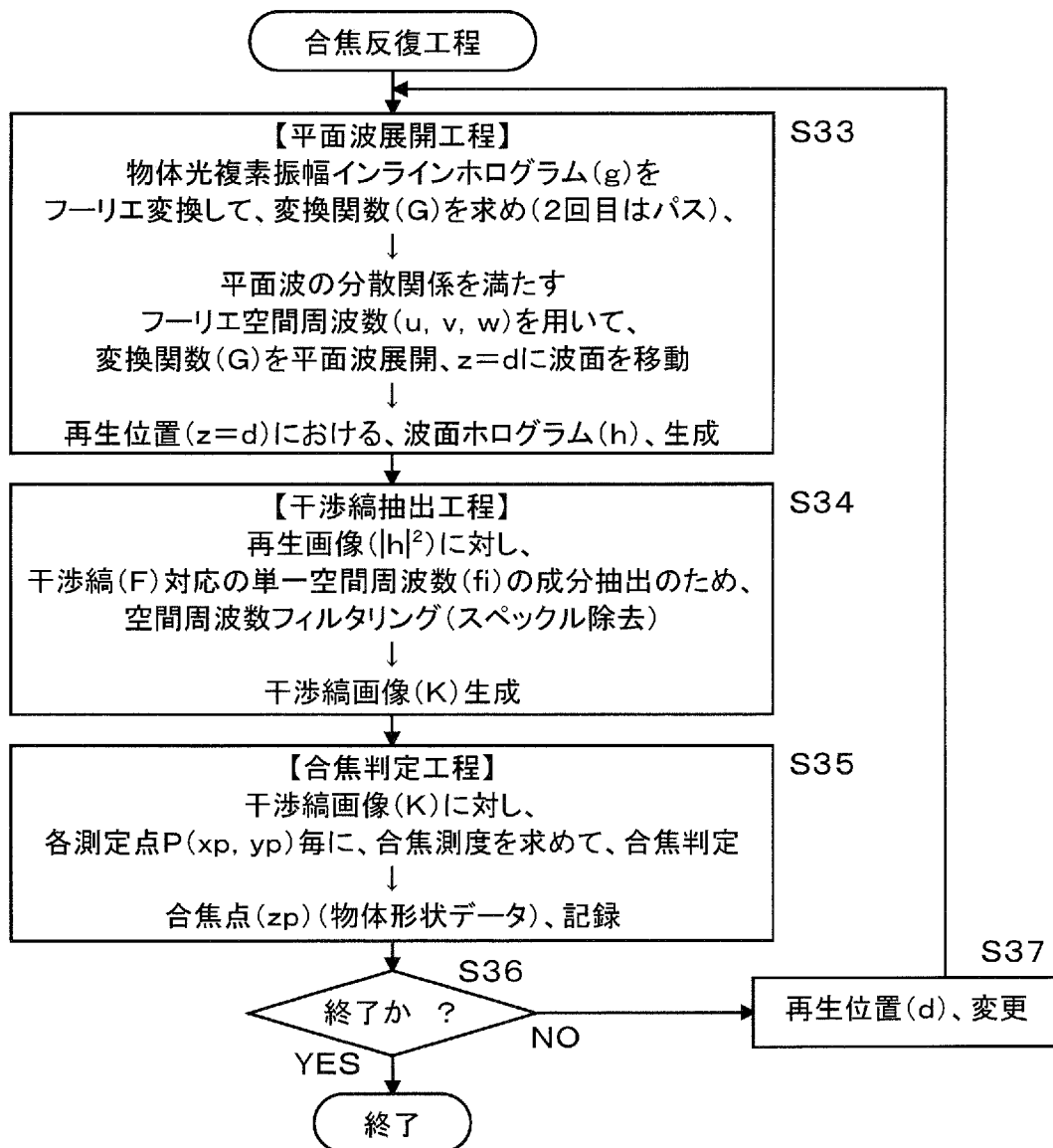
[図10]



