2 ピッチ格子投影による 3 次元形状計測*

格内 敏** 岩田耕一*** 斎藤伸一† 坂本 亨**

Profile Measurement by Two-pitch Grating Projection

Satoshi KAKUNAI, Koichi IWATA, Shinichi SAITOH and Tohru SAKAMOTO

The surface profile is obtained by projecting grating pattern on the object surface and observing the deformed pattern at the direction different from the projection. Phase-shifting technique is generally used for measuring height distribution at all the picture elements over the object image. In this method, if the slope of the object surface is so steep that the phase change between any adjacent pixels is larger than π , the integer fringe orders become ambiguous and the profile cannot be determined. In this paper, a new method for measuring steep slopes is proposed and verified by experiments. In the method, two gratings with different effective pitches P_1 and P_2 are projected on the object. By subtracting the two calculated heights for the two pitches, the integer fringe orders are obtained. Simulations clarified the effect of intensity quantization on the counting error of fringe order.

Key words: profile measurement, two-pitch, grating projection, interferometric fringe, phase-shifting technique

1. は じ め に

物体に格子を投影し、投影方向とは異なる方向より観察すると、格子は物体形状に応じて変形して見える。この変形格子より、物体形状を算出する格子投影法がある。この方法において、分解能を向上させるために位相シフト法を導入することが試みられている^{1)~4)}。

しかし、この方法では測定物の高さ分布が急激に変化する場合、すなわち、観察用素子の隣の画素との高さの差が、投影される格子ピッチの有効高さ（1ピッチによって測定可能となる高さ成分）以上になると、正しいしま次数が決定できなくなり形状が求まらない。

干渉計における寸法や形状測定においても同様な問題があり、この場合は、2つの波長を用いる方法が用いられている^{5)~8)}。本報告では、干渉計における2波長法に対応する方法を、格子投影法による形状測定に用いることを試みる。すなわち、測定物体に2つの異なるピッチの格子を投影し、位相シフトから求める

それぞれのしま次数の端数成分を求め、しま次数の整数成分を決定する。これにより、高さ分布が急激に変化する物体の形状測定を可能とした。また、本手法に特有のしま次数判定における計数誤差について、投影ピッチ比と量子化レベルの影響について考察した。

2. 格子投影ピッチと測定高さ

測定物体に投影された格子と測定可能な高さの関係について考える。図1に示すように観察方向に垂直な基準面に対して β の角度から物体にピッチ P' の格子を投影した場合、基準面上での投影格子のピッチは $P = P' / \sin \beta$ となり、1ピッチが表す最大高さ成分は図中の P_h となる。

一方、図2(a),(b)に示すように測定物体に段差 d （上段に対して下段がそれぞれ凹と凸）がある場合、干渉じまは段差の方向により、互いに逆の方向に次数がずれる。図では正面図の右側から格子が投影されている例を示している。格子の読取りに位相シフト法を導入することにより、段差の方向は容易に判断できる。しかし、段差がピッチ P の半しまを越えると、凹凸の物体上のしまは、図のように見た目には全く等しくな

* 原稿受付 平成3年8月2日

** 正 会 員 姫路工業大学工学部（姫路市書写2167）

*** 正 会 員 大阪府立大学工学部（堺市百舌鳥梅町）

† 学生会員 姫路工業大学工学部

Fig.1 Measurable surface height for a single projection pitch

Fig.2 Relation between step height and fringe order

り区別ができなくなる。そのため、投影ピッチ P' に対して測定できる有効な高さ成分は次式となる。

$$P_h/2 = P' / 2 \cos \beta \quad (1)$$

したがって、1ピッチ格子投影法では、イメージセンサ上の隣の画素との高さの差が格子ピッチの有効高さ以上離れた場合、正しいしま次数を決定できない。この問題を解決するために、異なるピッチの2つの投影格子を用いる。

3. 測定原理

測定物体に格子を投影し、それを異なる方向より観察すると、物体形状に応じた変形格子となる。この変形格子より形状が求まる。

しかし、物体に急激な変化(段差)がある場合、従来の1ピッチ格子投影法では、しま次数の整数成分が決定できず形状が求まらない。そのため、異なる2つの格子を物体に投影する。

