

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4724495号  
(P4724495)

(45) 発行日 平成23年7月13日(2011.7.13)

(24) 登録日 平成23年4月15日(2011.4.15)

(51) Int.Cl.

F I

G O 1 D 5/38 (2006.01)

G O 1 D 5/38

A

請求項の数 3 (全 43 頁)

(21) 出願番号	特願2005-247664 (P2005-247664)	(73) 特許権者	000001007
(22) 出願日	平成17年8月29日 (2005.8.29)		キヤノン株式会社
(65) 公開番号	特開2007-64664 (P2007-64664A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43) 公開日	平成19年3月15日 (2007.3.15)	(74) 代理人	100126240
審査請求日	平成20年8月26日 (2008.8.26)		弁理士 阿部 琢磨
		(74) 代理人	100124442
			弁理士 黒岩 創吾
		(72) 発明者	井垣 正彦
			東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤ ノン株式会社内
		(72) 発明者	熱田 暁生
			東京都大田区下丸子3丁目30番2号キヤ ノン株式会社内
		審査官	眞岩 久恵
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光学式エンコーダ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

光源と、前記光源に対して相対的に移動し、前記光源から発光された光束を回折するための第1の回折格子を有するスケールと、複数の受光素子を有し、前記第1の回折格子で回折された回折光束が重畳されて形成される干渉縞を受光し、出力信号を得る受光素子アレイと、前記出力信号から前記光源と前記スケールの相対移動量を演算する演算部と、を有する光学式エンコーダにおいて、

前記第1の回折格子の配列方向を $x$ 、前記第1の回折格子と前記受光素子アレイとのギャップを $z$ 、前記第1の回折格子の開口幅を $d$ 、前記第1の回折格子のピッチを $p$ 、前記光源の波長を $\lambda$ 、前記受光素子アレイに重畳する干渉縞の基本波の周期を $P_0$ としたとき

下記関係式  $I(x, z, d, p, \lambda)$  を含む下記の評価式の $D$ の値が極小値になるように前記第1の回折格子の光学有効開口率 $AR (= d/p)$ が設定されていることを特徴とする光学式エンコーダ。

【数 1】

評価式  $D = \int_0^p \{I(x, z, d, p, \lambda) - I(x - p/2, z, d, p, \lambda)\} dx$

ただし、関係式  $I(x, z, d, p, \lambda)$  は、前記第 1 の回折格子を平行光束で照射する場合は、以下の関係式を満足する。

【数 2】

$$I[x, z, d, p, \lambda] =$$

$$\frac{2d \cos \left[ \frac{2\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right]}{p\pi} +$$

10

$$\frac{2d \cos \left[ \frac{2\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right]}{p\pi} +$$

$$\frac{\cos \left[ \frac{6\pi x}{p} + \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} - \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right] \sin \left[ \frac{2d\pi}{p} \right]}{\pi^2} +$$

20

$$\frac{\cos \left[ \frac{6\pi x}{p} - \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} + \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right] \sin \left[ \frac{2d\pi}{p} \right]}{\pi^2} +$$

$$\frac{2d \cos \left[ \frac{6\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{3d\pi}{p} \right]}{3p\pi} +$$

30

$$\frac{2d \cos \left[ \frac{6\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{3d\pi}{p} \right]}{3p\pi}$$

40

ただし、関係式  $I(x, z, d, p, \lambda)$  は、前記第 1 の回折格子を発散光束で照射する場合は、以下の関係式を満足する。

【数 3】

$$\begin{aligned}
I[x, z, d, p, \lambda] = & \frac{2d \cos \left[ \frac{2\pi \sqrt{x^2 + 4z^2}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{\left(x - \frac{z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right]}{p\pi} + \\
& \frac{2d \cos \left[ \frac{2\pi \sqrt{x^2 + 4z^2}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{\left(x + \frac{z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right]}{p\pi} + \\
& \left( \frac{1}{\pi^2} \cos \left[ \frac{2\pi \sqrt{\left(x + \frac{2z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{\left(x - \frac{z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right] \sin \left[ \frac{2d\pi}{p} \right] + \right. \\
& \left. \frac{1}{\pi^2} \cos \left[ \frac{2\pi \sqrt{\left(x - \frac{2z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{\left(x + \frac{z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right] \sin \left[ \frac{2d\pi}{p} \right] + \right. \\
& \left. \frac{1}{3p\pi} \left( 2d \cos \left[ \frac{2\pi \sqrt{x^2 + 4z^2}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{\left(x - \frac{3z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{9\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{3d\pi}{p} \right] + \right. \right. \\
& \left. \left. \frac{1}{3p\pi} \left( 2d \cos \left[ \frac{2\pi \sqrt{x^2 + 4z^2}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{\left(x + \frac{3z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{9\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{3d\pi}{p} \right] \right) \right) \right)
\end{aligned}$$

10

20

30

40

【請求項 2】

前記第 1 の回折格子を有するスケールは、曲面形状である請求項 1 に記載の光学式エン

50

コーダ。

【請求項 3】

請求項 1 又は 2 に記載の光学式エンコーダを搭載したレンズ装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明はエンコーダに関し、メインスケール上に形成された回折格子に光源からの光束を入射させ、該回折格子からの複数の回折光束の重畳部分に形成される干渉縞の明暗の縞を計数することによって回折格子の移動量を測定するロータリーエンコーダやリニアエンコーダ等の光学式エンコーダに関するものである。

10

【背景技術】

【0002】

従来の光学式エンコーダは一般に、光透過部と不透過部（または光反射部と非反射部）を 1 : 1 の幅をもって所定ピッチで配列した矩形波振幅格子からなるメインスケールを用いている。透過型の光学式エンコーダであれば、このようなスケールに平行光を照射して透過した矩形波パターンの光を更に光透過部と不透過部を所定ピッチで配列した矩形波振幅格子からなるインデックススケールを通して受光する。メインスケールとインデックススケールの相対移動により変調されるインデックススケールの透過光の明暗パターンを受光することにより、相対移動に伴って周期変動する変位信号を得ることができ、この変位信号を処理することにより変位量を測定することができる。一般には、インデックススケールとしては、メインスケール上の矩形波振幅格子と同様に光透過部と不透過部（または光反射部と非反射部）とが 1 : 1 の幅で交互に一定ピッチで配列されたものとされている。

20

【0003】

また、互いに 90° 位相のずれたいわゆる A 相と B 相の正弦波信号を得るように、一対の矩形波振幅格子領域が用意される。更に、よく知られた方法として正弦波信号から直流オフセット電圧を除く為に、A 相の逆相信号（180° 位相差）と B 相の逆相信号（270° 位相差）を得るように合計 4 つの矩形波振幅格子領域が用意される。最近では、インデックススケールとその背後に配設される受光素子を一体化し、同様な機能を包含した受光素子アレイを用いる方式が普及している。

30

【0004】

また、このような測定測置においては、測定分解能をより細分化することが要求されており、付属する計数回路において補間数を増やす手段、すなわち、電気分割手段が講じられている。変位信号の電気分割手段はいくつかの方法があるが、一般的には、変位信号に対する条件として、理想的な正弦波信号を必要とする場合が多い。

【0005】

上述した光学式エンコーダから得られる変位信号は、幾何光学的にはスケール格子の重なりの変化に対応する三角波あるいは台形波になる。特にピッチ寸法が比較的粗い場合には顕著である。また、可干渉性に優れた光源、例えば半導体レーザーを光源に用いた場合にもその傾向が強くなる。いずれの場合においても高次の回折光成分が影響している。このような疑似正弦波信号からなる変位信号は、理想的な正弦波信号波形からのズレ、即ち波形歪が大きく、かつその歪み率は特にメインスケールとインデックススケールの間隔の変動により大きく変動する。この歪み率の変動は、主に変位信号に含まれる奇数次（3 次、5 次、...）の高調波成分によるものであり、このような歪み率変動のある変位信号を用いて位置測定を行うと、大きな補間誤差が発生し位置の測定誤差となる。特に、スケールの格子ピッチが数十  $\mu\text{m}$  オーダーの微細なものになると、メインスケールとインデックススケール間のギャップ変動の影響が大きくなり、数十  $\mu\text{m}$  の僅かなギャップ変動があっても歪み成分が大きく変動することが知られている。従って、ギャップ調整は極めて厳しいものとなる。一方、スケールピッチが 100  $\mu\text{m}$  以上の比較的粗い場合においては微細ピッチの場合に比べて、ギャップ変動に対してその歪み率変動は鈍感である。回折角度がわず

40

50

かであるため有効光束領域に高次の回折光成分が取り込まれ、変位信号には多くの高次の高調波成分を含むことになる。その結果、明瞭な三角波あるいは台形波となり、疑似正弦波と呼ぶにはほど遠い波形となる。その歪率は基本波振幅に対してかなり大きな値となることが知られている。また、半導体レーザー等の可干渉性の高い光源でも高次回折光成分の位相がつぶれることなく再生され同様に変位信号には高調波成分が重畳してしまう。

【0006】

そこで、従来から上述した光学式エンコーダの高調波歪みを低減する方法がいくつか提案されている。例えば、

(1) インデックススケールの光透過部形状を正弦波状としたいわゆる正弦波格子を用いる方法(例えば、特許文献1参照。)

10

(2) インデックススケール側に、奇数次高調波歪を打ち消すような位相差を与えた矩形波格子の対を用いる方法(例えば、特許文献2参照。)

(3) インデックススケール側の光透過部と不透過部の幅を1:1ではなく、高調波歪を相殺できる比率に設定する方法(例えば、特許文献3参照。)、等である。

【0007】

このようにインデックススケール上の矩形波振幅格子の格子形状、開口比、配置、あるいは、同等の機能を果たす受光素子アレイの形状、開口比、配置等の工夫により歪みを除去、低減しようとしたものであった。

【0008】

これらの施策の本質的な歪み低減の作用としては以下のように解釈できる。すなわち、メインスケールに配設された回折格子を単色の光束で照射すると、発生した回折光同士を重ね合わせの結果、このメインスケールの後方空間の回折光束重畳部分で多波光束干渉縞が形成される。この干渉縞の光強度分布には基本波以外の高調波成分が含まれて、先に示した従来の施策は、インデックススケール上に形成されてしまった高調波成分に対して各種手法の光学的な空間周波数フィルタリングを施したことに相当する。

20

【0009】

インデックススケール以外の部品での改善施策としては、メインスケールの後方空間の回折光束重畳部分で形成される多波干渉縞の光強度分布自身に高調波成分が含まれない、もしくは、低減するように、メインスケール上の矩形波振幅格子に改良を加えたいいくつかの方法も提案されている。例えば、

30

(4) メインスケール上の矩形波振幅格子の光透過部と不透過部の幅を1:1ではなく正弦波格子と実質同じ働きをするようにピッチは変えずに光透過部と不透過部の幅を不均一な格子とする方法(例えば、特許文献4参照。)

(5) メインスケール上の矩形波振幅格子の光透過部と不透過部の幅を1:1ではなく2:1の比率に設定する方法(例えば、特許文献5参照。)。等である。

【0010】

また、メインスケールに配設された回折格子を光源からの光束で照射したとき、格子の後方空間(フレネル領域)での回折光束重畳部分で形成される光の強度分布については多くの研究がなされている(例えば、非特許文献1、2参照。)

40

【特許文献1】米国特許第4,782,229号(Fig.6)

【特許文献2】特許2539269号公報(第2図)

【特許文献3】特許3045452号公報(第2図、第3図)

【特許文献4】特許2695623号公報

【特許文献5】特開平09-196705号公報

【非特許文献1】E. Keren, O. Kafri, 1985, "Diffraction effects in moire deflectometry," J. Opt. Soc. Am. A / Vol. 2, No. 2 / February 111-120.