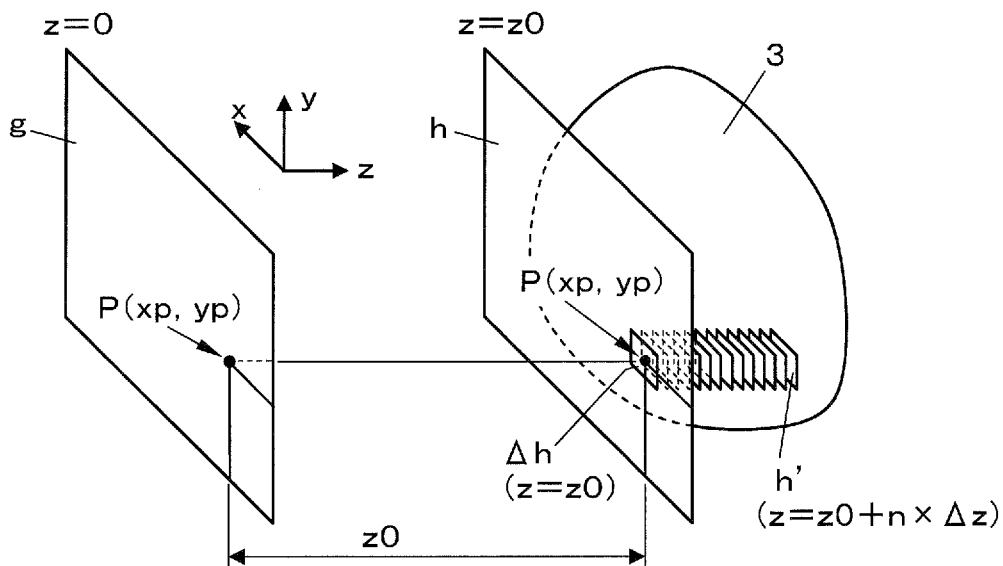
[図11]



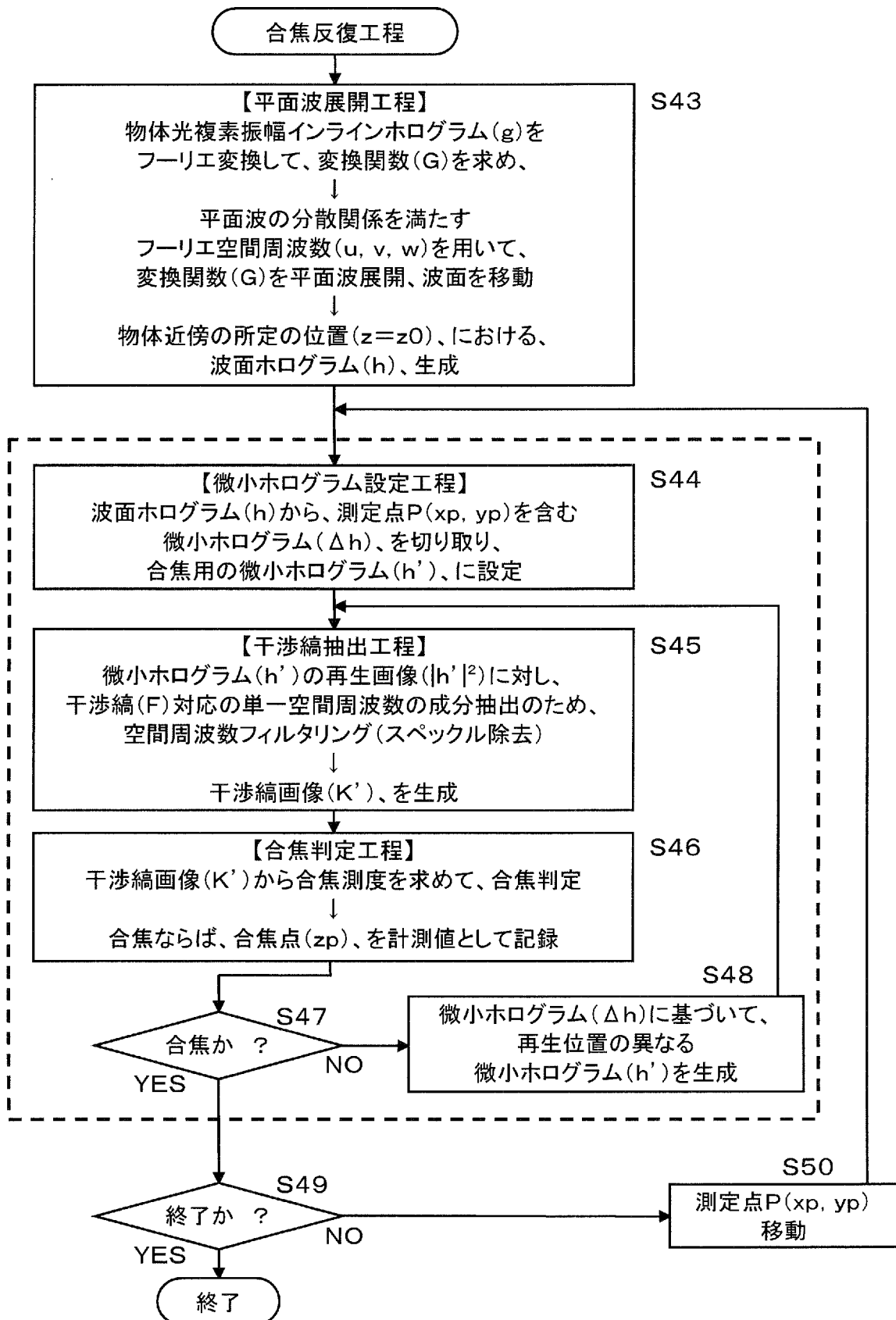
[図12]