図3に格子投影法の光学系を示す。図中のA点は格子の投影中心であり、それからaだけ離れた距離のO点は、カメラレンズの主点の位置である。OAの方向をX軸、撮像系の光軸をZ軸とすることにより、像面とZ軸とを垂直にする。測定物体上の一点P。(x, y, z)のXZ面への垂線の足をP'。とすると、2

Fig.3 Optical system geometry for the present method

点A、OからP'。を見込む角 α 、 ξ を測定できれば、XY面からP'。までの距離Z。が次式より求まる。

$$Z_0 = a / (\tan \alpha + \tan \xi) \quad (2)$$

式中の ξ は、イメージセンサ上のP点の像の位置から求められ、次式で表せる。

$$\tan \xi = x / z \quad (3)$$

いま、A点から広がる投影格子の明るい部分が図に示すmの面のようにXZ面に垂直な面であれば、物体上の明るい部分は α の値が等しい。したがって、格子の明部における α の値を知っておけば、像上の明暗から α の値を知ることができる。物体への投影格子の1ピッチに相当する角度を α_p とすると、角度 α は次式より求まる。

$$\alpha = (n + \phi/2\pi) \alpha_p \quad (4)$$

ただし、 n はしま次数の整数成分、 ϕ は位相シフト法によって求めた初期位相で、 $\phi/2\pi$ はしま次数の端数成分である。この初期位相 ϕ は、正しい正弦波状の正弦格子を用いれば、格子の位相を $\pi/2, \pi, 3\pi/2, 2\pi$ と4回シフトさせて得られる強度データ (I_1, I_2, I_3, I_4) より次式から求まる⁹⁾。

$$\phi = \tan^{-1} \{ (I_3 - I_1) / (I_4 - I_2) \} \quad (5)$$

このように初期位相の端数成分 ϕ を求めることができるが、格子ピッチの有効高さ以上の急激な変化（段差）のある物体を測定する場合、しま次数の整数成分を決定することができない。これを解決するため、物体に異なる2つの格子をそれぞれ投影する。その有効高さピッチ（Z方向のピッチ）をそれぞれ $P_1, P_2, P_1 < P_2$ とし、位相シフト法により求まるしま次数の端数成分をそれぞれ $\delta n_1, \delta n_2$ とする。図4(a)に、この端数成分より換算される高さ分布 δnP と実際の高さ H の関係を示す。いま、2つの投影ピッチに対する換算高さ分布の差 $SA = \delta n_1 P_1 - \delta n_2 P_2$ を縦軸に取ると、図4(a)は(b)のように階段状に変化することがわかる。なお基準点 O' での差 SA がゼロとなるように補正を行い図4(c)を得る。なお図中の n_1, n_2 の値は、各投影格子に対する正しい整数のしま次数を表す。図より SA' において、 $P_2 - P_1$ の大きさの段差ができる位置は、2つの投影格子のしま次数の整数成分 n_1, n_2 の組合せによって決まることがわかる。したがって、逆に各位置における SA' の値を知ることにより、その点のしま次数 n_1, n_2 が推測できることになる。なお図4(c)で、差 SA' の分布は、ほぼ横軸の長さ AB を周期に繰り返される。したがって、2ピッチ法で測定できる範囲は図中の AB 間となる。これが2ピッチ法による等価有効ピッチの長さ Λ で、次式で表せる。

$$\Lambda = P_1 P_2 / (P_2 - P_1) \quad (6)$$

Fig.4 Measuring principle

- (a) Relation between calculated height δnP and true height H
- (b) Relation between difference of calculated height $SA = \delta n_1 P_1 - \delta n_2 P_2$ and true height H
- (c) Correction for a zero-phase difference at reference point O'
- (d) Determination of fringe order

図4(c)では、差 SA' の値が上下に変動しており、しま次数の判定が困難である。判定をしやすくするために、図(c)のA、Bの位置から段差 $(P_2 - P_1)$ の半分の量だけ下げた位置を通る（図中の一点鎖線）判定線 J を設け、この線より大きな差 SA' の値に対しては格子ピッチの大きさを引く。また差 SA' の負の方向に対しても、同様に図中に示されているような位置に判定線 J' を設け、この線より小さい差の値に対しては、逆に格子ピッチの大きさを加える。このような補正をすることにより、差 SA' の変化がわかりやすい図(d)が得られる。なお、この図は短ピッチ P_1 に対する次数を求める図である。この図を用いることにより、投影格子のしま次数の整数成分は、差 SA' の値を2つのピ

