

位相型回折格子を用いた ラテラルシアリング干渉計による距離計測

藤井 絵理*・古谷 雅*・藤原 久利*

*アズビル株式会社 神奈川県藤沢市川名 1-12-2
*Azbil Corporation, 1-12-2 Kawana, Fujisawa, Kanagawa, Japan
*E-mail: m.furuya.8z@azbil.com

キーワード：位相型回折格子 (phase grating), ラテラルシアリング干渉計 (lateral shear interferometer), 距離計測 (distance measurement).

JL 0003/24/6303-0190 ©2024 SICE

1. はじめに

工業分野において物体との距離や形状を非接触で光学的に計測する際の代表的な手法として、三角測距法が挙げられる。三角測距法の計測原理は、計測対象にスポット光を照射して拡散反射した光をリニアアレイセンサ等へ投影し、検出された反射光の位置が物体との距離に応じて変化することを用いて距離を計測するというものである。三角測距法では、原理的に光を照射する方向とは異なる方向において反射光を受光する必要があるため、図 1 に示すように、計測対象の形状によっては反射光が遮蔽され (オクルージョン)、計測不能領域が発生するという課題がある。その課題を解決するために、同軸光学系のラテラルシアリング干渉計を応用した位相型回折格子測距法を開発した¹⁾。

2. 位相型回折格子測距法の計測原理

位相型回折格子測距法では、距離計測に光の波面を利用する。計測対象にスポット光が照射されると、そこから拡散反射した光の波面はホイヘンス・フレネルの原理により球面状となり、計測対象からの距離が増すにつれてその曲率半径が大きくなるため、この曲率半径を求めることで、物体までの距離を計測する。波面の曲率半径を利用した距離計測手法としてはコノスコピックホログラフィ²⁾があり、この手法では複数の複屈折結晶と偏光

板を用いて物体からの拡散反射光を 2 方向に分岐させ、生じた干渉縞の空間周波数に基づいて対象との距離を計測する。位相型回折格子測距法では、位相型回折格子を用いたラテラルシアリング干渉計³⁾によって、反射光の干渉縞を生じさせ波面の曲率半径を取得する。位相型回折格子は半導体プロセスやレプリカ複製法⁴⁾によって製造できることや、光学系をシンプルな構造とできることから、量産にも適した手法としている。

位相型回折格子測距法の基本光学系を図 2 に示す。半導体レーザ等の光源を用い、L₁ レンズ、ビームスプリッタ、L₂ レンズにより計測対象にスポット光を照射する。計測対象からの拡散反射光を L₂ レンズにより集光し、位相型回折格子によって 2 方向に分岐することで干渉縞を生成し、リニアアレイセンサで干渉縞を検出する。検出した干渉縞の空間周波数 f から、(1) 式のように計測対象までの距離を求める。

$$D = \frac{FLAf}{(L - F)\Lambda f - \Delta k F} \quad (1)$$

ここで D は L₂ レンズの主点から計測対象までの距離、 F は L₂ レンズの焦点距離、 L は L₂ レンズの主点とアレイセンサとの距離、 Λ は位相型回折格子の格子ピッチ、 Δk は位相型回折格子によって生じる 2 つの回折光の次数差で正の整数である。位相型回折格子を用いることにより、特定の 2 つの次数の光を生じさせ、めいりような干渉縞を生成することが可能である。また、(1) 式に示されるように計測対象までの距離は光源の波長に依

