1011 ナノメートル画像計測のための位相接続技術

Phase Unwrapping Technology for Nanometer Image Measuring

○正 西本弘之 (鳥取県産技センター) 正 小幡文雄 (鳥取大)
正 上原一剛 (鳥取大)

Hiroyuki NISHIMOTO, I R I of Tottori pref., 7-1-1 Wakabadai minami, Tottori
Fumio OBATA, Kazutake UEHARA, Tottori University

Key words: Interference Microscope, Nanometer, Phase Unwrapping, Schwider-Hariharan Method

1 はじめに

近年、微細加工技術の高度化にともなって、マイクロマシンやマイクロファクトリの実現をめざした研究開発が活発に行われるようになり、微細加工表面の微細領域での形状計測が重要視されるようになってきた。著者らは、最近、超小型測定対象物の微細形状を光学的手法によりナノメートル分解能で計測を行う装置の開発に着手した¹⁾。

光学的形状計測法には非接触で測定できる特長がある。光の干渉を利用する形状計測法は非常に精度が良く、光源の1/2波長までの計測対象には非常に有効な方法である。しかし、干渉縞の性質から、それ以上の計測対象には位相接続を行う必要がある。本報では、位相接続のアルゴリズムの開発と、開発中の可搬型ナノメートル形状計測器に適用して位相接続により計測対象の拡大を試みた。

2 実験方法

2-1 測定の原理と位相接続の内容

微細形状をナノメートルの分解能で行うため開発中の干渉計は、小型の顕微鏡ユニットにCCDカメラと対物レンズ(20倍のミラウ型)を取り付けた二光束干渉顕微鏡で構成されている。CCDカメラからの映像は、パーソナルコンピュータへ転送して位相と位相接続の演算に用いた。

光学干渉計で得られる干渉縞の明るさは通常正弦波状に変化するので、着目する点の明るさから初期位相が求まり、光路差(高さの情報)が計算できる。しかし、実際には1枚の干渉縞画像から明るさと初期位相を決定することは、画像のシェーディングやノイズがあつて難しい。そこで、干渉縞画像からの高さの演算には位相変調干渉法(フリンジスキャン干渉法)を用いた。すなわち、以下で示す干渉面での位相 $f(x, y)$ が決定されると、高さ $h(x, y)$ は次式で計算できる。なお、 λ は使用する光源の波長である。

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4\pi} f(x, y) \quad \dots (1)$$

ここで、位相 $f(x, y)$ を求めるための計算式を以下に示す。参照面を90度(1/4波長)単位で得られた画像を $I_1(x, y)$ 、 $I_2(x, y)$ 、 $I_3(x, y)$ 、 $I_4(x, y)$ とすると、それらは次式で与えられる。なお、 U は画像の位相シフト時の輝度平均値、 V は画像の輝度振幅である。

$$I_1(x, y) = U + V \cos(f(x, y)) \quad \dots (2)$$

$$I_2(x, y) = U + V \cos(f(x, y) + \frac{\pi}{2}) \quad \dots (3)$$

$$I_3(x, y) = U + V \cos(f(x, y) + \pi) \quad \dots (4)$$

$$I_4(x, y) = U + V \cos(f(x, y) + \frac{3\pi}{2}) \quad \dots (5)$$

位相 $f(x, y)$ は次式で計算できる。

$$f(x, y) = \tan^{-1} \frac{I_4(x, y) - I_2(x, y)}{I_1(x, y) - I_3(x, y)} \quad \dots (6)$$

式(6)は4ステップ法として一般に使われているものである。一方、90度(1/4波長)測定範囲を延長して $I_5(x, y)$ を撮り、平均化の処理を行うSchwider-Hariharanの5ステップ法²⁾では、位相 $f(x, y)$ は次式で与えられる。

$$f(x, y) = \tan^{-1} \left[\frac{2(I_2(x, y) - I_4(x, y))}{2I_3(x, y) - I_1(x, y) - I_5(x, y)} \right] \quad \dots (7)$$