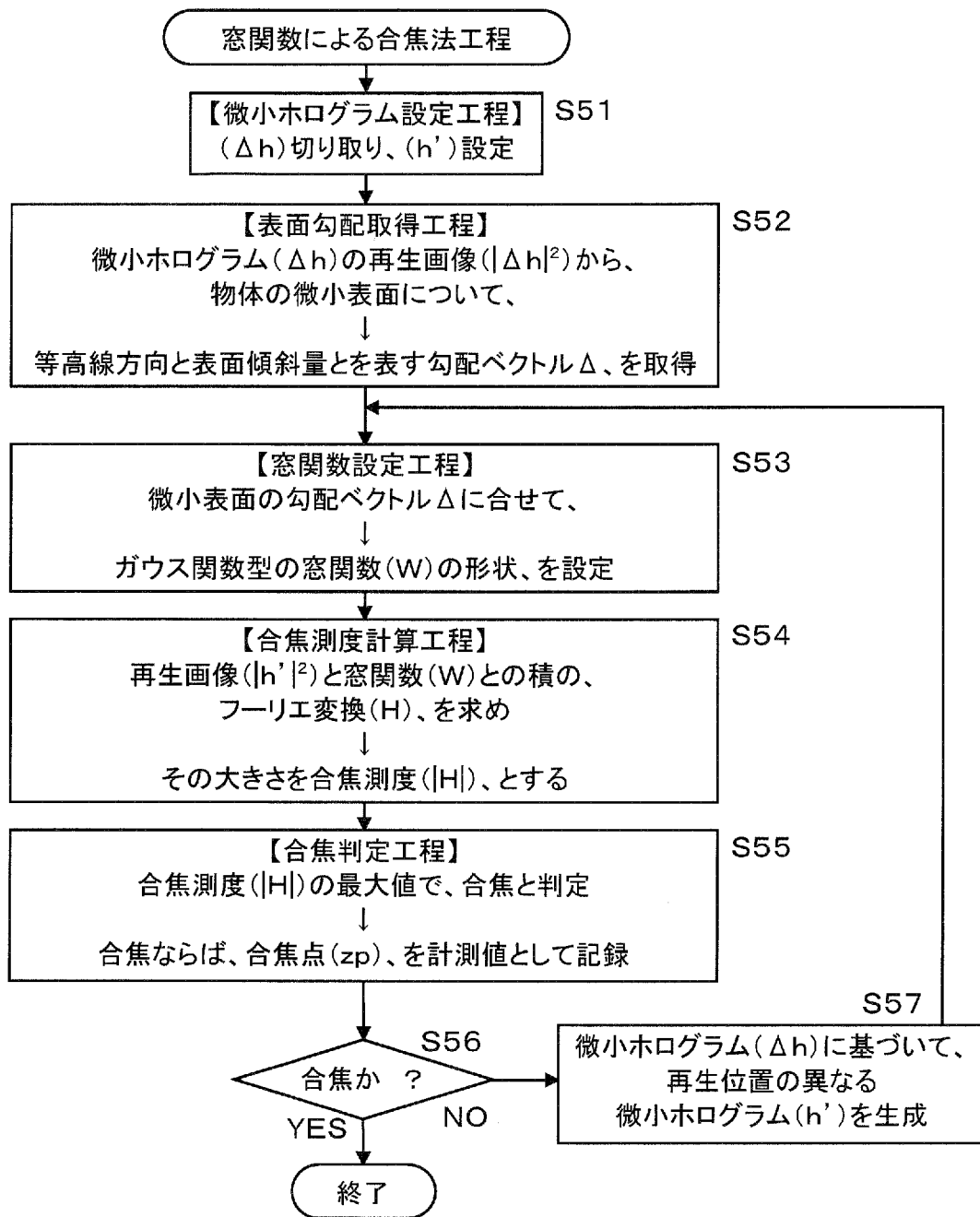
[図13]