Fig.5 Relation between equivalent effective pitch Δ and pitch difference $P_2 - P_1$ of the projected gratings

ッチ差 $P_2 - P_1$ で割ることにより直ちに求まる。2 ピッチ法でしま次数の整数成分 n_1 を求めることにより、式(4)より角 α が計算できる。

4. 投影格子ピッチと等価有効ピッチとの関係

2ピッチ格子投影を用いて段差のある物体を測定する場合、前もって、段差の大きさと測定に必要な2つの格子ピッチとの関係を求めておく必要がある。図5に、投影される格子の有効な高さピッチと式(6)から求まる等価有効ピッチとの関係を示す。図の縦軸は等価ピッチ Δ で、横軸は2つの格子ピッチ差を表す。例えば、有効高さ10mmの短ピッチに対して12mmの長ピッチを用いれば、等価ピッチ約60mmの投影格子で測定することになり、段差60mmまでの物体を測定できることがわかる。

5. 実験

物体への投影格子には、図3の光学系においてビームスプリッタの一方の面にミラーを、他方の面には圧電素子に貼り付けたミラーを接近して配置したコンパクトな干渉計と、その前に置かれた対物レンズにより作製される干渉しまを用いる。レーザ光はビームスプリッタにより2つのビームに分離され、接近して置かれた2つのミラーで反射することにより、ビーム同士

Fig.6 Experimental result 1.
(The step height perpendicular to the projected gratings)
(a) Deformed grating pattern
(b) Profile of cross section A-A

が干渉して干渉しま格子ができる。異なる格子ピッチは、一方のミラーの傾きを変えることにより得る。位相シフトは、他方のミラーの圧電素子を、マイクロコンピュータからD/Aコンバータを通して微小移動させることにより行う。物体上の変形格子はイメージセンサ(NEC製TI-22A, 1個の素子サイズ: 水平23 μ m, 垂直13.5 μ m)の各素子上で、256階調の強度にデジタル化され、1/30秒でフレームメモリに蓄えられる。なお、投影格子ピッチの大きさは、図3の原点O'におかれた平板上の基準長さ内に投影された干渉しまの数を、位相シフト法により求めて算出した。

検証実験には、図3において $a=672$ mm, $\alpha_0=\pi/4$ の光学系とし、段差20mmの溝をもつ直方体試料と、壁の前に置かれた直径41mmの円柱試料の測定を行った。

6. 結果と考察

6.1 検証実験

図6, 7に、段差20mmの溝のある測定物体が、投影格子にそれぞれ垂直と平行に段差を持つ場合の測定結果を示す。投影格子の有効な高さピッチは7.2

Fig.7 Experimental result 2
(The step height parallel
to the projected gratings)
(a) Deformed grating pattern
(b) Profile of cross section A-A

Fig.8 Experimental result 3
(A cylindrical object placed
in front of the wall)
(a) Profile of a cross section
(b) Measurement error distribution
of a cylindrical shape

mm, 8.6 mm (等価有効ピッチ 4.2 mm) とした。それぞれの図中の(a)は観察方向から見た変形格子じまを示し、図6(a)の番号はしま次数を表す。図6の場合、しまは段差のためにかなりずれており、1ピッチだけでは次数の判定ができないことがわかる。

Fig.9 Simulated dispersion of measured values SA' caused by intensity quantization

また図7の場合、段の底に陰ができる。陰は投影方向と観察方向が異なる格子投影法においては避けることのできない問題であるが、例えば複数の光学系を配置することにより解決できる。それぞれの図中の(a)のA-A断面の測定結果を、図中の(b)に示す。図6では標準偏差0.1 mmで、平均の段差19.5 mmが得られた。図7では、段のエッジ部において幾らかのぼらつきが見られる。これは、エッジ部における急激な光の散乱などに起因するものと思われる。

次に、壁(平板)の前4.2 mmの位置に置いた直径4.1 mmの円柱試料について、前述と同様な2つの有効ピッチを用いて測定を行った。図8(a)に、円柱の軸に垂直な一断面形状と壁の測定結果を示す。壁との境目では、急激な変化によるコントラストの低下のために正確な測定ができなかった。また図(b)に、この断面の実際の形状に対する測定値の誤差分布を示す。円柱、壁とも誤差は最大 ± 0.3 mm程度であった。