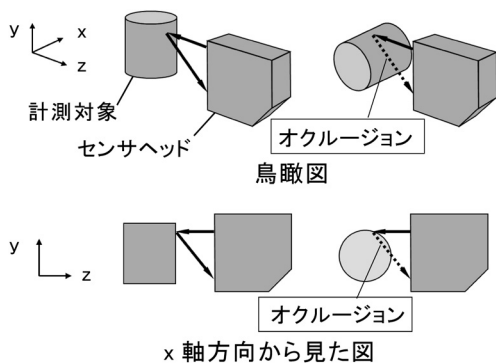


図 1 三角測距法におけるオクルージョン

三角測距法では光を当てる方向と受光する方向が異なるため、計測対象の形状によっては反射光が遮蔽され (オクルージョン)、計測不能領域が発生する。

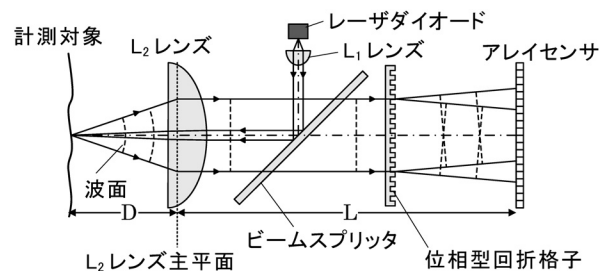


図 2 位相型回折格子測距法の基本光学系

半導体レーザ等を用い計測対象にスポット光を照射し、その拡散反射光をレンズで集光し、位相型回折格子で 2 方向に分岐して干渉縞を生成し、アレイセンサで検出する。

存しない。

3. 解析信号を用いた高分解能縞解析

干渉縞の空間周波数を求めるための1つの手法として離散フーリエ変換が用いられるが、離散フーリエ変換の周波数分解能はアレイセンサの長さの逆数であり、高分解能の距離計測を実現するためには、長いアレイセンサを必要とするため現実的ではない。そこで、周波数分解能を向上させるために、干渉縞信号を解析信号^{5), 6)}で表現し、解析信号の瞬時位相の線形近似から位相変化を求める高分解能周波数解析法を開発した。干渉縞信号の解析信号を得るためにはヒルベルト変換や直交検波法があるが、本手法では位相情報に影響を与えない離散フーリエ変換を利用する。信号処理手順を以下に示す。

- 干渉縞信号 $i(x)$ を離散フーリエ変換して $I(f)$ を求め、 $I(f)$ の正の空間周波数成分でのピーク周波数 f_0 周辺のみを抽出するバンドパスフィルタを $I(f)$ に適用し、 $I_p(f)$ を求める。
- $I_p(f)$ を f_0 だけ空間周波数領域でシフトして $I_p(f - f_0)$ を求める。これは、 f_0 がローカルオシレータであるホモダイン検出における周波数変換に相当する。
- $I_p(f - f_0)$ を逆フーリエ変換し、周波数変換された干渉縞の実部となる実信号 $i_{f_0}(x)$ と虚部となる解析信号 $i_{f_0}(x)$ を求め、それらから x 位置での位相である瞬時位相を求め、瞬時位相の近似直線を求める。
- 瞬時位相の近似直線から得られた位相変化を空間

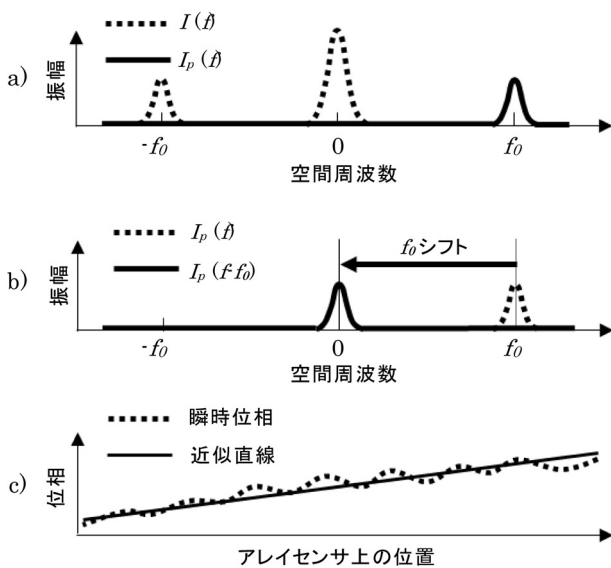


図3 高分解能周波数解析法の手順

- 干渉縞信号を離散フーリエ変換し、正の空間周波数成分でのピーク周辺を通過させるフィルタを適用する。
- ピークの空間周波数がゼロとなるようシフトする。
- 逆フーリエ変換し瞬時位相を求め、直線近似する。

周波数 f_c に変換し、 f_c を用いて f_0 を補正し、干渉縞の空間周波数を求める。

なお手順 b) の空間周波数領域でのシフトはおこなわなくても縞周波数を求めることはできるが、位相飛び⁷⁾が多くなり、位相接続ミスが起りやすくなる。手順 a) から c) の概念図を図 3 に示す。

4. 強い正反射光の影響低減解析手法

計測対象の表面状態によっては、強い正反射光が生じ、アレイセンサに入射することがある。このとき、第3章で説明した解析手順では瞬時位相に乱れが生じ、適切な近似直線が得られず正しく計測できない。その対策として、強い正反射光が入射した領域を除いて、瞬時位相の近似直線を求める手法を開発した。図 4 に示すように、アレイセンサの中央部で強い正反射光を受光した場合の解析方法を説明する。

- 正反射光が入射していないアレイセンサの左右の領域から、それぞれ干渉縞信号を抽出する。
- 第3章で説明した手順 a) から c) を用い、左右の領域それぞれで瞬時位相を求め近似直線を求める。
- 左右の領域の瞬時位相は本来連続しているため、左側の領域で求めた近似直線を右側に外挿し、右側の領域で求めた近似直線と外挿直線の差を最小化するように、右側の領域の瞬時位相に $2n\pi$ (n は整数) を加えることで、位相接続する。位相接続した瞬時位相を用いて近似直線を求める。
- 第3章で説明した手順 d) を用いて空間周波数を補正することで、強い正反射光の影響を低減して干渉縞の空間周波数を求めることができる。