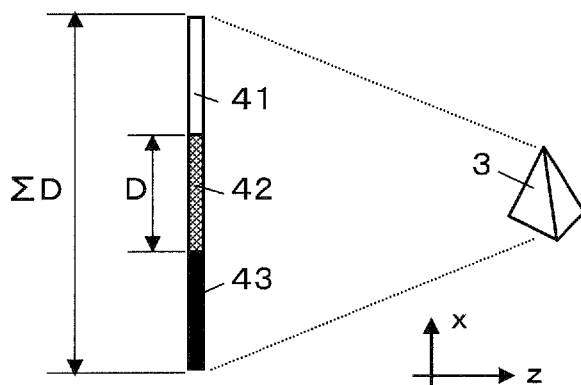
[図14]



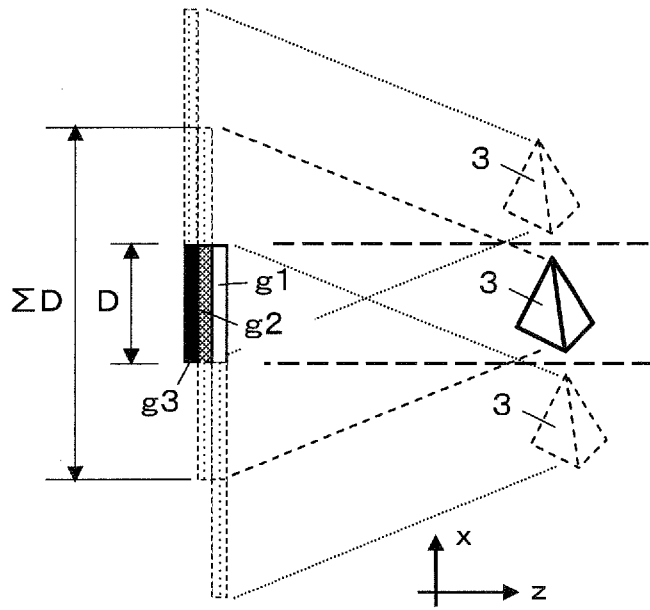
[図15]



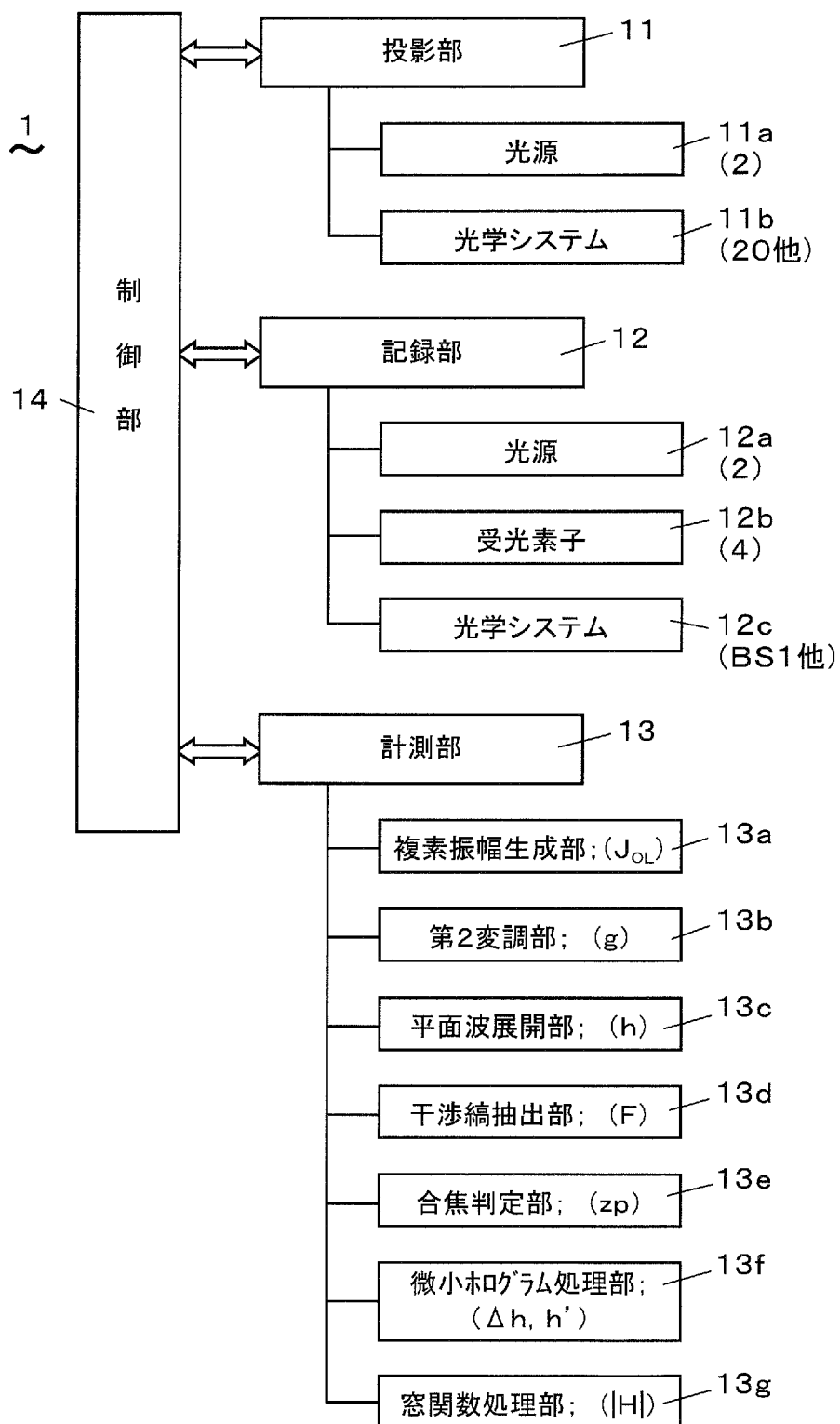
[図16]