【非特許文献2】光学第16巻第2号(1987年2月)プロキシミティ像の計算法 大木裕史

【発明の開示】

50

**【発明が解決しようとする課題】****【0011】**

しかし、上述の従来技術(1)～(3)の方法は全て受光側のインデックススケール上の矩形波振幅格子を改良して高調波歪を低減するもので、メインスケール自体は従来と変わらない。

**【0012】**

これらの方法は、原理的には、インデックススケール、およびメインスケールに対して、光源からの光束が一樣に照射されていることが前提条件として必要で、その条件下でなければ所望の効果が得られない。メインスケールやインデックススケール上の光源からの照度分布が不均一な場合には従来技術(1)～(3)のいずれの提案も十分な効果が得られない。

10

**【0013】**

また、比較的粗いピッチの場合においては、その除去、低減の効果は更に低いものとなる。更に、製造技術的な観点から(1)の方法では格子パターンそのものを正弦波状に形成することは、微細ピッチの場合特に技術的に難しい。

**【0014】**

本来、変位信号の高調波成分は、メインスケールに配設された回折格子で発生した回折光同士を重ね合わせの結果、回折光束重畳部分に形成される多波光束干渉縞に高次の空間周波数成分が重畳していることに起因している。このことは当業者においては周知の事柄である。

20

**【0015】**

そこで、より効果的な歪み除去、低減方法としては、上記のインデックススケール上に投影された多波光束干渉縞の光強度分布自身に高調波成分が含まれないようにすることが肝要である。すなわち、メインスケールでの回折像について改良を加え、歪みの発生原因を絶つことが有効である。

**【0016】**

この点において、従来技術(4)および(5)の方法は、根本的にインデックススケール上に投影、重畳される干渉縞の光強度分布に高調波成分を含まないように、メインスケール上の矩形振幅格子を改良する施策例である。

**【0017】**

しかし、従来技術(4)では、先の従来技術(1)～(3)と同様にスケール上の照度分布が一樣であることが求められる。メインスケール面上に不均一な開口比を有した格子を適宜分散配置する構成をとるがこの方法では、先に指摘した照度分布ムラの影響を受けてしまう。また、位置検出装置としての検出精度を決定する主要な部品であるメインスケールに対してピッチ精度を高精度に保ち、かつ不均一な開口比を正確に格子パターン形成することは製造技術的にも難しい。

30

**【0018】**

従来技術(5)の方法は、メインスケール上の矩形波振幅格子の開口幅を変更するだけで高調波歪み低減が可能であるとされている。メインスケール上の格子の有効領域全体にわたって一樣に格子の開口幅を変更するので照度ムラがあっても歪み低減効果は失われず、また、メインスケール上のピッチ精度を高精度に保ちつつ所望の開口比を設定することは製造技術的にも容易であり、経済的な効果も大きいと考えられ、実用上かなり有効な手段であると評価できる。

40

**【0019】**

しかし、従来技術(5)の方法、すなわち、光透過部と不透過部の幅を1:1ではなく2:1の比率に設定する方法ではある特定のギャップ位置でしか成立しない。よって、任意のギャップでの歪み低減は不可能であることが詳細なシミュレーションと実験検討により明らかになった。

**【0020】**

この従来技術(5)における問題点については適宜参考文献5の本文、図を引用し、図

50

17 (A)、(B)により以下に従来技術(5)を説明する。

【0021】

図17(A)は全体の主要部の構成を示す図である。図において、メインスケール1は、光透過部11及び不透過部12がピッチPで配列され、かつ光透過部11の幅が $2P/3$ に設定された透過型のメインスケールであり、インデックススケール3は光透過部及び不透過部が1:1の幅をもってピッチPで配列されたインデックススケール3である。

【0022】

この構成において、従来技術(5)では発明の作用、効果は以下のように説明されている。

【0023】

なお、文献引例中、図4は本明細書では図17(B)に置き換えた。

「・・・この実施例においては、前述のようにメインスケール1の光透過部11が $2P/3$ の幅に設定されており、これにより疑似正弦波である変位出力信号の3次高調波が除去される。その原理を図4(図17(B))を参照して説明する。メインスケール1のピッチをPとし、光透過部11の幅を一般にLとして、平行光が照射されたときこのメインスケール1の透過光パターンは、直進光成分のみを考えると、図4(図17(B))に示すように矩形波パターンとなる。このとき変位方向xについての透過光量パターン $I(x)$ は、フーリエ展開によって、次式数1で表される。

【0024】

【数1】

$$I(x) = C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \cos(2n\pi L/P)}{n} \sin(2n\pi x/P) \\ + C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n\pi L/P)}{n} \cos(2n\pi x/P) + D$$

・・・数式1

【0025】

数式1において、C、Dは定数である。このようなメインスケール1の透過光量パターンに対して更に受光側のインデックススケール3による変調がかかって、疑似正弦波出力が得られることになる。数1から明らかなように、最も大きい奇数次の高調波成分である3次高調波、即ち $n=3$ に着目すると、 $L=P/3$ または、 $L=2P/3$ に設定したときに、右辺の第1項、第2項共に係数が0となる。従って、 $L=2P/3$ に設定されたこの実施例によれば、3次高調波成分が除去された、より正弦波に近い変位信号が得られることになる。・・・」

参考文献からの引用部分 終わり。

【0026】

上記参考文献記述に含まれる問題点を整理すると

第一に、数式1で表現された強度パターン $I(x)$ は格子の強度透過率分布を表し、メインスケール直後の光強度分布としては確かにこのような矩形パターンを想定することに問題はないが、図17(A)のように、実際のエンコーダの構成においてはメインスケールとインデックススケールは間隔(ギャップ=z)を設けることになる。その状態でのインデックススケール上に重畳する干渉縞の光強度分布を表していない。

【0027】

すなわち、光強度分布として少なくとも $I(x, z)$ として表現する必要がある。



【 0 0 2 8 】

数式 1 の強度分布  $I(x)$  表現が近似的に成立するのは下記の特設ギャップ位置  $= z_n$  においてのみである。

【 0 0 2 9 】

【 数 2 】

$$z_n = nP^2 / \lambda \quad (n=1,2,3,\dots)$$

10

ただし、 $\lambda$  は光源波長、 $P$  は格子ピッチ。・・・数式 2

【 0 0 3 0 】

この特設ギャップ位置  $z_n$  において現れる、格子の強度透過率分布に比例するこの強度分布はフーリエイメージと呼ばれている。

【 0 0 3 1 】

第二に、従来技術 (5) の説明にしたがって、仮に数式 1 が近似的に成立する上記のフーリエイメージが生成されるギャップ位置  $z_n$  において、メインスケールの光学有効開口比 (= 光透過部と不透過部の幅の比) を 1 : 1 ではなく 2 : 1 の比率に設定した場合を  
20  
考えてみる。変位波形に含まれる 3 次高調波成分の生成に寄与しているのは矩形波振幅格子においては、発生する回折光束の内、強度として無視できないレベルの 0 次、 $\pm 1$  次、 $\pm 2$  次、 $\pm 3$  次回折光成分の組み合わせで、(0、+3)、(0、-3)、(+1、-2)、(-1、+2) で形成される。従来技術 (5) において開口比 2 : 1 (1 : 2 でもよいとされている) の場合には 3 次回折光が次数欠如 (missing order) となるので (0、+3)、(0、-3) の組み合わせは除去される。しかし、(+1、-2)、(-1、+2) の組み合わせでの成分は残存し、(+1、-2)、(-1、+2) が 180° の位相関係でキャンセルされる場合を除いて 3 次成分の歪みが除去されることはない。

【 0 0 3 2 】

30

以上のことから、従来技術 (5) での  $I(x)$  はメインスケール面の透過光パターンをフーリエ展開しているにすぎず、メインスケール後方の回折空間における光の強度分布は示していない。従って、メインスケールの光学有効開口の比を変えることで高次の高調波成分を除去するためには、回折格子の光学有効開口比を「AR」、ギャップ寸法を「z」として、メインスケール上の回折格子の後方に形成される光強度分布：

【 0 0 3 3 】

【 数 3 】

$$I(x, y, z, AR, \lambda)$$

40

・・・数式 3

を明らかにする必要がある。

【 0 0 3 4 】

いわゆる回折理論に基づいた光強度分布を取り扱う必要があるが、その分野の中で、特に「格子のフレネル領域で回折像」に関する研究は、一般刊行物 (学会論文、あるいは書籍等) の中で詳しく研究されている。(例えば、非特許文献 1, 2 参照。)。しかし、回折格子の開口幅と高調波歪みに関する検討例は少ない。

50

## 【 0 0 3 5 】

この発明は、上記の事情を考慮してなされたもので、

- ・回折格子による干渉像について関係式  $I(x, y, z, AR, \quad)$  を簡便な方法で導くこと、
- ・メインスケール上の矩形波振幅格子の開口比：  $AR$  とギャップ：ギャップ：  $z$  に配置されたインデックススケール上の干渉像の  $x$  方向光強度分布  $I(x)$  に含まれる高調波歪み：  $D$  を定量的に把握し、それらの関係を明らかにすること、
- ・その結果に基づいて、適切なギャップ位置（  $z$  ）において、メインスケール上の矩形波振幅格子の開口比：  $AR$  を制御することで効果的に変位信号の高調波歪みを低減、除去して高精度化を図った光学式エンコーダを提供することを目的としている。

10

## 【課題を解決するための手段】

## 【 0 0 3 6 】

上記課題を解決するために、本発明の光学式エンコーダは、光源と、前記光源に対して相対的に移動し、前記光源から発光された光束を回折するための第1の回折格子を有するスケールと、複数の受光素子を有し、前記第1の回折格子で回折された回折光束が重畳されて形成される干渉縞を受光し、出力信号を得る受光素子アレイと、前記出力信号から前記光源と前記スケールの相対移動量を演算する演算部と、を有する光学式エンコーダであって、

前記第1の回折格子の配列方向を  $x$ 、前記第1の回折格子と前記受光素子アレイとのギャップを  $z$ 、前記第1の回折格子の開口幅を  $d$ 、前記第1の回折格子のピッチを  $p$ 、前記光源の波長を  $\lambda$ 、前記受光素子アレイに重畳する干渉縞の基本波の周期を  $PO$  としたとき

20

下記関係式  $I(x, z, d, p, \lambda)$  を含む下記の評価式の  $D$  の値が極小値になるように前記第1の回折格子の光学有効開口率  $AR (= d / p)$  が設定されていることを特徴とする光学式エンコーダ。

## 【数1】

$$\text{評価式} \quad D = \int_0^p \{I(x, z, d, p, \lambda) - I(x - po/2, z, d, p, \lambda)\} dx$$

30

ただし、関係式  $I(x, z, d, p, \lambda)$  は、前記第1の回折格子を平行光束で照射する場合は、以下の関係式を満足する。

【数 2】

$$I[x, z, d, p, \lambda] =$$

$$\frac{2d \cos \left[ \frac{2\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right]}{p\pi} +$$

10

$$\frac{2d \cos \left[ \frac{2\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right]}{p\pi} +$$

$$\frac{\cos \left[ \frac{6\pi x}{p} + \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} - \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right] \sin \left[ \frac{2d\pi}{p} \right]}{\pi^2} +$$

20

$$\frac{\cos \left[ \frac{6\pi x}{p} - \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} + \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right] \sin \left[ \frac{2d\pi}{p} \right]}{\pi^2} +$$

$$\frac{2d \cos \left[ \frac{6\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{3d\pi}{p} \right]}{3p\pi} +$$

30

$$\frac{2d \cos \left[ \frac{6\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi z \sqrt{1 - \frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{3d\pi}{p} \right]}{3p\pi}$$

40

ただし、関係式  $I(x, z, d, p, \lambda)$  は、前記第 1 の回折格子を発散光束で照射する場合は、以下の関係式を満足する。

【数 3】

$$\begin{aligned}
I[x, z, d, p, \lambda] = & \frac{2d \cos \left[ \frac{2\pi \sqrt{x^2 + 4z^2}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{\left(x - \frac{z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right]}{p\pi} + \\
& \frac{2d \cos \left[ \frac{2\pi \sqrt{x^2 + 4z^2}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{\left(x + \frac{z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right]}{p\pi} + \\
& \left( \frac{1}{\pi^2} \cos \left[ \frac{2\pi \sqrt{\left(x + \frac{2z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{\left(x - \frac{z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right] \right) + \\
& \left( \frac{1}{\pi^2} \cos \left[ \frac{2\pi \sqrt{\left(x - \frac{2z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{4\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{\left(x + \frac{z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{d\pi}{p} \right] \right) + \\
& \frac{1}{3p\pi} \left( 2d \cos \left[ \frac{2\pi \sqrt{x^2 + 4z^2}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{\left(x - \frac{3z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{9\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{3d\pi}{p} \right] \right) + \\
& \frac{1}{3p\pi} \left( 2d \cos \left[ \frac{2\pi \sqrt{x^2 + 4z^2}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{\left(x + \frac{3z\lambda}{p}\right)^2 + z^2 \left(1 + \sqrt{1 - \frac{9\lambda^2}{p^2}}\right)^2}}{\lambda} \right] \sin \left[ \frac{3d\pi}{p} \right] \right)
\end{aligned}$$