6.2 量子化誤差によるしま次数計数誤差

2ピッチ格子投影法では、しま次数を図4(d)から有効な高さピッチの差(P_2-P_1)をもとにして決定する。しかし、測定における位相誤差のぼらつきが、この差の値より大きくなると、しま次数の計数に誤差が生じ測定不可能となる。このしま次数の計数誤差は、2ピッチ法における特有の誤差となる。一般に、位相誤差には種々の誤差が考えられるが¹⁰⁾、ここでは、強度のA/D変換による量子化誤差が計数誤差に及ぼす影響について検討した。計算は始めに既知の初期位相を仮定して、強度を計算し量子化して位相を求める。計算された位相と仮定した位相の差が量子化による誤差となる。図9に、量子化誤差による図4(d)の計算例を示す。距離分布の差 SA' は初期位相により小刻みに変動している。最大値が図中の破線で示した枠(P_2-P_1)を越えると、しま次数の計数誤差が生じるが、これは主に投影格子のピッチ比によって決まる。図10に各量子化レベルを横軸に、有効ピッチ比を縦軸

Fig.10 Region for counting error caused by intensity quantization

に取り計数誤差が現れる条件を斜線で示した。図より、計数誤差はピッチ比が大きいくほど現れにくいことがわかる。しかし、ピッチ比を大きくした場合、図5の横軸の P_2/P_1 を大きくすることになり等価有効ピッチは小さくなる。大きな等価有効ピッチを得るためには、ピッチ (図5の P_1) の比較的大きい格子を投影する必要がある。しかし、大きいピッチを使用した場合、式(4)の α_p が大きく、角度 α が位相誤差の影響を受けやすくなるため、式(2)からの高さの測定に誤差が生じやすくなる²⁾。したがって、段差物体の測定においては、必要な等価有効ピッチ Λ に対して、図5より小さな P_1 を選び、その P_1 に対して計数誤差が生じないような P_2 を図10より決定する必要がある。

7. ま と め

位相シフト格子投影法において、異なる2つの格子ピッチを使用する方法を提案した。また、その方法の有効性を確かめるために、その測定システムを構築した。このシステムにより、高さ分布が急激に変化する

物体の測定を行った結果、20~40mm程度の段差を1%以下のばらつきで測定できた。また、測定可能な段差の範囲と投影格子のピッチの関係、しま次数の計数誤差に及ぼす投影ピッチと量子化レベルの影響などについて考察を行った。

参 考 文 献

- 1) 格内 敏, 岩田耕一, 長谷川素由, 山口真二: 縞走査干渉縞投影法による3次元形状計測, 精密工学会誌, 55,1(1989)141.
- 2) S.Kakunai, K.Iwata, M.Hasegawa and T.Sakamoto: Profile Measurement by Projecting Phase-shifted Interference Fringes, SPIE 1163(1989) 128.
- 3) 小松原良平, 吉澤 徹: 縞走査を導入した格子パターン投影法, 精密工学会誌, 55,10(1989)1817.
- 4) V.Srinivasan, H.C.Liu and M.Halioua: Automated Phase-Measuring Profilometry 3-D Diffuse Objects, Appl.Opt., 23(1984)3105.
- 5) K.Creath: Step Height Measurement Using Two-wavelength Phase-shifting Interferometry, Appl.Opt., 26(1987)2810.
- 6) Y.Y.Chang and J.C.Wyant: Two-wavelength Phase Shifting Interferometry, Appl.Opt., 23(1984) 4539.
- 7) J.C. Wyant: Testing Aspherics Using Two-wavelength Holograph, Appl.Opt., 10(1971)2113.
- 8) 西川尚之, 高安拓朗, 岩田耕一: 二波長位相シフト干渉法による微細表面形状計測, 精密工学会誌, 57,9 (1991)1633.
- 9) J.H.Bruning, D.R.Herriott, J.E.Gallagher, A.D. White and D.J.Brangaccio: Digital Wavefront Measuring Optical Surfaces and Lenses, Appl. Opt., 13(1974)2693.
- 10) 格内 敏, 斎藤伸一, 坂本 亨, 岩田耕一: 縞走査法を用いた格子投影による3次元形状測定の誤差解析, 1991年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (1991)1149.