[図17]

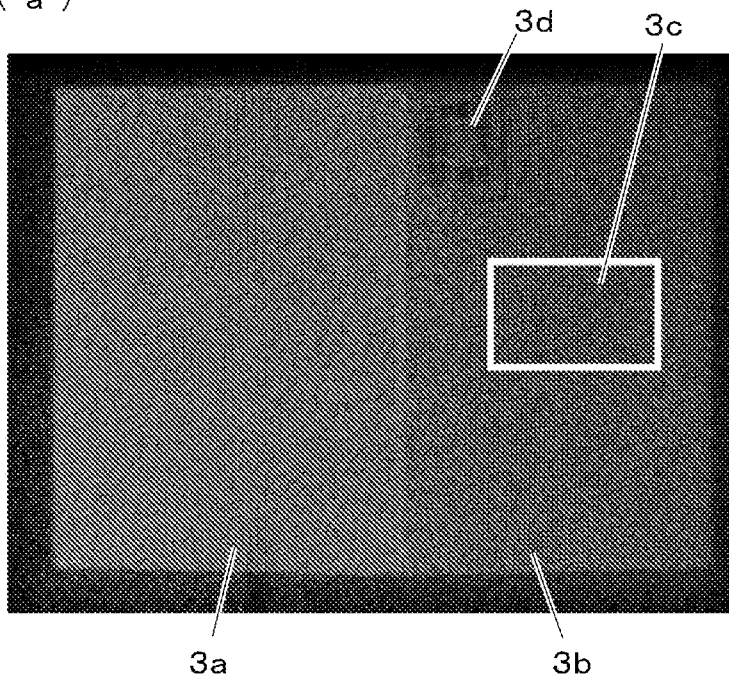


[図18]

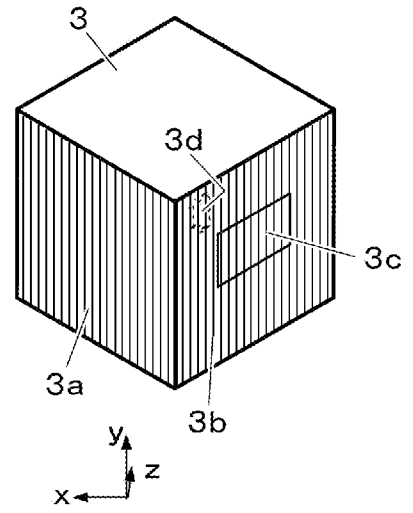


[図19]

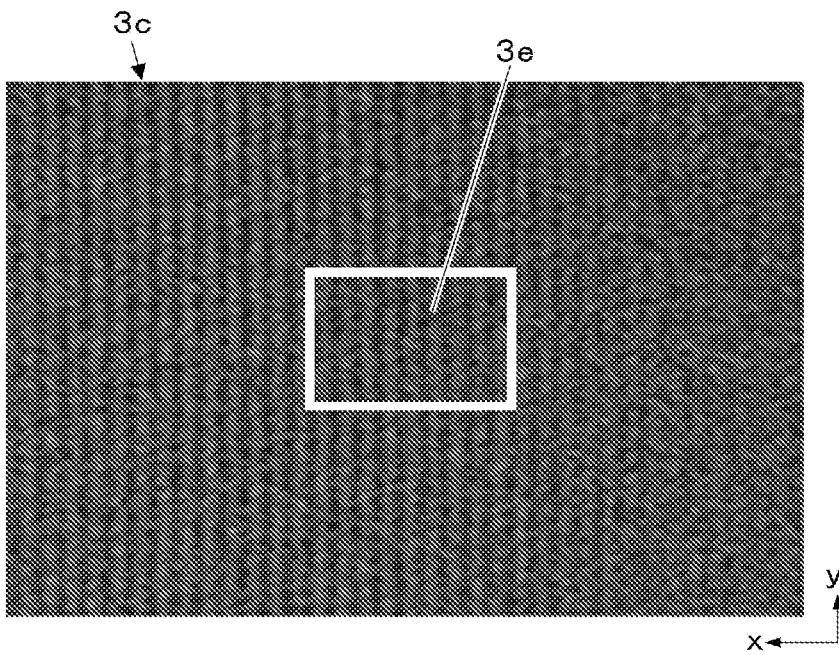
(a)