【発明の効果】

【0052】

10

20

30

40

50

従来、光学式エンコーダにおいてその出力信号波形に高調波歪み除去、低減を目的に、回折格子の光学有効開口比で正確に高調波歪み成分を除去できるものは無かった。

【0053】

本発明では、スカラー回折理論に基づいて格子後方空間の光強度分布  $I(x, y, z, AR)$  を求め、その中の高調波成分が最小となるギャップ位置を開口比  $AR$  との関係で決定し、その値でギャップ設定することで狙った成分の低減除去が正確に行われる。

【0054】

特に、最も波形歪みに影響の大きい3次高調波成分除去においてその効果は絶大である。

【0055】

また、メインスケール上の格子の光学有効開口比制御のみで効果が得られるので経済的である。メインスケール全域にわたって均一な開口比を作り込むので従来技術のように不均一に開口を作り込む必要はなく、等間隔で均一にピッチ、および開口幅を形成、製造することの方が容易である。

【0056】

更に、他の波形歪み除去手段と併用することが容易で全体の歪み除去効果が更に高まる。例えば、従来技術にみられるインデックススケールによる光学的なフィルタリングを同時に実施することで除去成分を分担して対策することも可能となる。本発明によるメインスケールで3次高調波成分を除去し、インデックススケールで5次成分を除去するように構成することも可能となる。

【0057】

本発明は、適用するスケールとして、透過、反射両方のタイプで適用可能であり、また、実施形で示したりニアタイプに制限されるものではなく、ロータリタイプの放射状格子にも適用可能である。また、円筒曲面に配置した円筒スケールに対しても曲面の影響をある程度考慮して同様に適用可能である。

【0058】

また、メインスケールを照射する光束についても平行光束照明に限らず、発散光束でメインスケールを照明するタイプへも適用可能で同様の効果が得られ、照明系のタイプに応じて本発明の基本的な考え方を適用することで対応可能である。

【発明を実施するための最良の形態】

【0059】

本発明は光学式エンコーダのメインスケール上の格子形状に対して変更を加え、このスケール透過後の後方空間においてスケール変位方向  $x$  について光学的な強度分布高調波歪みの最小となる回折格子の開口率  $AR$  およびギャップ位置  $z$  を算出し、メインスケールの開口率  $AR$  とそのギャップ位置  $z$  にインデックススケールを配置するようにした。

【0060】

具体的な方法を以下に示す。

【実施例】

【0061】

実施例1)

以下、本発明の実施の形態を、図面に従って説明する。図1には、本実施形態の光学式エンコーダの概略構成が示されている。等間隔の格子が形成されたメインスケール110は、移動する測定対象物に固定され、図中矢印で示す格子配列方向 ( $x$  軸方向) に移動する。また、メインスケール110は、光源112からの光を受けて、後方に干渉縞を形成する。本実施例では、メインスケール110に形成された格子は、矩形波振幅格子 (第1格子) として機能する。

【0062】

受光素子アレイ114は、メインスケール110の回折によって干渉縞が形成される位置に固定配置される。受光素子アレイ114上には、格子状に受光素子が4つの領域に配列されている。図中、上下および左右、4つの受光素子エリアについて説明する。

## 【 0 0 6 3 】

図中、上右側の受光素子（以下 a 相受光素子）1 1 6 と上左側の受光素子（b 相受光素子）1 1 7 と下右側の受光素子（c 相受光素子）1 1 8 と下左側の受光素子（d 相受光素子）1 1 9 は、それぞれ干渉縞のピッチに等しいピッチで格子が形成され、互いに 1 / 4 ピッチ、すなわち 9 0 ° の位相をもって配置されている。a 相を基準にした場合、b 相は 9 0 度、c 相は 1 8 0 度、d 相は 2 7 0 度の位相関係にある。各 a 相、b 相、c 相、d 相受光素子 1 1 6 , 1 1 7 、1 1 8 、1 1 9 は光を受けると、その光量に応じた電圧を発生する。従って、スケール 1 1 0 の移動と共に a 相～d 相受光素子 1 1 6 ～1 1 9 は変動する電圧信号を出力する。このように、格子状に形成された A 相～D 相受光素子 1 1 6 ～1 1 9 は、a 相～d 相検出用光学格子を有するインデックススケール 1 2 0（第 2 格子）に置き換え、その後方にそれぞれの検出用光学格子に対応した受光素子 a～d を配置した構成にしても良い。a 相～d 相受光素子 1 1 6 ～1 1 9 の出力信号は、電気回路ユニット 1 2 1 に送出される。

10

## 【 0 0 6 4 】

図 2 には、電気回路ユニット 1 2 1 の概略回路構成が示されている。

## 【 0 0 6 5 】

電気回路ユニット 1 2 1 は、光源 1 1 2 の発光回路、アナログ信号処理部 1 2 3、およびスケール 1 1 0 の移動量を算出して測定対象物の位置を求める位置演算部 1 2 2 とを含む。

## 【 0 0 6 6 】

アナログ信号処理部 1 2 3 では、各受光素子の増幅回路、逆位相の受光素子、すなわち、a 相と c 相、の差動出力として A 相を、b 相と d 相との差分として B 相の出力信号を得ている。位置演算部 1 2 2 に入力されるアナログ信号処理部 2 3 からの出力信号 V A , V B は、交流成分 V a , V b と、直流成分 V r e f 2 に分けることができる。

20

## 【 0 0 6 7 】

位置演算部 1 2 2 は、まず、A 相（V A = V a + V r e f 2）または B 相（V B = V b + V r e f 2）の出力信号から、信号のピークを計数して回折による干渉縞の通過した本数を得る。干渉縞のピッチに計数した本数を乗じれば、スケール 1 1 0 の移動量がおおよそ分かる。干渉縞ピッチ以下の移動量の算出は、A 相および B 相の出力信号の交流成分に基づき、位相角を算出することによって求められる。

30

## 【 0 0 6 8 】

この実施例では A、B 相の正弦波状信号を逆正接演算して逆正接値（A r c T a n 値）を求め位相角を算出している。

## 【 0 0 6 9 】

図 3 には、本発明を適用した部品であるメインスケール 1 1 0 の断面図を示す。

## 【 0 0 7 0 】

メインスケール 1 1 0 に配設された回折格子は等間隔の格子が配設され、ピッチ寸法を P とした矩形波振幅格子で、光透過部の幅 d（＝光学有効開口幅）としている。ピッチ寸法 P に対する光学有効開口幅の占める割合＝光学有効開口率（A p e r t u r e R a t i o）を A R とし、以下のように定義する。

40

## 【 0 0 7 1 】

## 【数 8】

$$AR = \frac{d}{P} \times 100 \quad (\%)$$

・・・数式 4

50

## 【 0 0 7 2 】

このメインスケールに光源 1 1 2 から発散放射された光束はコリメータレンズ 1 1 3 により略平行光束となってメインスケール 1 1 0 に照射される。このとき、メインスケールの変位方向を x 軸、ギャップ方向を z 軸にとり、メインスケール 1 1 0 の強度透過率分布  $I(x, z)$  は、 $z = 0$  において、図 3 下に示すような矩形パターンとなり、下記のように表される。

## 【 0 0 7 3 】

## 【 数 9 】

$$I(x, 0) = C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1 - \cos(2n\pi a/P)}{n} \sin(2n\pi x/P) \\ + C \cdot \sum_{n=1}^{\infty} \frac{\sin(2n\pi a/P)}{n} \cos(2n\pi x/P) + D$$

C, D は定数・・・ 数式 3

10

## 【 0 0 7 4 】

本発明ではメインスケールの開口率 AR を主要設計パラメーターとして扱い、ターゲットとした高調波歪み成分が最小となるように AR の値が最適化される。本実施例では変位信号である、A、B 相信号に含まれる不要な 3 次高調波成分の振幅低減を目的としており以下にその低減方法を示す。

## 【 0 0 7 5 】

この目的のために、はじめに、本発明での回折計算の方法について簡単に説明する。

## 【 0 0 7 6 】

本発明では、メインスケールに配設された回折格子を光源からの光束で照射したとき、その格子により発生した回折光同士の自然な重ね合わせの結果、格子の後方空間の回折光束重畳部分で形成される光の強度分布について回折計算を行っている。

30

## 【 0 0 7 7 】

回折理論には、光の偏光状態や開口の電磁気学的性質の影響を無視したスカラー回折理論とそれらの影響を考慮したベクトル回折理論とがある。本発明ではスカラー回折理論に基づいて上記の回折計算を実施した。スカラー理論の適用に当たっては、メインスケールとインデックススケール間のギャップについては少なくとも一波長以上の寸法を前提とし、また、光源波長を  $\lambda$  とし、今その値を仮に  $0.65 \mu\text{m}$  とすれば 10 倍程度のピッチ、すなわち  $P = 6.5 \mu\text{m}$  以上の範囲においてはスカラー理論で厳密解と相違ないプロファイルが得られることが既に示されている（非特許文献 2 参照。）。

## 【 0 0 7 8 】

スカラー理論では一般にフレネル積分の形で求められる。

40

## 【 0 0 7 9 】

フレネル積分による方法は図 4 において

## 【 0 0 8 0 】

【数 1 0】

$$L = \sqrt{(x_0 - x)^2 + y^2 + g^2}$$

$$\dots \approx g + \left( (x_0 - x)^2 + y^2 \right) / 2g$$

・・・・・・・・数式 5

と近似し、開口部全域にわたって回折積分を行うことにより得られる。

10

【0081】

Inclination factor を一定とおいて次式で与えられる。

【0082】

【数 1 1】

$$I(x) = \left| \iint_{\text{開口部}} \exp(ikL) dx dy \right|^2$$

・・・・・・・・数式 6

20

【0083】

ところで、回折面で生じているのはあくまでもフラウンファー回折であり、スカラー理論であっても像振幅分布は平面波の和の形で表されなくてはならない。

【0084】

強度分布 I はこのとき

【0085】

【数 1 2】

$$I(x) = \left| \sum_n T_n \exp(-i\beta_n x - i\gamma_n g) \right|^2$$

・・・・・・・・数式 7

30

【0086】

で与えられる。ここに T n は n 次回折光の振幅である。

【0087】

40



【数 1 3】

$$\beta_n = \beta_0 + 2n\pi / d$$

$$\beta_0 = k \sin \theta_0$$

$$\gamma_n = \sqrt{k^2 - \beta_n^2}$$

k は波数  $k = 2\pi / \lambda \cdots \cdots$  数式 8

10

【0088】

(6) 式と (7) 式は実際の計算で微妙に異なる結果を与えるが先の適用範囲において計算結果はほぼ一致し、また、フレネル積分表現での計算結果には強度プロファイルに微細なリップルが多く発生し、その発生状況も積分範囲を変えるとリップルの形状も変化する。(5) 式の近似の正当性に疑問が生じるところでその点では進行平面波の重ね合わせで表現した (7) 式ではリップルは現れず、計算も簡便である。更にここで扱うべき波形歪みに関与する空間周波数成分を考えるにあたっては対象となる高調波成分はたかだか 3 次～多くても 9 次程度までの範囲であるから関与する回折波の数としては 5 次回折光まで考慮すれば十分と考えられる。

20

【0089】

表 1 に回折波の組み合わせと発生する高調波成分の次数の関係を示した。本実施例では 3 次高調波成分の除去を考える。

【0090】

計算式導出に当たり、回折強度として 5 次回折光の強度レベルを無視し、 $\pm 3$  次回折光までを計算対象とした。従って、3 次高調波成分の回折光の組み合わせとして、変位波形に含まれる 3 次高調波成分の生成に影響しているのは矩形波振幅格子においては、主に、0 次、 $\pm 1$  次、 $\pm 2$  次、 $\pm 3$  次回折光成分の組み合わせで、(0、+3)、(0、-3)、(+1、-2)、(-1、+2) でのみ形成される。なお、本実施例ではインデックススケールの各受光素子の開口幅はインデックススケールのピッチ P とし、その 1/2 としており、更に電気信号の処理回路構成で 180° 反転信号の差動増幅をしているので幅偶数次数の高調波成分はキャンセルされ、考慮する必要はない。