5. 実験

開発した位相型回折格子測距法の精度検証、および三角測距法でオクルージョンが生じる形状を計測した際の

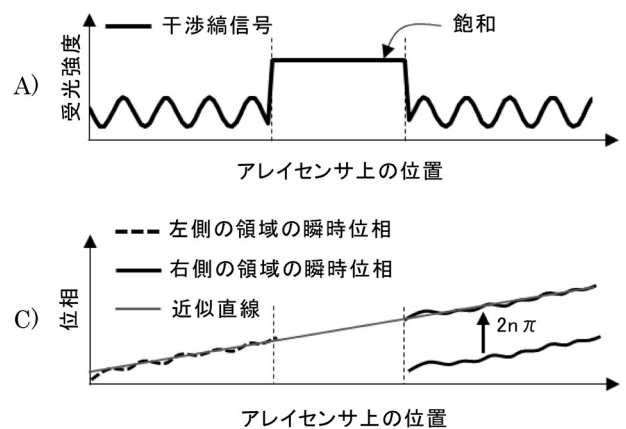


図4 強い正反射光の影響低減解析手法の手順

アレイセンサの中央部で強い正反射光を受光した場合に、左右の領域それぞれで瞬時位相を求め、右側の領域の瞬時位相に $2n\pi$ を加えて位相接続し、近似直線を求める。

影響、さらに強い正反射光が生じた際の影響を評価するために、計測対象として円柱形状の金属ピンゲージの形状計測を、三角測距法と比較しておこなった。ピンゲージの直径は5 mm、径精度（許容差）は $\pm 0.8 \mu\text{m}$ 、表面粗さ（Ra）は $0.2 \mu\text{m}$ である。位相型回折格子測距法での実験系を図5に、三角測距法での実験系を図6に示す。位相型回折格子測距法では、以下に示す2つの条件での走査実験をおこなった。

- ① x方向走査：ピンゲージを図5に示す向きに設置し、x軸方向へ走査した。
 - ② y方向走査：ピンゲージを、図5に示す向きからz軸を中心に 90° 回転させ、y軸方向へ走査した。
- 三角測距法でも以下の2つの条件で実験した。
- ①' x方向走査：図6に示すように投受光軸を含む面をyz平面と同一になるように設置し、ピンゲージをx軸方向へ走査した。
 - ②' y方向走査：ピンゲージを、図6に示す向きからz軸を中心に 90° 回転させ、y軸方向へ走査した。
- 位相型回折格子測距法と三角測距法のいずれの実験においても、ピンゲージは $20 \mu\text{m}$ ステップで走査した。

