波長走査干渉法による高精度絶対距離測定

技術コンサルタント 〇北川 克一, ㈱溝尻光学工業所 溝尻 旬

High Precision Absolute Distance Measurement of Surface Topography using Wavelength Scanning Interferometry

Independent Consultant Katsuichi KITAGAWA, Mizojiri Optical Co., Ltd. Jun MIZOJIRI

概要:物体の表面凹凸を高精度測定する方法として,波長走査干渉法が知られている.しかし,従来技術では,高精度な絶対値測定が困難であった.筆者らは,フィゾー干渉計と波長 走査干渉法による新たな表面形状の測定アルゴリズムを開発した.10mmオーダーの絶対距 離をnmオーダーで計測する.計算機実験により,提案手法の妥当性を確認した.

1. はじめに

光干渉により物体の表面凹凸を高精度で三次元 測定する方法として,波長走査干渉法が知られて いる.波長走査干渉法では,光源に波長可変レー ザーを用い,時間的に直線的に波長を走査する. この時に得られる輝度信号の周波数が光学的距離 に比例することを利用して,対象物までの距離が 求められる.また,測定対象が透明板の場合のよ うに複数の界面があっても,それらを分離して解 析することが可能である.

筆者らは,透明物体を対象とした波長走査(または波長シフト)干渉測定アルゴリズムを既に報告している[1,2,3]. これらは,いずれもモデル適合法によるもので,大きな段差のない平滑表面を前提にしている.

一方,産業界には、1/2波長を越える大きな段 差を含む表面形状測定のニーズがある.従来技術 としては白色干渉法があるが、精度が低く、可動 部があるという欠点がある.

波長走査干渉法による不透明物体の測定アルゴ リズムを分類すると以下のようになる.

1) 周波数検出法:たとえば、ゼロクロス法[4]や フーリエ変換法[5,6]がある.

2) 位相勾配検出法:波長による位相変化の勾配 から距離を求める. 位相の計算法として, ゼロク ロス法[4], 窓関数法(位相シフト法同様に, 近傍 輝度値から位相を計算する)[7], フーリエ変換-逆変換法[8], 正弦波関数適合法[9]がある.

しかし、これらの従来技術では、数mmオーダ ーの測定レンジで数nmの測定精度を達成するこ とは非常に困難である.本報告では、これらの問 題点を解決する新たな測定アルゴリズム提案す る.

2. 測定原理

2.1 波長走査モデル

図1に示すようなフィゾー干渉光学系を構成す

る. 光源に波長可変レーザーを使用し,任意の速 度で波数(波長の逆数の2π倍)を走査可能とす る. 試料が不透明な場合,干渉信号は単純な正弦 波となり,図2に示すように,その周波数は距離 に比例する. この正弦波信号からの絶対距離推定 が,本研究の目的である.

干渉信号は、フィゾー干渉計における各界面からの反射光量を I_S , I_R とし、R-S面間距離をLとすると、波数をkとして、次式のように表される.

$$I = I_S + I_R - 2\sqrt{I_S I_R} \cos(2kL) \tag{1}$$

次に,波数走査を考える.初期波数をko,波数 走査速度をcとすると,時間tの波数は,

$$k(t) = k_0 + ct \tag{2}$$

この時,距離
$$L$$
の位相 ϕ は,
 $\phi = 2(k_0 + ct)L = \phi_0 + 2\pi ft$ (3)

ただし、 ϕ_0 は初期位相、fは周波数であり、

$$\phi_0 = 2k_0 L \tag{4}$$

$$f = cL/\pi \tag{5}$$



図1 フィゾー干渉光学系



図2 干渉波形と距離

である.式(1)を書き換え,変数定義を変更すると,

$$I(t) = a\{1 - b\cos(2\pi f t + \phi_0)\}$$
 (6)

これを**4変数モデル**と呼ぶ. これに式(4)(5)を代入すると,

$$I(t) = a\{1 - b\cos(2cLt + 2k_0L)\}$$
 (7)

これを3変数モデルと呼ぶ.