30

【0091】

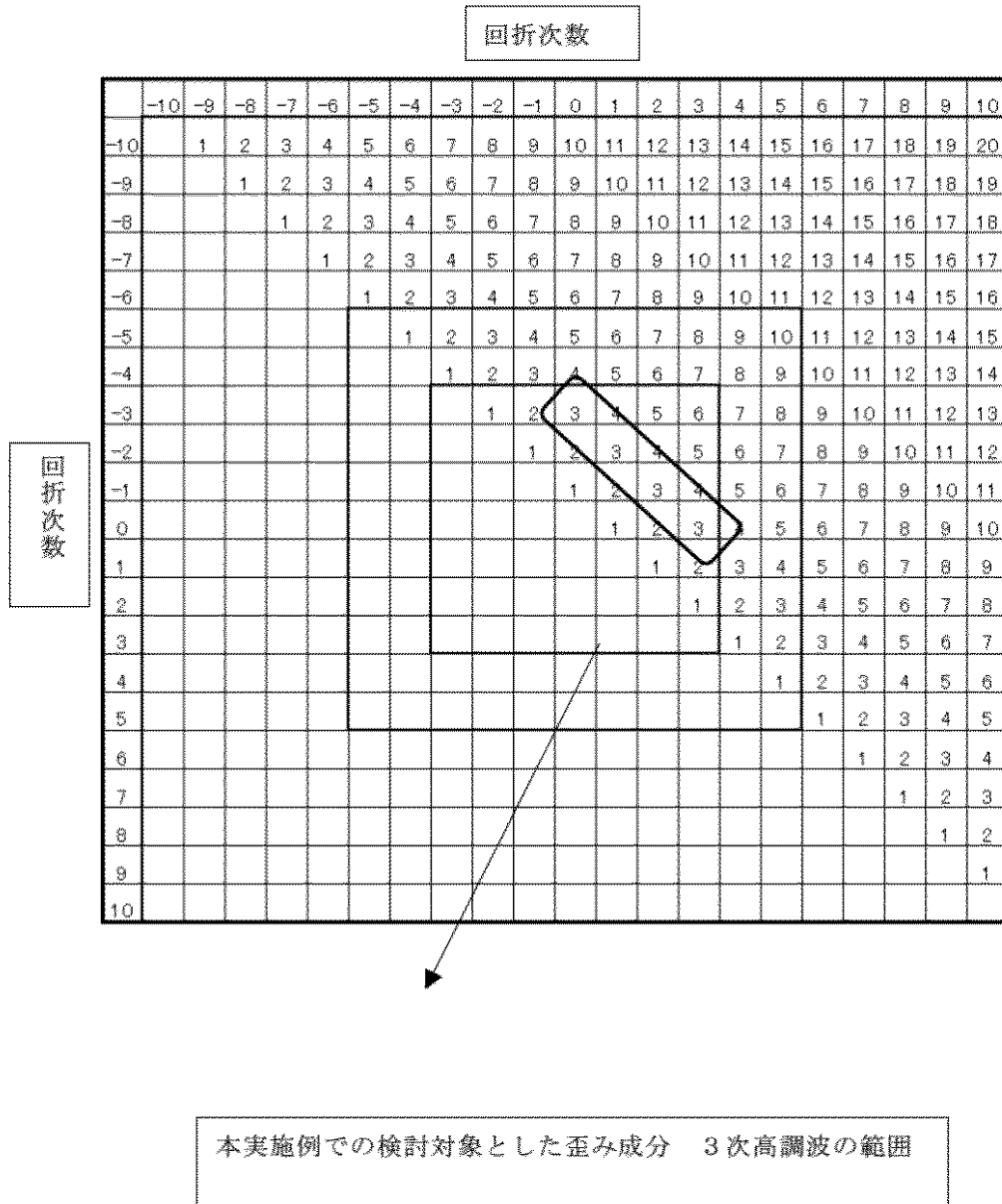
図 6 に本実施例で関与する 0 次および  $\pm 1$  次から  $\pm 3$  次回折波の発生の様子を示した。図 5 において各次数の回折強度を示したが図中ア、ウの開口率 AR = 33.33%、66.67% に対応しこの部分では 3 次回折光が次数欠如、図中イの開口率 AR = 50% では 2 次回折光が次数欠如する。図 6 (B)、(C) がそれぞれに対応している。

【0092】

【表 1】

表 1

回折次数の組み合わせと高調波波形歪み次数の関係



【0093】

以上に示したように、本発明では、メインスケール上の矩形波振幅格子による回折像のプロファイルを求めるに当たり観測点がファースフィールドでなくても平面波展開を基本として回折計算を実施する。更に、計算を簡便にし高速化するために(7)式における係数 $T_n$ に相当する回折光束振幅は以下の式で表現する。矩形波振幅格子の各次数の回折強度を表す式(9)、(10)を用いた。 $m$ は回折次数を表す。

【 0 0 9 4 】

【 数 1 4 】

$$I = I_0 (AR)^2$$

.....  $m = 0$  0 次回折光の場合 数式 9

【 0 0 9 5 】

【 数 1 5 】

10

$$I = I_0 \left( \frac{\sin(AR m \pi)}{m \pi} \right)^2$$

.....  $m \neq 0$  の場合 ・ 数式 1 0

【 0 0 9 6 】

$I_0$  を省略し、振幅はそれぞれ以下になる。

20

【 0 0 9 7 】

【 数 1 6 】

$$T_0 = AR$$

.....  $m = 0$  0 次回折光の場合 数式 1 1

【 0 0 9 8 】

【 数 1 7 】

30

$$T_m = \frac{\sin(AR m \pi)}{m \pi}$$

.....  $m \neq 0$  の場合 数式 1 2

【 0 0 9 9 】

回折格子の光学有効開口率  $AR$  と回折振幅値の関係を図 5 に示す。

40

【 0 1 0 0 】

次に、これらの振幅値を用いて各回折波を平面波として複素数表示で表現する。

ただし、以下の数式表記では

メインスケールの開口幅： $d$

メインスケールピッチ： $P$

光源波長：

ギャップ方向： $z$

スケール変位方向： $x$  としている。

【 0 1 0 1 】

なお、ここでは、 $y$  軸方向については無限遠に広がる格子とし、その影響を無視した。

50

【 0 1 0 2 】

0 次および ± 1 次 ~ 3 次までの合計 7 波の回折光の平面波をそれぞれ、 $U_0$ 、 $U_{1p}$ 、 $U_{1m}$ 、 $U_{2p}$ 、 $U_{2m}$ 、 $U_{3p}$ 、 $U_{3m}$ とした。

【 0 1 0 3 】

各回折光は次の ( 1 3 ) ~ ( 1 9 ) 式で表される。

【 0 1 0 4 】

0 次回折光  $U_0$

【 0 1 0 5 】

【 数 1 8 】

10

$$u_0 = \left( \frac{d}{p} \right) \text{Exp} \left[ I \left( \frac{2\pi}{\lambda} z \right) \right]$$

数式 1 3

【 0 1 0 6 】

+ 1 次回折光振幅  $U_{1p}$

【 0 1 0 7 】

【 数 1 9 】

20

$$u_{1p} = \frac{\text{Sin} \left[ \frac{d\pi}{p} \right]}{\pi} \text{Exp} \left[ I \left( -\frac{2\pi}{p} x + \frac{2\pi \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} z \right) \right]$$

数式 1 4

【 0 1 0 8 】

- 1 次回折光振幅  $U_{1m}$

【 0 1 0 9 】

【 数 2 0 】

30

$$u_{1m} = \frac{\text{Sin} \left[ \frac{d\pi}{p} \right]}{\pi} \text{Exp} \left[ I \left( \frac{2\pi}{p} x + \frac{2\pi \sqrt{1 - \frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} z \right) \right]$$

数式 1 5

【 0 1 1 0 】

+ 2 次回折光振幅  $U_{2p}$

【 0 1 1 1 】

40

【数 2 1】

$$u_{2p} = \frac{\sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]}{2\pi} \exp\left[i\left(-\frac{4\pi}{p}x + \frac{2\pi\sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}z\right)\right]$$

数式 1 6

10

【0 1 1 2】

- 2 次回折光振幅  $U_{2m}$ 

【0 1 1 3】

【数 2 2】

$$u_{2m} = \frac{\sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]}{2\pi} \exp\left[i\left(\frac{4\pi}{p}x + \frac{2\pi\sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}z\right)\right]$$

数式 1 7

20

【0 1 1 4】

+ 3 次回折光振幅  $U_{3p}$ 

【0 1 1 5】

【数 2 3】

$$u_{3p} = \frac{\sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3\pi} \exp\left[i\left(-\frac{6\pi}{p}x + \frac{2\pi\sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}z\right)\right]$$

数式 1 8

30

【0 1 1 6】

- 3 次回折光振幅  $U_{3m}$ 

【0 1 1 7】

【数 2 4】

$$u_{3m} = \frac{\sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3\pi} \exp\left[i\left(\frac{6\pi}{p}x + \frac{2\pi\sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}z\right)\right]$$

数式 1 9

40

【0 1 1 8】

50

となる。

【 0 1 1 9 】

次に、0 次および ± 1 次 ~ 3 次までの 7 波の回折光の合成振幅、すなわちその和をとり、その複素共役数をかけ算して合成強度を求めると、

それぞれの複素共役を  $U U 0$ 、 $U U 1 p$ 、 $U U 1 m$ 、 $U U 2 p$ 、 $U U 2 m$ 、 $U U 3 p$ 、 $U U 3 m$  として、合成波  $f 1$  および  $f 2$  は以下ようになる。

【 0 1 2 0 】

【 数 2 5 】

$$f1 = u0 + u1p + u1m + u2p + u2m + u3p + u3m$$

10

..... 数式 2 0

【 0 1 2 1 】

【 数 2 6 】

$$f2 = uu0 + uu1p + uu1m + uu2p + uu2m + uu3p + uu3m$$

20

..... 数式 2 1

【 0 1 2 2 】

メインスケール上の回折格子からの干渉像は上記の複素振幅の和  $f 1$ 、その複素共役  $f 2$  の積で求められる。すなわち合成強度  $I ( x、z、A R、 )$  は  $A R = d / p$  に置き換えて、

【 0 1 2 3 】

【 数 2 7 】

$$I (x, z, d, p, \lambda) = f1 \times f2$$

30

..... 数式 2 2

【 0 1 2 4 】

【数 2 8】

 $I[x, z, d, p, \lambda] =$ 

$$\begin{aligned}
& \frac{d^2}{p^2} + \frac{2d \cos\left[\frac{2\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right]}{p\pi} + \frac{2d \cos\left[\frac{2\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right]}{p\pi} + \\
& \frac{2 \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right]^2}{\pi^2} + \frac{2 \cos\left[\frac{4\pi x}{p}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right]^2}{\pi^2} + \frac{d \cos\left[\frac{4\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]}{p\pi} + \\
& \frac{d \cos\left[\frac{4\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]}{p\pi} + \frac{\cos\left[\frac{2\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]}{\pi^2} + \\
& \frac{\cos\left[\frac{6\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]}{\pi^2} + \\
& \frac{\cos\left[\frac{2\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]}{\pi^2} + \\
& \frac{\cos\left[\frac{6\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]}{\pi^2} + \frac{\sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]^2}{2\pi^2} + \frac{\cos\left[\frac{8\pi x}{p}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]^2}{2\pi^2} + \\
& \frac{2d \cos\left[\frac{6\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3p\pi} + \frac{2d \cos\left[\frac{6\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3p\pi} + \\
& \frac{2 \cos\left[\frac{4\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3\pi^2} + \\
& \frac{2 \cos\left[\frac{6\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3\pi^2} + \\
& \frac{2 \cos\left[\frac{4\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3\pi^2} + \\
& \frac{2 \cos\left[\frac{6\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3\pi^2} + \\
& \frac{\cos\left[\frac{2\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3\pi^2} + \\
& \frac{\cos\left[\frac{10\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3\pi^2} + \\
& \frac{\cos\left[\frac{2\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3\pi^2} + \\
& \frac{\cos\left[\frac{10\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3\pi^2} + \frac{2 \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]^2}{9\pi^2} + \frac{2 \cos\left[\frac{12\pi x}{p}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]^2}{9\pi^2} + \dots
\end{aligned}$$