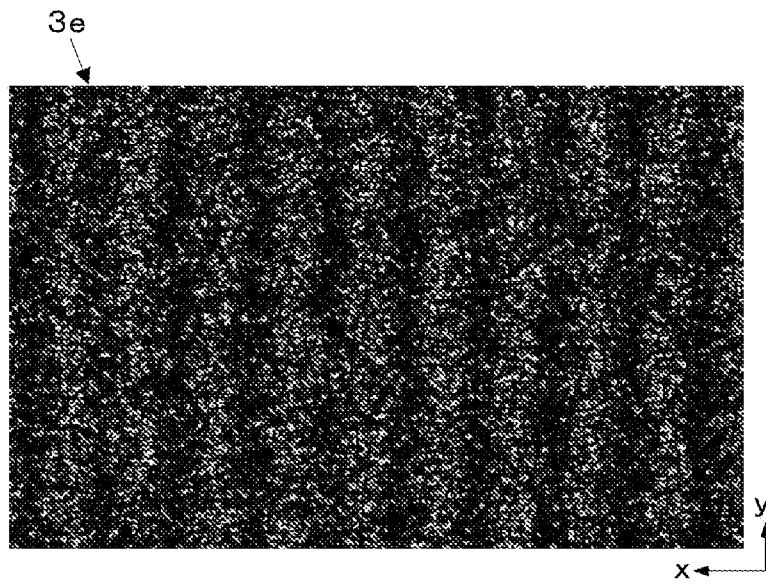
(b)



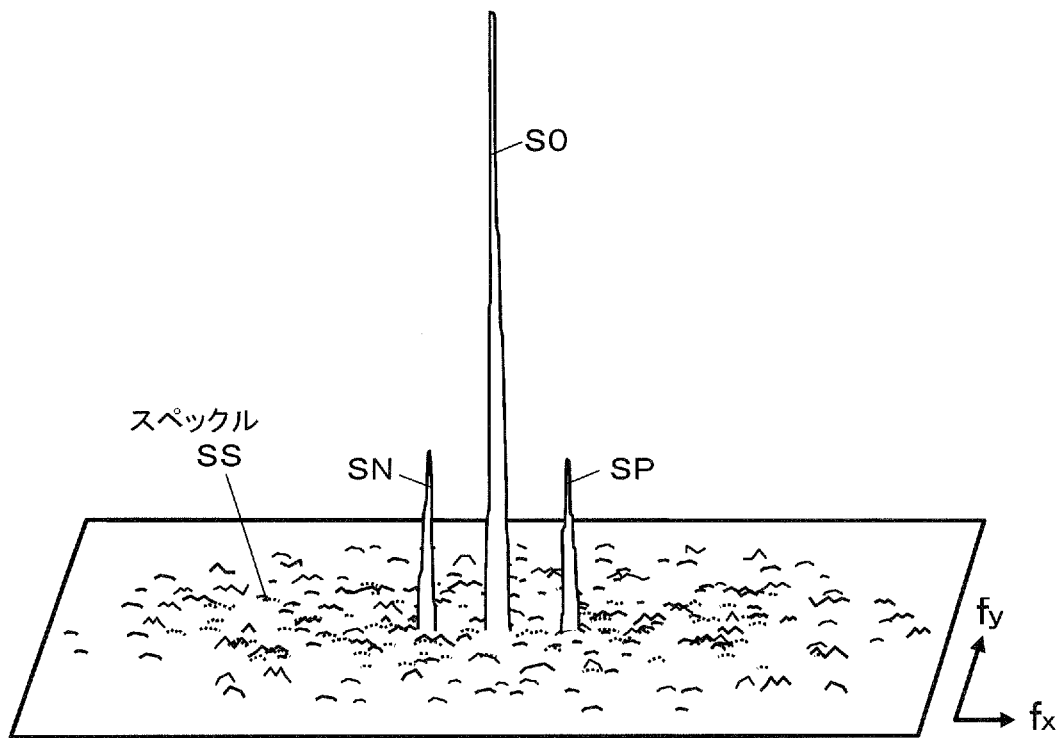
[図20]