本報では、式(7)で位相 $f(x, y)$ を求めた。

2-2 位相接続シミュレーション

計測対象の表面形状が使用する光の波長の1/2以上の差があると、位相 $f(x, y)$ は $-\pi \sim \pi$ の間の値となるので隣り合う点に 2π の位相飛びが生じる。この場合 2π の加減により位相を繋ぎ合わせる操作を位相接続(位相アンラップ)という。

開発したアルゴリズムの動作を確認するためにコンピュータシミュレーションを行った。このシステムでは、式(7)で位相演算を行った後、位相接続の演算を行う。計測対象は、1/2波長以下の連続性が保証できる半球面形状とした。干渉縞の発生データを図1に、位相接続前の結果を図2(a)に示す。計測対象の高さが1/2波長以上であれば位相接続が必要となる。位相接続して位相 $f(x, y)$ を求めれば式(1)から形状が計算できる。

図1の干渉縞発生データから位相を計算し、X方向に位相接続をした結果を図2(b)に示す。Y方向にも位相接続をした結果を図3に示す。このような一連の操作を行う干渉縞解析では実時間での演算処理が望まれる。

Fig.1 Measurement value of the fringe

(a)Fringe data (b)After unwrapping in X direction
Fig.2 Simulation results of 10mm steel ball

Fig.3 Form simulation result of 10mm steel ball
(Schwider-Hariharan Method)

3 結果と考察

2-1に述べた位相接続の妥当性の確認実験は、精密鋼球と精密平面鏡を用いて行った。

干渉縞の表示は、顕微鏡ユニットに緑（波長 $\lambda=546\text{nm}$ ）の狭帯域干渉フィルタを用いて単色光で行った。また、コンピュータによる演算は、ビデオ信号から取り込んだ画像の8ビット分解能、すなわち使用した光源の波長 λ の1/2を8ビット分解能の256で除算した 1.07nm で行った。

3-1 精密鋼球によるシステムの動作評価

形状に1/2波長以下の連続性が保証される直径10mmのベアリング用精密鋼球を用いて、開発した位相と位相接続の演算アルゴリズムの妥当性の確認を行った。X、Y方向の二次元方向に位相接続した結果を図4に示す。図4から、開発した小型干渉計システムによれば精密鋼球の位相接続は可能であることがわかる。

3-2 精密平面鏡によるシステムの動作評価

図5に位相接続法により得られた精密平面鏡の表面を示す。なお、供試精密平面鏡は $\lambda/10$ 以下の平面度が保証されているものであった。図5から、精密平面鏡の場合も位相接続可能であることがわかる。

図4から精密鋼球に対しては光源に利用した光の1/2波長（ 273nm ）の約2.5倍である $7\mu\text{m}$ まで、また、図5から精密平面に対してはその約10倍である $3\mu\text{m}$ まで連続的に位相接続が可能であることがわかる。

4 まとめ

生産機械の超小型化としてマイクロファクトリが注目されている。また一方では、加工の精密化にともない、ナノメートル分解能で微細形状計測が要求されている。

Fig.4 Measurement result of 10mm steel ball

Fig.5 Measurement result of plane mirror

本報では、まずX、Y方向の位相接続法を示した。つぎに、その形状に1/2波長以下の連続性がある精密加工面について、高さが1/2波長以上の計測対象物でも位相接続を行えば形状計測ができることを示した。

今後は、位相演算の実時間化¹⁾に加えて、位相接続の実時間化を図るために、システムLSIによるハードウェア化を行い、光波干渉計測システム全体の実時間を達成する予定である。さらに、この光波干渉計測システムでトレーサビリティのための不確かさの見積などの研究開発を行い、その成果をすでに開発済みの小型干渉顕微鏡³⁾に適用し、製造現場などで利用できる可搬型ナノメートル形状計測器の開発を目指す。

最後に、Schwider-Hariharanの5ステップ法の貴重な助言を頂いた産業技術総合研究所計測標準部門の土井琢磨氏に感謝する。

文 献

- 1) 西本弘之他：”システムLSIによるナノメートル実時間画像計測技術”，機講論，No.015-1(2001),283-284.
- 2) K.Creath:”Error sources in phase-measurement interferometry”,P428-435,Vol.1720,SPIE,(1992)
- 3) 西本弘之他：顕微干渉形状測定システムの構築，鳥工試研究報告，No18,(1996),50-56.