・・・数式 2 3

【0 1 2 5】

上記の(23)式が目的とした光強度分布を表現している。

【0126】

しかし、0次および±1次～3次までの7波の回折光全部の合成の為、2次高調波や4次高調波、5次高調波、6次高調波を含んでいるから原理的にキャンセルされる偶数次数の高調波と、ここでは影響の少ない5次高調波を取り除いて上記の強度分布を導き式の簡素化を実施する。

【0127】

合成強度式(23)から偶数周波数成分と5次高調波成分を除き、基本波と3次高調波成分のみを扱うことにすれば上記の計算式は下記f3が強度合成式になる。すなわち

(0、+1)、(0、-1)、の基本波および3次高調波成分波(0、+3)、(0、-3)、(+1、-2)、(-1、+2)の平面波の振幅合成で済むので下記のf3の式に簡素化される。

【0128】

【数29】

$$\begin{aligned} f3 = & u0*uu1p + u0*uu1m + uu0*u1p + \\ & uu0*u1m + u0*uu3p + u0*uu3m + \\ & uu0*u3p + uu0*u3m + uu1p*u2m + \\ & uu1m*u2p + u1p*uu2m + u1m*uu2p \end{aligned}$$

10

20

・・・・・・数式24

【0129】



【数 3 0】

I[x, z, d, p, λ] =

$$\frac{2d \cos\left[\frac{2\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right]}{p\pi} +$$

$$\frac{2d \cos\left[\frac{2\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right]}{p\pi} +$$

$$\frac{\cos\left[\frac{6\pi x}{p} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]}{\pi^2} +$$

$$\frac{\cos\left[\frac{6\pi x}{p} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]}{\pi^2} +$$

$$\frac{2d \cos\left[\frac{6\pi x}{p} + \frac{2\pi z}{\lambda} - \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3p\pi} +$$

$$\frac{2d \cos\left[\frac{6\pi x}{p} - \frac{2\pi z}{\lambda} + \frac{2\pi \sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3p\pi}$$

・・・数式 2 5

10

20

30

のように簡略化される。

【0 1 3 0】

図 7 (A) は (2 3) 式で表した光強度分布

図 7 (B) は (2 5) 式で表した光強度分布

で、このデータはメインスケールピッチ  $P = 128 \mu\text{m}$ 、光源波長  $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$  で計算されたものである。

【0 1 3 1】

光強度分布をギャップ  $z$  と変位方向  $x$  で表している。明るいところが強度の強いところを示している。いずれもグラフの横軸がギャップ位置  $z$ 、縦軸が  $x$  軸方向を示す。

40

【0 1 3 2】

(A) では歪みの全成分が式に取り込まれているため偶数次の空間周波数も含まれており特に 2 次成分が強く存在していることがわかる。一方、(B) は基本波と 3 次成分のみの表示となっていて、3 次の高調波成分の振幅が大きい部分と少ない部分がよくわかる。

【0 1 3 3】

以上、回折格子の開口比 ( $AR = d/p$ : Aperture Ratio) および、メインスケールとインデックススケールのギャップ寸法 ( $z$ : GAP) の 2 つのパラメータについて特に変位方向  $x$  での光強度分布を導きだした。

【0 1 3 4】

次に、具体的にいくつかの設計、構成事例をもってこの方法による高次高調波歪み除去

50

、低減の効果を説明する。

【0135】

さて、以下にこの数式(25)を用いて具体的に3次高調波歪みについて開口率ARとギャップzの関係について評価を実施する。

【0136】

光強度分布 $I(x, z, AR)$ の関係式(25)から、その分布において歪み率を評価し歪みの最小となる条件を導き出す方法を示した。

【0137】

適用例1)

図8においてメインスケール110の格子ピッチ $128\mu\text{m}$ の場合において、設計ギャップを $1500\mu\text{m}$ に設定中心位置を設けるようにした構成をとる場合のメインスケールの最適開口率を求めてみる。光源波長は $0.65\mu\text{m}$ である。

【0138】

図8の上段の図は本発明で導いた光学強度分布式(25)を用いてギャップ $1500\mu\text{m}$ としたときの開口率ARと3次成分の歪み率の関係を示している。同図において横軸は光学有効開口率ARで、縦軸は左側が基本波振幅、右側が(歪み振幅/基本波振幅)を表している。この結果はあくまでも光学強度分布を対象に評価し、歪みを算出しているので実際のエンコーダの変位波形に重畳する歪みを表したものではない。しかし、実際のエンコーダ波形に換算すると、インデックススケールである程度のフィルタリング作用が働くため、その値は $1/3 \sim 1/5$ 程度に減少する。歪み最小となる光学有効開口率を決定する上では問題はない。この上段のグラフから歪み最小となる光学有効開口率ARは52%と決定された。図8中段のグラフは上記で決定された開口率52%とした場合のギャップ特性図である。図8上段のグラフに対して横軸のみギャップ位置(z)に変えたものである。ギャップ $1500\mu\text{m}$ で3次成分が減衰し極小値をとっていることが示されている。また図8下段の図は横軸をギャップ縦軸に変位方向xとした場合の強度分布密度図である。白いところが光強度の強いところで歪み極小となるギャップ位置には3次成分の空間周波数は見いだせない。

【0139】

適用例2)

次に、設計ギャップを $1000\mu\text{m}$ に設定中心位置を設けるようにした構成をとる場合のメインスケールの最適開口率を求めてみる。メインスケール110の格子ピッチは先の例と同じにした。光源波長は $0.65\mu\text{m}$ である。

【0140】

図9の上段の図は、前適用例と同様に、ギャップ $1000\mu\text{m}$ としたときの開口率ARと3次成分の歪み率の関係を示している。

【0141】

この適用事例では、光学有効開口率としてAR=44%とAR=78%の2箇所では極小値が存在している。2点を比べると基本波振幅の大きさを第二の選択基準としてみると、開口比78%のギャップポイントの方が基本波振幅が大きい。この場合には、この78%の開口率で設定することが好ましい。

【0142】

この上段のグラフから歪み最小となる光学有効開口率ARは78%と決定された。図9中段のグラフは前出図8の中段と同様で、この78%開口率でのギャップ特性を示している。

【0143】

ギャップ $1000\mu\text{m}$ で3次成分が減衰し極小値をとっていることが示されている。また図9下段の図は横軸をギャップ縦軸に変位方向xとした場合の強度分布密度図である。白いところが光強度の強いところで歪み極小となるギャップ位置であるギャップ $1000\mu\text{m}$ の位置には3次成分の空間周波数は見いだせない。また、より近接ギャップによった場合にこの密度図から明瞭に台形波となること、反対にギャップが離れる方向では三角波

になることがこの図から容易に推測される。

【 0 1 4 4 】

適用例 3 )

次に、メインスケール 1 1 0 のピッチ P を  $40\ \mu\text{m}$  とした場合について説明する。

【 0 1 4 5 】

この程度の微細ピッチになると多くの場合、干渉縞のコントラストの高いギャップ位置、いわゆるフーリエイメージが形成されるギャップポイントに設定される。

【 0 1 4 6 】

この実施例での光学系ではスケールを平行光束で照明しているので、平行光束照明系でのフーリエイメージの形成される位置は ( 2 6 ) 式から求まる。

【 0 1 4 7 】

【 数 3 1 】

$$z_n = nP^2 / \lambda \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

ただし、 $\lambda$  は光源波長、P は格子ピッチ。・・・数式 2 6

【 0 1 4 8 】

$z_n$  はフーリエイメージの形成位置を示すとともに期的に変動する基本波のコントラストの変動周期でもある。n は自然数でギャップに対して離散的に形成されるフーリエイメージの番号に相当する。

【 0 1 4 9 】

ここでは、1 番目のフーリエイメージの位置にギャップ設定された場合を取り扱う。  
(ここでこの第一番目のフーリエイメージ特性を以後 1 s t . P e a k 特性と呼ぶ)  
 $P = 40\ \mu\text{m}$ 、 $\lambda = 0.65\ \mu\text{m}$ 、 $n = 1$  としてギャップ位置  $z_1 = 2461\ \mu\text{m}$  となる。

【 0 1 5 0 】

図 1 0 は本発明での波形歪み対策行為を行わなかった場合について説明するための図である。一般的には矩形波振幅格子での開口率は 5 0 % で設定される。この時の 3 次高調波歪みの発生具合を本発明の評価式 ( 2 5 ) で評価した結果が図 1 0 に示されている。

【 0 1 5 1 】

図 1 0 の上段の図は、縦軸に基本波振幅、歪み率、横軸をギャップとしたギャップ特性図である。

【 0 1 5 2 】

この特性図において、フーリエイメージが形成されるギャップ位置  $z_1 = 2461\ \mu\text{m}$  では、周期的に変動する歪み率特性の部分的なピーク位置 (歪み大となる位置) に重なり波形歪みについては条件の悪いギャップ位置である。

【 0 1 5 3 】

また、基本波の振幅値の最大条件を優先して開口比を選んだ場合を考えると、図 1 0 の下段のグラフから開口率としては 6 4 . 5 % が選ばれるが、このギャップポイントにおいても 3 次高調波歪みの値は大きい。

【 0 1 5 4 】

このような場合に本発明によるメインスケール上の格子の開口率設定を実施することで高調波歪みの極小点を所望のギャップ位置 (= ここではフーリエイメージが形成されるギャップ位置) に設定可能となる。

【 0 1 5 5 】

図 1 1 でこのことを具体的に示す。本発明による評価式 ( 2 5 ) によれば、光学有効開口率として  $AR = 40.55\%$  および  $AR = 72.2\%$  の 2 箇所極小値が存在している

10

20

30

40

50

。2点を比べるにあたって先の例と同様に基本波振幅の大きさを第二の選択基準として考えると、開口比72.2%の開口率の方が基本波振幅は大きく、この値でメインスケールの開口率を設定することが好ましい。

【0156】

この例ではピッチ寸法40 $\mu\text{m}$ のメインスケールを用いた場合について説明したが、フーリエイメージが形成されるギャップポイントではピッチの値に関係なく上記と同様の結果が得られる。

【0157】

図12は、(25)式に(26)式の関係を活用し、ギャップ寸法をフーリエイメージ発生の基本周期 $z_1$ で規格化し、その関係を示したギャップ特性図である。

10

【0158】

図12(A)、(B)、(C)はそれぞれスケールピッチ20 $\mu\text{m}$ 、200 $\mu\text{m}$ 、2000 $\mu\text{m}$ の場合のギャップ特性を示している。先に説明したようにフーリエイメージで形成位置すなわち、横軸の1の値の部分において歪み最小となり、ギャップについてフーリエイメージの生成周期 $z_1$ で規格化してみた場合には、全く同じ特性を示している。

【0159】

よって、以下の本発明により以下のことがわかった。

【0160】

メインスケールの格子ピッチをPとし、光源波長としたとき、この光源を用いてコリメータレンズで平行光束照明した場合、フーリエイメージが形成されるギャップは(26)で示され、そのギャップ設定で用いる場合には40.55%および72.2%の開口率とすることで3次の高調波歪みは極小となる。

20

【0161】

以上、本発明の具体的な適用例を3通り示したが重要な点は、すべての適用例において、上述の関係は(25)式に含まれる各回折光の開口率と回折効率の関係式として(11)(12)式を適用した場合に成り立っている。すなわち、理想的な矩形波振幅格子を前提としている。

【0162】

しかし、実際に用いられるメインスケールの回折効率が異なれば上記の開口率はこの値に対してズレが生じる。矩形波振幅格子と用いられる具体的なスケール例としては、写真製版フィルムスケール、金属製エッチングスケール、ガラス表面に金属蒸着膜を施してエッチングで格子を設けたもの等さまざまである。また、格子の製造精度、格子エッジの直線性等により開口率と回折効率の関係は必ずしも(11)、(12)式と合致しない。

30

【0163】

このように、現実に得られる矩形波振幅格子の回折効率はスケールの素材、製造方法、製造精度等に依存していると考えられるので本発明を実際に工業的に適用していくに当たっては、用いるスケールの回折効率を実測し、その値を(11)、(12)式に対して補正することで正確に高調波の歪み成分を除去、低減可能な開口率が正確に求まり、本発明で示した方法の実用上の価値が高まる。

【0164】

メインスケールのピッチ寸法が比較的粗い場合には、高次の回折波が有効光路中に含まれるので波形歪みは顕著である。例えば、100 $\mu\text{m}$ 以上の場合を考えてみる。