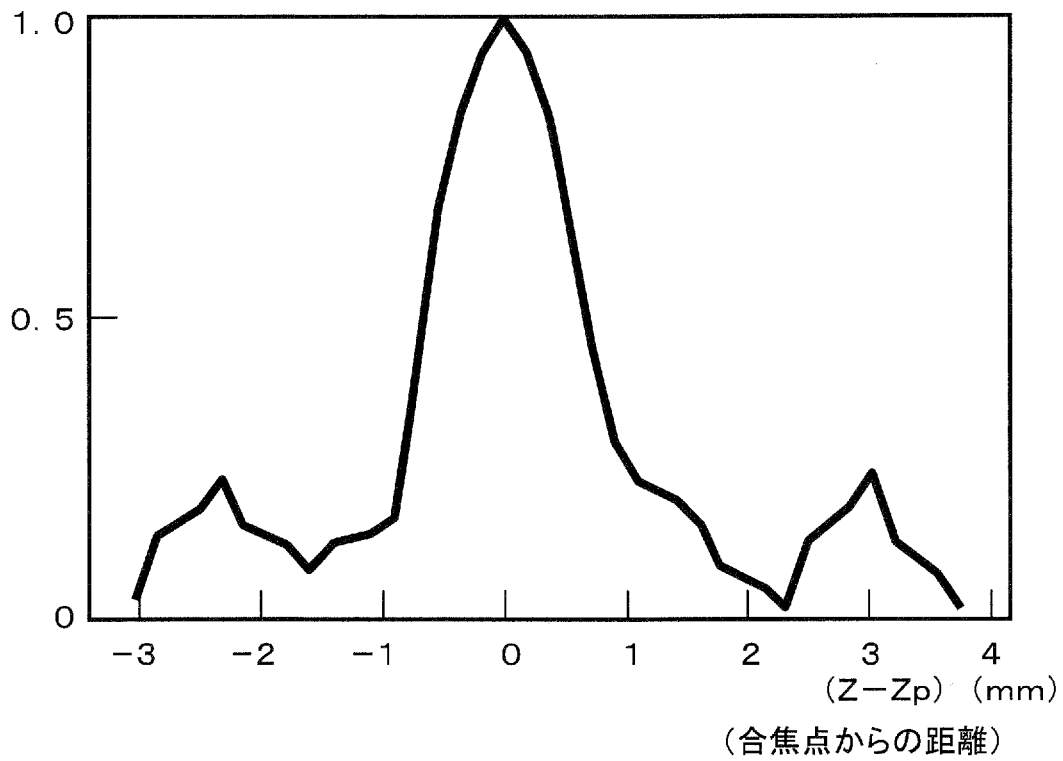
[図21]



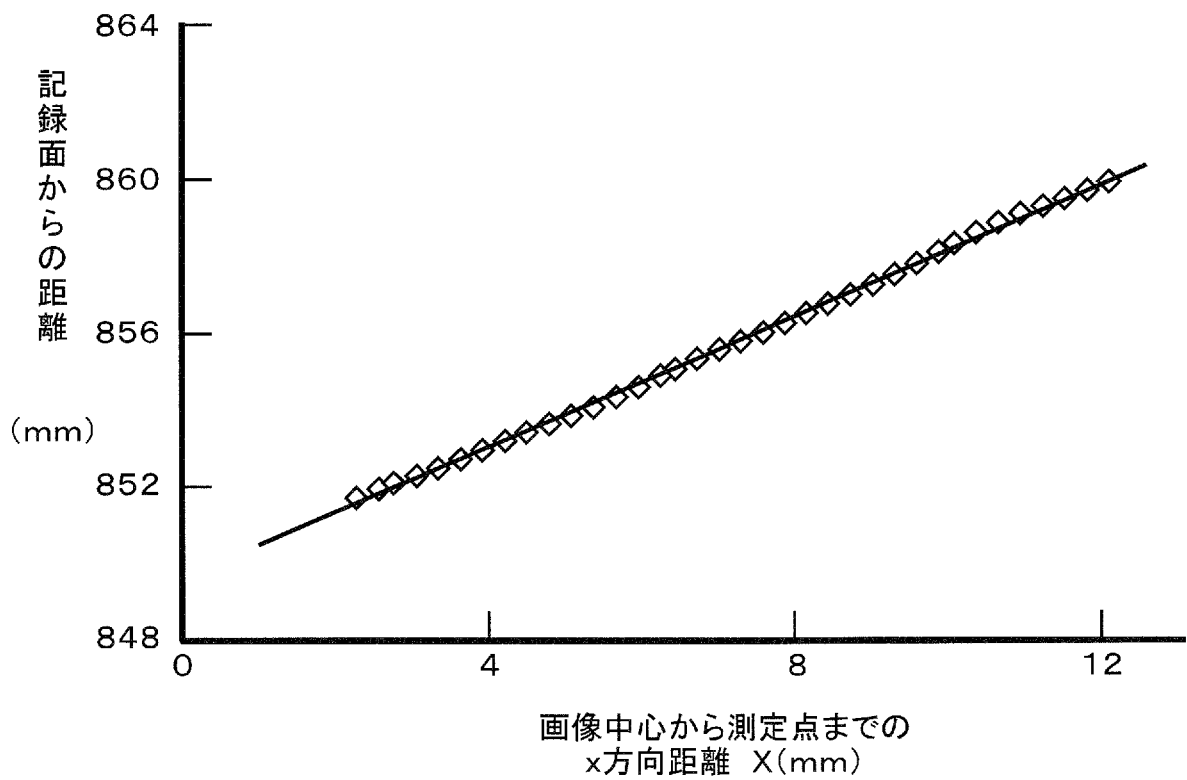
[図22]