2.2 モデル適合法による絶対測定

式(7)の3変数モデルの未知数3個(*a*, *b*, *L*)は, 実測値との最小二乗適合

$$SSE(a, b, L) = \sum_{i=1}^{n} (I_i - I(t_i))^2$$
(8)

により、求めることができる.ただし、未知変数 Lは周期関数である cos 関数の中に入っているので、 多峰性があり、初期値により収束値が変わる.輝 度値は、ほぼ $\lambda/2$ の周期関数なので、評価関数 SSE も同じ周期性を持つ.よって、 $\pm \lambda/4$ (λ =600nm の場合、 ± 150 nm)の精度で初期値を与えないと正 しい結果が得られない.これをシミュレーション 結果で示す(図 3).300nm 間隔で極小値が存在し ている.

さらに、真値近傍での初期値依存性を見ると、 少なくても雑音がない場合には、図4に示すよう に、真値において適合誤差*SSE*が最小になる.よ って、複数の初期値での適合(マルチスタート 法)を実施すれば、真値を求めることができる. ただし、探索範囲を如何に狭めるかが問題であ る.

2.3 4変数モデル適合による粗推定

求めたい変数Lの粗推定法を考える.式(5)に示 すように、Lと周波数は比例関係にある.そこ で、周波数の推定を考える.必要な精度は、L =10mmの場合に1 μ mの精度と仮定すると、1/10,000 である.周波数推定で良く使われるフーリエ変換 法は、役に立たない.そこで、式(6)の4変数モデ ルを使用するモデル適合法を考える.すなわち、 観測値 I_i (i = 1, 2, ..., n) とモデルとの最小二乗適 合

$$SSE(a, b, f, \varphi_0) = \sum_{i=1}^{n} (I_i - I(t_i))^2$$
(9)

により、未知数4個(a, b, f, φ_0) を求める.この 4 変数適合は局所最適解が少なく、広範囲の初期 値に対して安定に正しい解が得られるという特徴 がある.シミュレーション結果を図5に示す.真 値10mmを中心に±10 μ mの初期値範囲に対して、 真値付近でSSEが最小になり、精度の良い距離推 定が安定に可能である.

ところで、この推定法では精度と安定性が矛盾 する.図5の実験では使用データ数を512点とし











図 5 4 変数モデル適合(データ数 = 512) の狭域初期値依存性



図6 4 変数モデル適合(データ数 = 64)の 広域初期値依存性

て、初期値幅±10μmで推定誤差1μm以下が得られ たが、初期値誤差が±0.5mmを越えると安定に収 束しない.これは、観測波形と初期モデル波形の 差が大きすぎるためである.そこで、データ数を 削減して、安定性を高める、データ数64個の場合 のシミュレーション結果を図6に示す.真値10mm を中心に±1mmの広い初期値範囲に対して,真値 付近でSSEが最小になり,推定誤差1µm以下が安 定に得られた.

2.4 提案アルゴリズム:精粗3段階推定法

以下の3段階適合推定法を提案する.

[第1ステップ]

データ数を64とした4変数モデル適合を用い て、距離Lを推定誤差数 μ m以下で推定する.変数 a, bの初期値は輝度データの平均値とレンジから 求める.周波数fの初期値は、Lの初期値から計算 する.位相 ϕ の初期値は、輝度波形が近似するよ うに与える.得られた周波数fから式(5)によりLを 求める.

[第2ステップ]

データ数を512とした4変数モデル適合を用い て、距離Lを推定誤差数百nm以下で推定する.初 期値は第1ステップの結果を利用する.得られる 周波数と位相を用いて、以下の式から距離Lを計 算する.

$$L = \left(N + \frac{\varphi_0}{2\pi}\right) \left(\frac{\lambda_0}{2}\right) \tag{10}$$

ただし、Nは干渉次数であり、次式で表される.

$$N = INT \left[\frac{L_f}{\lambda_0/2} - \frac{\varphi_0}{2\pi} \right]$$
(11)

ただし、INT[] は四捨五入整数値、 L_f は周波数から換算した距離で、式(5)を変形した次式で表される.

$$L_f = (\pi/c)f \tag{12}$$

[第3ステップ]

3変数モデル適合を用いて精推定する.未知数L の初期値は、第2ステップの結果で得られてい る.この初期値を λ/2ステップで加減するマルチ スタート法でSSEの最小となる解(大域的最適 解)を求める.通常、出発点と前後±1回の計3回 の適合で最適解が得られる.