40

【0165】

フーリエイメージの生成位置は光源波長を0.65 $\mu\text{m}$ 程度とすれば15mm以上となり、現実的にはこのようなギャップ寸法で設定されることはなく、多くの場合にはスペース効率の観点で概ね1mm以下で設定されることが多い。この場合にこのような粗いピッチのメインスケールを用いて電氣的な信号分割を実施するとき問題となるのが変位信号に重畳する波形歪みである。

【0166】

すでに、適用例1, 2においてピッチ128 $\mu\text{m}$ とした場合の歪み回避について説明し

50

たが、この例で示したように適宜、所望の設定ギャップで歪みが最小となる開口率設定をすることで祖ピッチでの高調波の歪みは回避可能となる。

【 0 1 6 7 】

実施例 2 )

次に、メインスケールを発散光束で照射した場合について実施例をあげて説明する。

【 0 1 6 8 】

実施例 1 ) では平行光束でメインスケールを照射した場合の回折像について ( 2 5 ) 式を導いた。この例では、発散光束でメインスケールを照射した場合を考える。

【 0 1 6 9 】

図 1 3 は、反射式のエンコーダの構成図である。光源 1 1 2 からの発散光束でそのままメインスケール 1 1 0 は照射され、メインスケール 1 1 0 からの反射回折光によりインデックススケール 1 2 0 に干渉縞が形成される。インデックススケール 1 2 0 とメインスケール 1 1 0 はギャップ Z で配置されている。この構成においてはメインスケールのピッチを P とするとインデックススケール面上にはメインスケールピッチの 2 倍の周期の干渉縞が形成される。以降、実施例 1 の構成と共通するので説明を省略する。

【 0 1 7 0 】

このような構成のエンコーダにおいても本発明が適用可能である。まず、図 1 3 の構成の等価光学系を図 1 4 に示す。図 1 4 において中央のメインスケールの移動方向軸を X 0 、インデックススケールを X 2 、光源を X 1 軸上に配置したもので、座標 L 0 に配置されている。前図 1 3 で示したメインスケールとインデックススケールのギャップ Z に相当するのはこの図 1 4 においては、X 0 - X 2 および X 0 - X 1 間の距離に相当する。光源座標 L 0 の位置から発散光束が X 0 軸上に配置されたメインスケールに照射され、その光線が回折格子面で回折した光線図が描かれている。L 0 からメインスケール上の原点 ( 0 , 0 ) に届いた光は回折角 1 で回折してインデックススケールに届いている。この回折した光束の方向を光線の進行方向とは逆の方向に延長し、原点を ( 0 , 0 ) にもつ半径 Z の円と交わる点を L + 1 とすると回折光線はあたかもこの L + 1 に光源を配置した光波と同様の波面を形成する。そこで各次数の回折光束がこのような仮想光源点 L + 1、L - 1、... のように回折次数に応じてこの半径 Z 上の円周上に配置し、各仮想光源点からの発散光束の重ね合わせとして干渉像を計算することができる。各仮想点での発光強度が先の実施例 1 ) で示した回折効率に従った強度で発光しているとして扱うことで実施例同様にメインスケールでの回折光束の重ね合わせによる干渉縞の光強度分布が計算できる。ただし、実施例 1 では平面波の重ね合わせであったが、この場合には発散光束の重ね合わせになるが、先の計算同様に扱う波面の数はただか取り扱う回折光束の数だけを考えればよいので、実施例 1 と同様に極めて簡便にインデックススケール面上の干渉縞強度分布が求まる。

【 0 1 7 1 】

以下、その途中の導出課程を省略し、その結果を示す。

【 0 1 7 2 】

各回折次数の光波を表す式は次の式となる。それぞれの回折波の強度は前出 ( 1 1 )、( 1 2 ) を用い、各回折波を球面波として複素数表示で表現する。

【 0 1 7 3 】

ただし、以下の数式表記では光波が観測点に到達するまでに減衰する距離に反比例 ( 1 / z ) する項は省略している。以下、実施例 1 と同様に

メインスケールの開口幅 : d

メインスケールピッチ : P

光源波長 :

ギャップ方向 : z

スケール変位方向 : x としている。

【 0 1 7 4 】

なお、ここでは、y 軸方向については無限遠に広がる格子とし、その影響を無視した。

【 0 1 7 5 】

0 次および ± 1 次 ~ 3 次までの合計 7 波の回折光の球面波をそれぞれ、U 0、U 1 p、U 1 m、U 2 p、U 2 m、U 3 p、U 3 mとした。

【 0 1 7 6 】

各回折光は次の ( 2 7 ) ~ ( 3 3 ) 式で表される。

【 0 1 7 7 】

0 次回折光 U 0

【 0 1 7 8 】

【 数 3 2 】

$$u_0 = \left( \frac{d}{p} \right) \exp \left[ i \left( \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{x^2 + (2z)^2} \right) \right]$$

10

## 数式 2 7

【 0 1 7 9 】

+ 1 次回折光振幅 U 1 p

【 0 1 8 0 】

20

【 数 3 3 】

$$u_{1p} = \frac{\sin \left[ \frac{dx}{p} \right]}{\pi} \exp \left[ i \left( \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\left( x - \left( \frac{\lambda}{p} z \right) \right)^2 + \left( z \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{p} \right)^2} \right) \right)^2} \right) \right]$$

## 数式 2 8

30

【 0 1 8 1 】

- 1 次回折光振幅 U 1 m

【 0 1 8 2 】

【 数 3 4 】

$$u_{1m} = \frac{\sin \left[ \frac{dx}{p} \right]}{\pi} \exp \left[ i \left( \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\left( x + \left( \frac{\lambda}{p} z \right) \right)^2 + \left( z \left( 1 + \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda}{p} \right)^2} \right) \right)^2} \right) \right]$$

40

## 数式 2 9

【 0 1 8 3 】

+ 2 次回折光振幅 U 2 p

【 0 1 8 4 】

【数 3 5】

$$u_{2p} = \frac{\sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]}{2\pi} \exp\left[i\left\{\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\left(x - \left(\frac{2\lambda}{p} z\right)\right)^2 + \left(z\left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2\lambda}{p}\right)^2}\right)\right)^2}\right\}\right]$$

数式 3 0

【0 1 8 5】

10

- 2 次回折光振幅  $U_{2m}$ 

【0 1 8 6】

【数 3 6】

$$u_{2m} = \frac{\sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right]}{2\pi} \exp\left[i\left\{\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\left(x + \left(\frac{2\lambda}{p} z\right)\right)^2 + \left(z\left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{2\lambda}{p}\right)^2}\right)\right)^2}\right\}\right]$$

数式 3 1

20

【0 1 8 7】

+ 3 次回折光振幅  $U_{3p}$ 

【0 1 8 8】

【数 3 7】

$$u_{3p} = \frac{\sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3\pi} \exp\left[i\left\{\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\left(x - \left(\frac{3\lambda}{p} z\right)\right)^2 + \left(z\left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{3\lambda}{p}\right)^2}\right)\right)^2}\right\}\right]$$

30

数式 3 2

【0 1 8 9】

- 3 次回折光振幅  $U_{3m}$ 

【0 1 9 0】

【数 3 8】

$$u_{3m} = \frac{\sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right]}{3\pi} \exp\left[i\left\{\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\left(x + \left(\frac{3\lambda}{p} z\right)\right)^2 + \left(z\left(1 + \sqrt{1 - \left(\frac{3\lambda}{p}\right)^2}\right)\right)^2}\right\}\right]$$

40

数式 3 3

【0 1 9 1】

次に、0 次および ± 1 次 ~ 3 次までの 7 波の回折光の合成振幅、すなわちその和をとり、その複素共役数をかけ算して合成強度を求めると、

それぞれの複素共役を  $U_{U0}$ 、 $U_{U1p}$ 、 $U_{U1m}$ 、 $U_{U2p}$ 、 $U_{U2m}$ 、 $U_{U3p}$ 、 $U_{U3m}$  として、合成波  $f_1$  および  $f_2$  は以下のようにになる。

50

【 0 1 9 2 】

【 数 3 9 】

$$f1 = u0 + u1p + u1m + u2p + u2m + u3p + u3m$$

. . . . . 数式 3 4

【 0 1 9 3 】

【 数 4 0 】

10

$$f2 = uu0 + uu1p + uu1m + uu2p + uu2m + uu3p + uu3m$$

. . . . . 数式 3 5

【 0 1 9 4 】

メインスケール上の回折格子からの干渉像は上記の複素振幅の和  $f1$ 、その複素共役  $f2$  の積で求められる。すなわち合成強度  $I(x, z, AR, \quad)$  は  $AR = d / p$  に置き換えて、

【 0 1 9 5 】

20

【 数 4 1 】

$$I(x, z, d, p, \lambda) = f1 \times f2$$

. . . . . 数式 3 6

【 0 1 9 6 】

上記の結果は次の ( 3 7 ) 式となる。

【 0 1 9 7 】

30



【数 4 2】

$$I[x, z, a, p, \lambda] =$$

[illegible]

10

20

30

40

• • • • • 数式 3 7

先の実施例 1 と同様に

3 次高調波成分の歪みに寄与する回折光波の組み合わせのみ計算すると

【 0 1 9 9 】

【 数 4 3 】

$$\begin{aligned} f_3 = & u_0 * uu_{1p} + u_0 * uu_{1m} + uu_0 * u_{1p} + \\ & uu_0 * u_{1m} + u_0 * uu_{3p} + u_0 * uu_{3m} + \\ & uu_0 * u_{3p} + uu_0 * u_{3m} + uu_{1p} * u_{2m} + \\ & uu_{1m} * u_{2p} + u_{1p} * uu_{2m} + u_{1m} * uu_{2p} \end{aligned}$$

10

【 0 2 0 0 】

となり、

最終的に、発散光束で照明されたメインスケールでの回折像の強度分布（3 次高調波成分に影響する成分のみの強度分布）は、以下の（3 8）式となる。

【 0 2 0 1 】

【数 4 4】

 $I[x, z, d, p, \lambda] =$ 

$$\frac{2d \cos\left[\frac{2\pi\sqrt{x^2+4z^2}}{\lambda} - \frac{2\pi\sqrt{\left(x-\frac{\pi\lambda}{p}\right)^2+z^2}\left(1+\sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}\right)^2}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right]}{p\pi},$$

$$\frac{2d \cos\left[\frac{2\pi\sqrt{x^2+4z^2}}{\lambda} - \frac{2\pi\sqrt{\left(x+\frac{\pi\lambda}{p}\right)^2+z^2}\left(1+\sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}\right)^2}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right]}{p\pi},$$

$$\frac{1}{\pi^2} \left\{ \cos\left[\frac{2\pi\sqrt{\left(x-\frac{2\pi\lambda}{p}\right)^2+z^2}\left(1+\sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}\right)^2}{\lambda} - \frac{2\pi\sqrt{\left(x-\frac{\pi\lambda}{p}\right)^2+z^2}\left(1+\sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}\right)^2}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right] \right\} +$$

$$\frac{1}{\pi^2} \left\{ \cos\left[\frac{2\pi\sqrt{\left(x-\frac{2\pi\lambda}{p}\right)^2+z^2}\left(1+\sqrt{1-\frac{4\lambda^2}{p^2}}\right)^2}{\lambda} - \frac{2\pi\sqrt{\left(x+\frac{\pi\lambda}{p}\right)^2+z^2}\left(1+\sqrt{1-\frac{\lambda^2}{p^2}}\right)^2}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{d\pi}{p}\right] \sin\left[\frac{2d\pi}{p}\right] \right\} +$$

$$\frac{1}{3p\pi} \left\{ 2d \cos\left[\frac{2\pi\sqrt{x^2+4z^2}}{\lambda} - \frac{2\pi\sqrt{\left(x-\frac{3\pi\lambda}{p}\right)^2+z^2}\left(1+\sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}\right)^2}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right] \right\} +$$

$$\frac{1}{3p\pi} \left\{ 2d \cos\left[\frac{2\pi\sqrt{x^2+4z^2}}{\lambda} - \frac{2\pi\sqrt{\left(x+\frac{3\pi\lambda}{p}\right)^2+z^2}\left(1+\sqrt{1-\frac{9\lambda^2}{p^2}}\right)^2}{\lambda}\right] \sin\left[\frac{3d\pi}{p}\right] \right\}$$