[図23]

| $H(f_i, 0, z)$ | (合焦測度)

[図24]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/051125

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G01B11/24(2006.01) i, G01B9/021(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, G01B9/021, G03H1/00-1/34

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. |
|-----------|--|-----------------------|
| P, A | WO 2011/089820 A1 (Hyogo-Ken), 28 July 2011 (28.07.2011), entire text; all drawings (Family: none) | 1-13 |
| P, A | WO 2012/005315 A1 (Hyogo-Ken), 12 January 2012 (12.01.2012), entire text; all drawings (Family: none) | 1-13 |
| A | JP 2007-71793 A (Hitachi Zosen Corp.), 22 March 2007 (22.03.2007), entire text; all drawings (Family: none) | 1-13 |

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
04 April, 2012 (04.04.12)

Date of mailing of the international search report
17 April, 2012 (17.04.12)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2012/051125

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 2007-113974 A (Hitachi Zosen Corp.), 10 May 2007 (10.05.2007), entire text; all drawings (Family: none) | 1-13 |
| A | JP 2003-232619 A (Ricoh Co., Ltd.), 22 August 2003 (22.08.2003), entire text; all drawings (Family: none) | 1-13 |
| A | JP 3-12684 B2 (Director General, Agency of Industrial Science and Technology), 20 February 1991 (20.02.1991), entire text; all drawings (Family: none) | 1-13 |
| A | JP 2002-526815 A (Ecole Polytechnique Federal de Lausanne (EPFL)), 20 August 2002 (20.08.2002), entire text; all drawings & US 6262818 B1 & EP 1119798 A & WO 2000/020929 A1 & DE 69924129 D & DE 69924129 T & AT 290702 T | 1-13 |

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, G01B9/021(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, G01B9/021, G03H1/00-1/34

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 | 1971-2012年 |
| 日本国実用新案登録公報 | 1996-2012年 |
| 日本国登録実用新案公報 | 1994-2012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 |
|-----------------|--|----------------|
| PA | WO 2011/089820 A1 (兵庫県) 2011.07.28, 全文全図 (ファミリーなし) | 1-13 |
| PA | WO 2012/005315 A1 (兵庫県) 2012.01.12, 全文全図 (ファミリーなし) | 1-13 |
| A | JP 2007-71793 A (日立造船株式会社) 2007.03.22, 全文全図 (ファミリーなし) | 1-13 |
| A | JP 2007-113974 A (日立造船株式会社) 2007.05.10, 全文全図 (ファミリーなし) | 1-13 |

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、一般的な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

04.04.2012

国際調査報告の発送日

17.04.2012

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)

櫻井 仁

2S

9008

電話番号 03-3581-1101 内線 3258

| 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 2003-232619 A (株式会社リコー) 2003.08.22, 全文全図 (ファミリーなし) | 1-13 |
| A | JP 3-12684 B2 (工業技術院長) 1991.02.20, 全文全図 (ファミリーなし) | 1-13 |
| A | JP 2002-526815 A (エコール ポリテクニーク フェデラル ドウローザンヌ (エーベーエフエル)) 2002.08.20, 全文全図 & US 6262818 B1 & EP 1119798 A & WO 2000/020929 A1 & DE 69924129 D & DE 69924129 T & AT 290702 T | 1-13 |