3. 計算機実験(1):点計測

3.1 実験方法

- ・使用ソフト: Excel
- ・最適化: Solver (Excel 内蔵)
- ・輝度データ:理論計算値(図8)
 - ・中心輝度値 a:100
 - 振幅 b:1
 - ・距離 L:10mm
 - ・波数走査開始点 k₀: 2π/600 (図 7)
 - ・波数走査速度 c:-8.71E-7(波長走査速度 0.05 nm/s に対応)
 - ・撮像周期: 30 fps
 - ・撮像点数:512
 - ・雑音: 乱数による振幅±1の一様雑音

3.2 実験結果

[第1ステップ]

初期値を9mmとして,データ数64個の4変数 適合した.結果を図9に示す.周波数推定値f =-2.77379が得られた.これから,距離Lの粗推 定値として,9,999,862 nmが得られた.



[第2ステップ]

前ステップで得られた結果を利用して,4変数適 合した.結果を図10に示す.L=10,000,000 nm が得られた.



[第3ステップ]

前ステップで得られた結果を利用して,マルチ スタート方式の3変数適合した.表1に示すよう に, *L* = 10,000,000 nmが得られた.

表1 第3ステップ推定結果

回数	初期値	適合解	推定誤差	SSE
1	10,000,000	10,000,000	0	165
2	10,000,300	10,000,300	300	188
3	9,999,700	9,999,700	-300	176

4. 計算機実験(2): ライン計測

4.1 実験方法

図11に示すように、1µmの段差を持つ1次元距 離データを与えて、理論インターフェログラムを 作成した. 横方向(x座標)の画素数は、164とし た. その他の条件は、前節と同じである.

4.2 実験結果

結果を図12に示す.段差部も含め,全域で正し い推定値が得られた.



図 11 ライン計測用プロファイル



図 12 ライン計測結果(雑音振幅 1)

5. 考察

5.1 ノイズの影響

雑音振幅を2に増やした場合のシミュレーション結果を図13に示す. ±300 nmのスパイク状誤差が散発している.メディアンフィルタなどによるノイズ除去が考えられる.

5.2 計算速度向上

実装時の課題である.

5.3 他の手法との比較

精度,ロバスト性,計算時間のいずれでも優位 と推定される.

6. まとめ

フィゾー干渉計と波長走査干渉法による不透明 物体の超高精度表面形状測定法を提案した.輝度 波形に、干渉信号モデル関数を最小二乗適合し、 表面までの距離を絶対測定する.適合における局 所解問題は精粗3段階推定法により解決してい る.mmオーダーの大きな段差を含む表面形状を ナノメートルオーダーで測定できる.計算機実験 により、提案手法の妥当性を確認した.



図13 雑音振幅2の場合のライン計測結果

参考文献

- [1] 北川 克一, 溝尻 旬: 波長走査干渉法による透明板の形状測定, 光計測シンポジウム 2015 論文集, 40-43 (2015).
- [2] 北川 克一, 溝尻 旬:波長シフト干渉法による透明板の形状測定, 光計測シンポジウム 2016 論文集, 49-52 (2016).
- [3] 北川 克一, 溝尻 旬:任意波長シフト干渉法による透明板の表面形状と厚さ変動の同時測定, 光学 47(4) 165-173 (2018).
- [4] S. Kuwamura and I. Yamaguchi, Wavelength scanning profilometry for real-time surface shape measurement, Appl. Opt. 36, 4473-4482 (1997).
- [5] 洲之内 啓, 郭 志徹, 山本 明弘, 和田 智之, 加瀬 究, 山口 一郎, 田代 英夫:超広帯域波長走査干渉 計, 光学 29(10) 620-625 (2000).
- [6] 郭 志徹, 高増 潔, 山本 明弘, 和田 智之, 州之内 啓, 加瀬 究, 田代 英夫:波長走査干渉計における 信号処理, 精密工学会誌, 69, 831-835 (2003).
- [7] 日比野 謙一: 光学プロファイリングのための波長 走査干渉計測,光学 37(10) 564-569 (2008).
- [8] M. Suematsu and M. Takeda, Wavelength-shift interferometry for distance measurements using the Fourier-transform technique for fringe analysis, Appl. Opt. 30, 4046-4055 (1991).
- [9] C. Kang et al., Inspection system for microelectronics BGA package using wavelength scanning interferometry, Proc. SPIE 4564, 74-86 (2001).