・・・・・・数式 3 8

【0 2 0 2】

この(38)式を用いて反射式エンコーダでの3次高調波歪み除去について適用例で具体的にその効果を示す。

【0 2 0 3】

適用例 4)

実施例 2 の光学配置の反射式エンコーダにおいて

発散光束で照明されたメインスケール 110 のピッチ P を 40 μm とした場合について説明する。先の実施例と同様に、この程度の微細ピッチになると多くの場合、干渉縞のコントラストの高いギャップ位置、いわゆるフーリエイメージが形成されるギャップポイントに設定される。

【0 2 0 4】

この実施例 2 での光学系では実施例 1 と異なり、メインスケールを発散光束で照明しているので、発散光束照明系でのフーリエイメージの形成される位置は、次の(38)式から求まる。

【0 2 0 5】

10

20

30

40

【数 4 5】

$$z_n = 2nP^2/\lambda \quad (n=1,2,3,\dots)$$

ただし、 $\lambda$ は光源波長、 $P$ は格子ピッチ。・・・数式 3 8

【0 2 0 6】

$z_n$  はフーリエイメージの形成位置を示すとともに期的に変動する基本波のコントラストの変動周期でもある。 $n$  は自然数でギャップに対して離散的に形成されるフーリエイメージの番号に相当する。

10

【0 2 0 7】

平行光束照明系の実施例 1 に対してフーリエイメージの生成周期が同じメインスケールピッチ  $P$  で比較すると 2 倍の周期でコントラストの変動が発生する。このタイプの反射式ではギャップ敏感度が先の実施例 1 に比べて鈍感でギャップアライメント許容誤差が広くとれる。

【0 2 0 8】

ここでも、平行光束照明の場合と同様に、1 番目のフーリエイメージの位置にギャップ設定された場合を取り扱う。

(ここでこの第一番目のフーリエイメージ特性を以後 1 s t . P e a k 特性と呼ぶ)

20

$P = 40 \mu\text{m}$ 、 $\lambda = 0.65 \mu\text{m}$ 、 $n = 1$  としてギャップ位置  $z_1 = 4923 \mu\text{m}$  となる。

【0 2 0 9】

図 1 5 にこの適用例での開口率特性図とギャップ特性を示す。

【0 2 1 0】

本発明による発散光束での歪み評価式 (3 8) によれば、光学有効開口率として  $AR = 40.55\%$  および  $AR = 72.2\%$  の 2 箇所極小値が存在している。この値は先の平行光束照明のケースと同じ値となっている。開口率  $72.2\%$  の方が基本波の振幅が大きく同様にこの値を選択するのがベストと考えられる。

【0 2 1 1】

30

図 1 5 のギャップ特性図でも 3 次の高調波歪みが設定ギャップ位置  $4923 \mu\text{m}$  において良好に除去、低減されている。

【0 2 1 2】

この発散光束照明の場合にも、先の実施例 1 同様にフーリエイメージが形成されるギャップポイントではピッチの値に関係なく上記と同様の結果が得られる。

【0 2 1 3】

実施例 3)

これまでの実施例ではメインスケールは透過方式のものや反射方式のものであったがいずれも平面上に格子を形成したものには相違ない。本発明の適用範囲は広く一般的な構成のエンコーダから特殊な構成を有したタイプのものにも適用可能である。この実施例 3 では曲面に格子が配置された例である。

40

【0 2 1 4】

図 1 6 では、具体的な製品搭載事例を掲げる。一眼レフカメラの交換レンズに搭載した光学式エンコーダの構成の一部であり、同図 (A) はメインスケール 1 1 0 がオートフォーカスレンズを駆動するためのカム環 3 0 0 の内側面に 3 0 1 の部分で、両面テープで貼り付けて装着され、角度測定対象部材であるカム環 3 0 0 の回転角度を検出ヘッド 2 0 0 で計測するロータリエンコーダの構成図である。同図で示されるようにメインスケールが曲面格子の場合の構成例で、同図 (B) は主要部の拡大図。また、同図 (C) は検出ヘッド 2 0 0 の構成を示していて、光源 1 1 2 とインデックススケールと同等の光学作用をする受光素子アレイ部 1 2 0 を備えている。 $Z$  はこの構成での実質的なギャップ寸法を示し

50

ている。

#### 【0215】

このような曲面配置されたメインスケールを用いた場合には光源からの発散光束がメインスケール面で波面変換され回折格子による回折強度を正確に求めることは容易ではないが、曲面格子反射面で受けた波面曲率変化を考慮して回折波の重ね合わせを実施することでこのような構成においても適用可能となる。

#### 【0216】

具体的には、図14で示した反射タイプの光学計算モデルにおいて曲面格子で受けた波面の曲率変化分は、この図14の仮想光源点 $L+1$ 、 $L-1$ ・・・の座標点を曲面回折格子で受けた波面曲率に合致するように変更することにより、これまでの実施例と同様に回折像の強度分布を求めることが可能で、得られた干渉像の強度分布より3次高調波成分が最も少なくなるようなメインスケール110の開口率が決定できる。

#### 【0217】

以上、実施例1～3で示したように、本発明は、適用するスケールとして、透過、反射両方のタイプで適用可能であり、また、実施形で示したリニアタイプに制限されるものではなく、ロータリタイプの放射状格子にも適用可能である。また、円筒曲面に配置した円筒スケールに対しても曲面の影響をある程度考慮して同様に適用可能である。

#### 【0218】

また、メインスケールを照射する光束についても平行光束照明に限らず、発散光束でメインスケールを照明するタイプへも適用可能で同様の効果が得られ、照明系のタイプに応じて本発明の基本的な考え方を適用することで対応可能である。

#### 【0219】

また、実施例では主に3次高調波成分の低減、除去を取り上げたが、この方法では特に3次成分に限らずその他の成分でも適用可能でまた、複数の高次成分を取り扱うことも可能である。

#### 【図面の簡単な説明】

#### 【0220】

【図1】本発明の実施例の全体構成図と光学系の図

【図2】電気信号ユニット部の概要を説明するための図

【図3】本発明の光学スケールを説明するための図

【図4】回折理論の計算式を説明するための図

【図5】矩形波振幅格子の回折効率を示す図

【図6】スケール開口率 $AR$ と実際の回折光の関係を示す図

【図7】スカラー理論に基づいて算出された変位方向 $x$ とギャップ $z$ の関係で光強度分布を示す

【図8】本発明の実施例1の適用事例1を説明するためのグラフ

【図9】本発明の実施例1の適用事例2を説明するためのグラフ

【図10】本発明の実施例1の適用事例3を説明するためのグラフ

【図11】本発明の実施例1の適用事例3を説明するためのグラフ

【図12】本発明の実施例1の具体的な適用事例を説明するためのグラフ

【図13】本発明の実施例2の反射式エンコーダの構成を示す図

【図14】本発明の実施例2の発散光束照明系の光学等価モデル図

【図15】本発明の実施例2の具体的な適用事例4を説明するためのグラフ

【図16】本発明の実施例3の円筒体に取り付けたタイプの構成を説明するための図

【図17】従来技術の図

#### 【符号の説明】

#### 【0221】

110 メインスケール

112 光源

113 コリメートレンズ

10

20

30

40

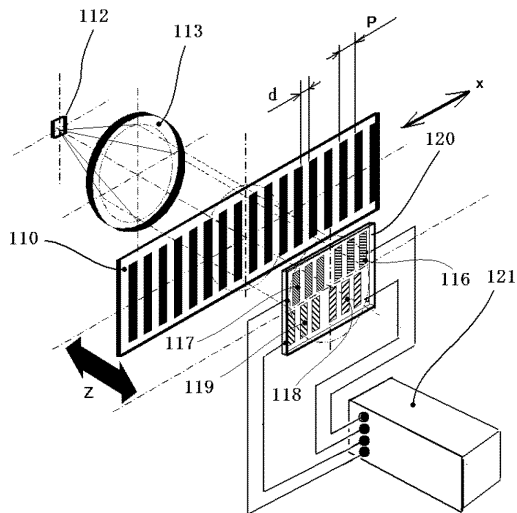
50

- 1 1 6 フォトダイオードアレイ
- 1 1 7 フォトダイオードアレイ
- 1 1 8 フォトダイオードアレイ
- 1 1 9 フォトダイオードアレイ
- 1 2 0 インデックススケール
- 1 2 1 電気回路ユニット
- 1 2 2 位置演算部
- 1 2 3 信号処理部
- 2 0 0 検出ヘッド
- 3 0 0 円筒体（被測定
- 3 0 1 スケール固定部
- 1 メインスケール
- 1 0 透明基板
- 1 1 光透過部（信号転送部）
- 1 2 不透過部（非転送部）
- 2 光照射手段
- 2 0 L E D
- 2 1 コリメートレンズ
- 2 2 平行光
- 3 フォトダイオードアレイ
- 3 0 シリコン基板
- 3 1 フォトダイオード

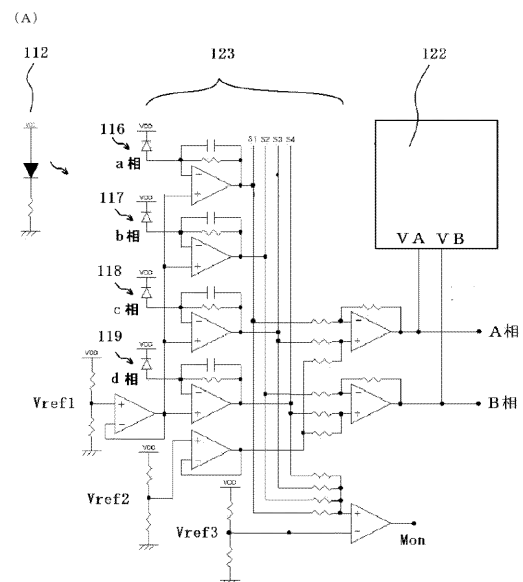
10

20

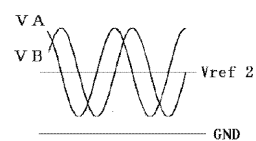
【図 1】



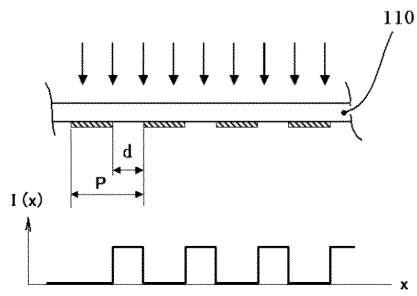
【図 2】



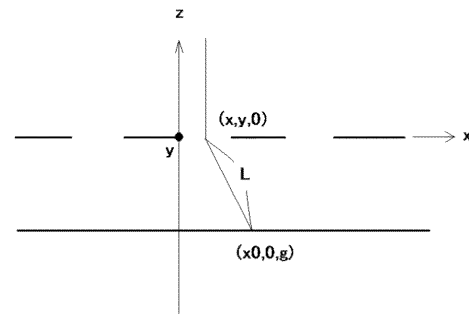
(B)



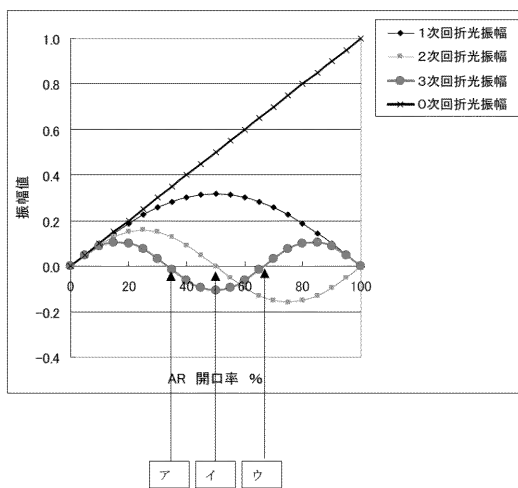
【図 3】



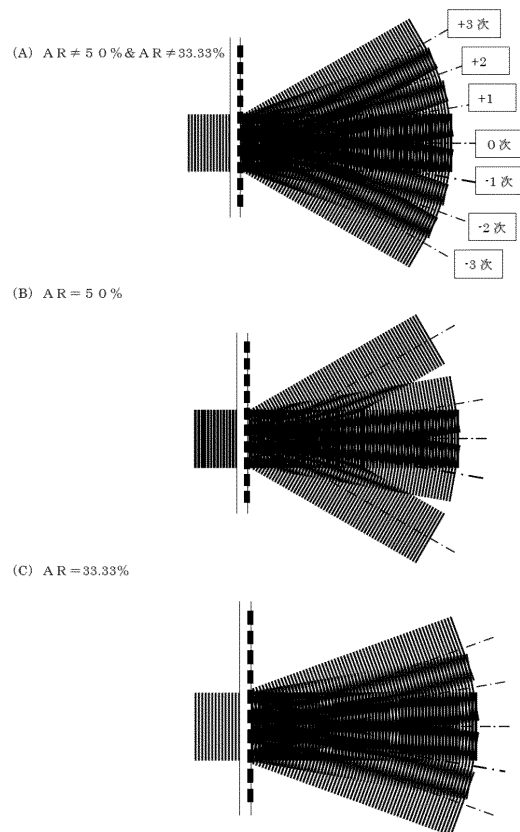
【図 4】



【図 5】

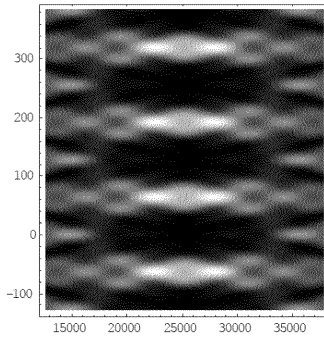


【図 6】

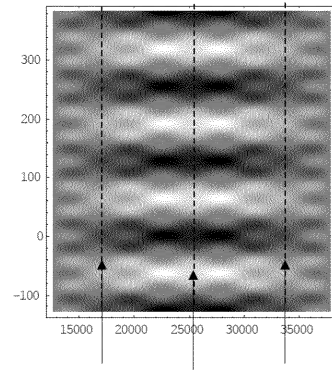


【図 7】

(A) 全成分 基本波+2, 3, 4, 5、

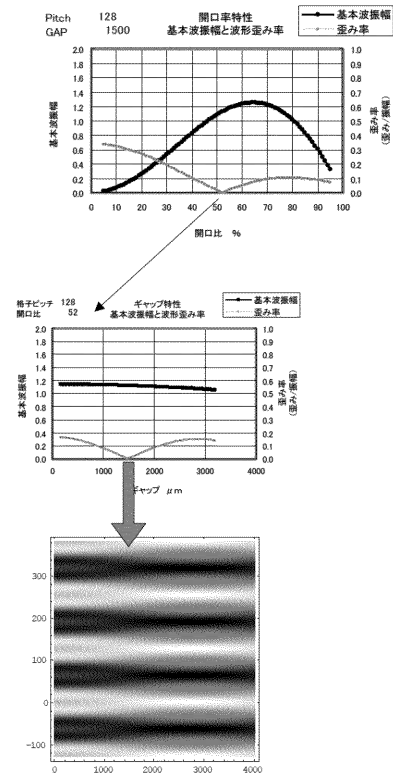


(B) 基本波+3次成分



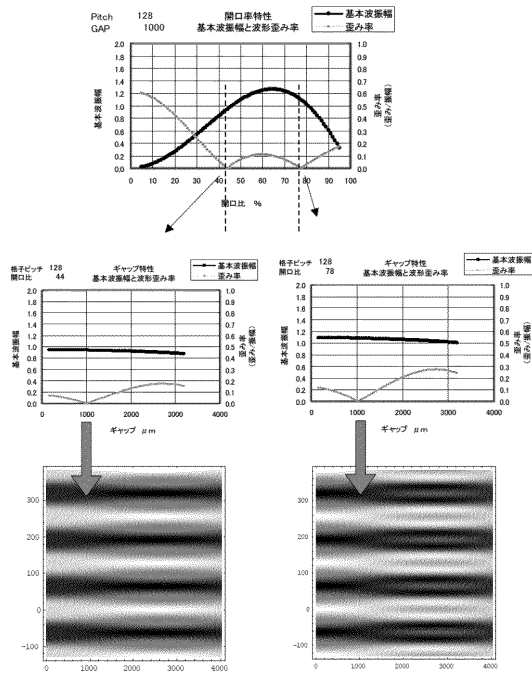
【図 8】

1) 設定ギャップ Z=1500 μm 開口率 AR 52%

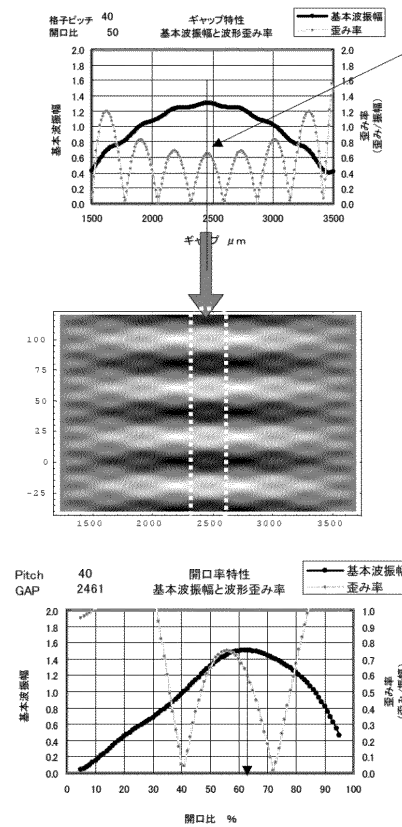


【図 9】

2) 設定ギャップ 1000 μm 開口率 44% &amp; 78%

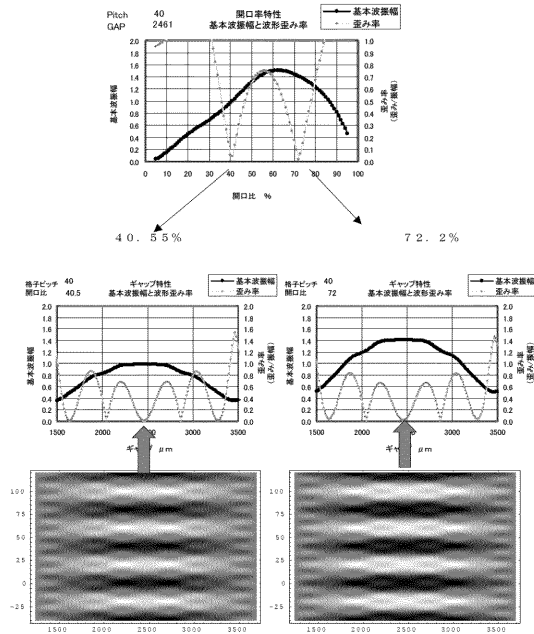


【図 10】

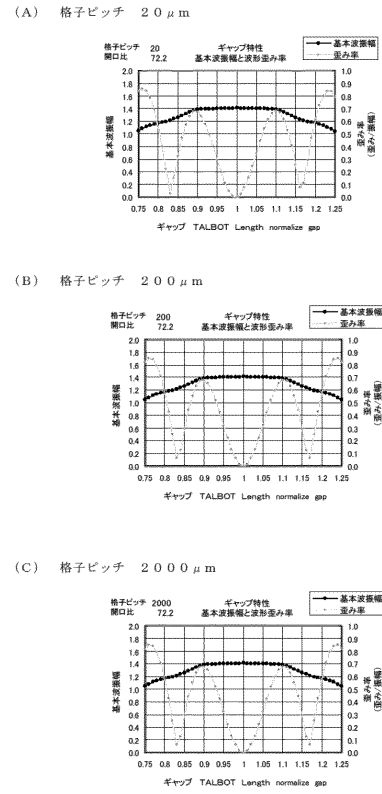




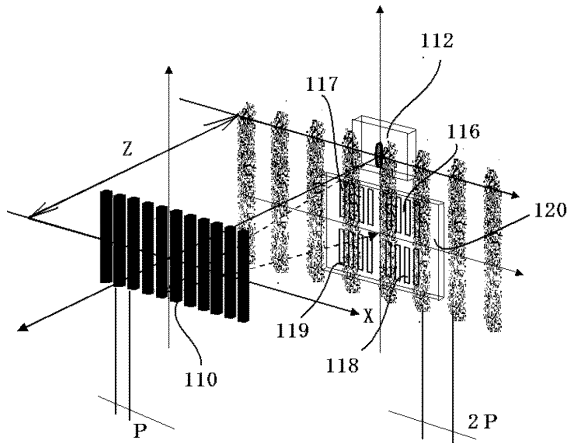
【図 1 1】



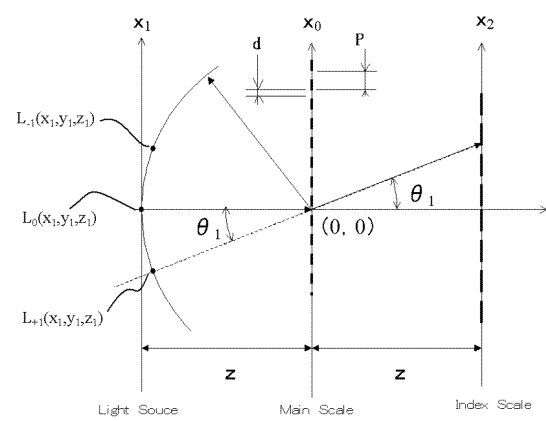
【図 1 2】



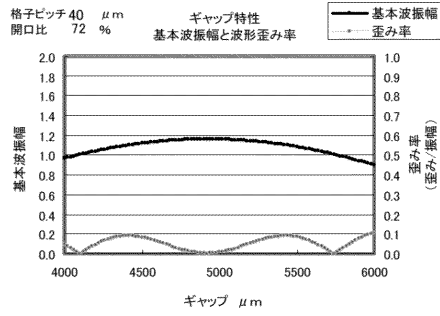
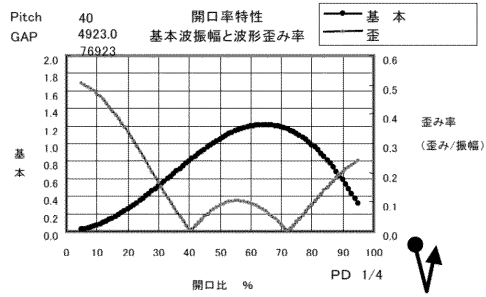
【図 1 3】



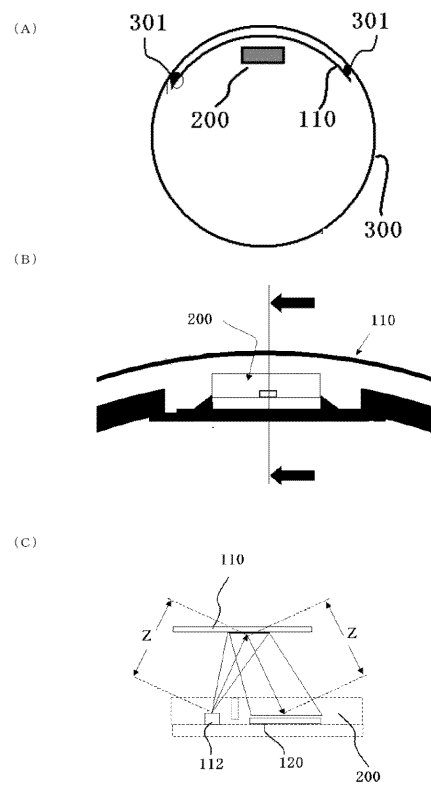
【図 1 4】



【図 15】

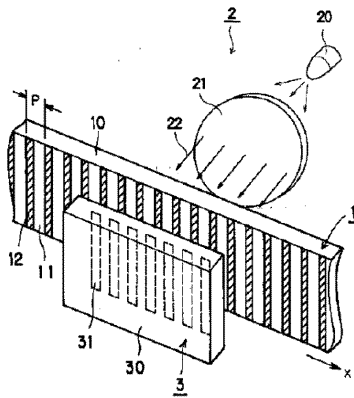


【図 16】

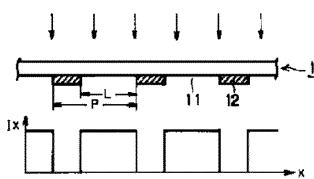


【図 17】

(A)



(B)



---

フロントページの続き

(56)参考文献 米国特許第04782229(US,A)

特許第2539269(JP,B2)

特許第3045452(JP,B2)

特許第2695623(JP,B2)

特開平09-196705(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01D 5/26 - 5/38