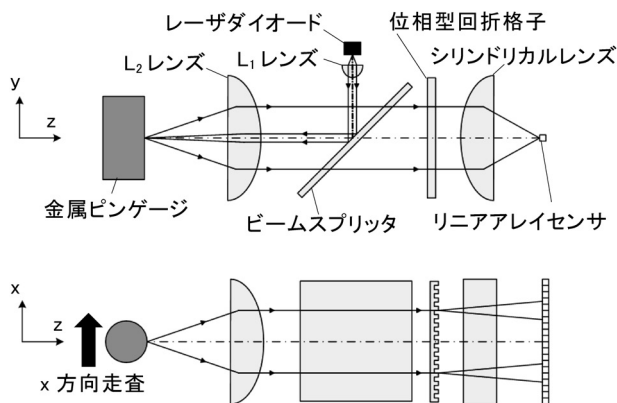


図5 位相型回折格子測距法の実験光学系
ピンゲージを、x方向走査では図に示す方向に走査し、y方向走査ではz軸中心に 90° 回転させy軸方向に走査した。

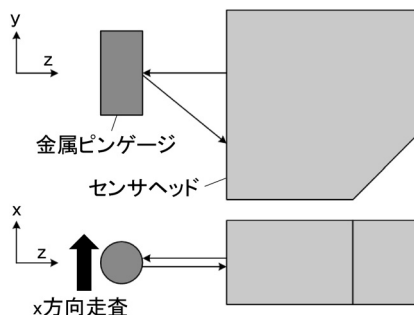


図6 三角測距法の実験光学系
ピンゲージを、x方向走査では図に示す方向に走査し、y方向走査ではz軸中心に 90° 回転させy軸方向に走査した。

6. 実験結果と考察

図7に三角測距法でのピンゲージ形状計測結果を示す。横軸は表面角度に対する計測結果に着目するためz軸に対するピンゲージ表面の角度としており、縦軸はピンゲージの中心軸を含むxy平面からの高さである。ピンゲージの形状を理想的な円柱形状と仮定し、それと形状計測結果の差分を計測誤差として図8に示す。計測精度の評価指標として誤差の標準偏差を用いると、x方向走査では -75° から $+80^\circ$ までの 155° の角度範囲で計測値が得られ、その誤差の標準偏差は $7.9 \mu\text{m}$ であった。一方、y方向走査では一部の領域において計測値の欠損や大きな誤差が生じた。 -90° から -40° の角度範囲では、オクルージョンにより計測対象からの拡散反射光を受光できず、強い正反射光による迷光が検出され、大きな誤差を生じたと推測される。 -40° から 24° の角度範囲では、計測対象からの拡散反射を受光したものの、より強い迷光を受光され、大きな誤差を生じたと推測される。

位相型回折格子測距法でのx方向走査において、z軸に対するピンゲージ表面の角度が 0° の場所での、干渉縞信号の強度分布を図9に示す。計測対象からの正反射光がリニアアレイセンサの中央部に入射しているが、信号は飽和せず、干渉縞を観測することができた。図10に、y方向走査において、図9とほぼ同じ場所で得られた干渉縞信号を示す。リニアアレイセンサとシリンドリカルが方向依存性をもつために、y方向走査ではリニアアレイセンサの中央部で信号は飽和し、干渉縞が得られなかったため、y方向走査では第4章で説明した

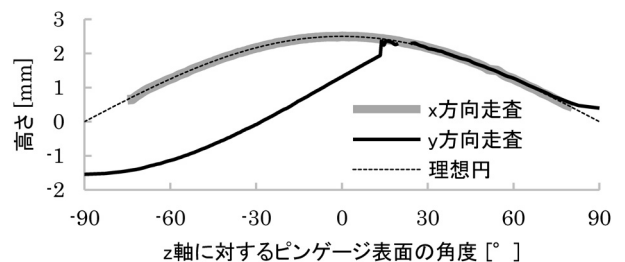


図7 三角測距法でのピンゲージ形状計測結果
y方向走査では -90° から -40° でオクルージョンが発生し、 -90° から 24° で迷光により計測値が乱れたと推測される。

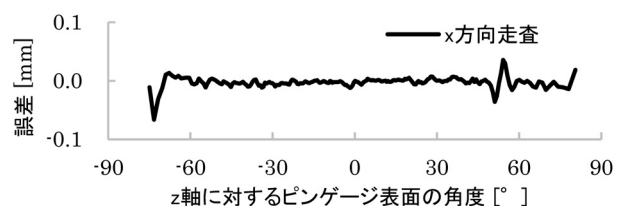


図8 三角測距法でのピンゲージ形状計測誤差
x方向走査では -75° から $+80^\circ$ で計測値が得られ、誤差の標準偏差は $7.9 \mu\text{m}$ だった。

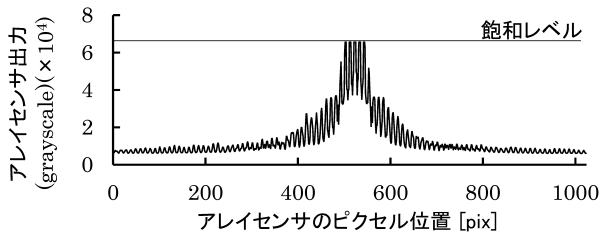


図 9 x 方向走査における干渉縞信号

位相型回折格子測距法での x 方向走査における角度 0° での干渉縞信号は、正反射光が入射した中央部でも飽和せず、干渉縞が観測された。

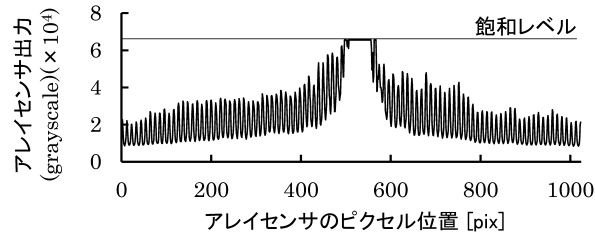


図 10 y 方向走査における干渉縞信号

位相型回折格子測距法での y 方向走査における角度 0° での干渉縞信号は、正反射光の入射により中央部で飽和し、干渉縞が得られなかった。

手法を用いて解析をおこなった。図 11 に、三角測距法と同様にピンゲージの形状を理想的な円柱形状と仮定し、それとの差分として求めた計測誤差を示す。位相型回折格子測距法での x 方向走査では、 -80° から $+80^\circ$ までの 160° の角度範囲で計測値が得られ、誤差の標準偏差は $14.2 \mu\text{m}$ だった。x 方向走査では 0° 周辺で誤差がわずかに大きくなっているが、これは正反射光がリニアアレイセンサに入射した影響によるものである。y 方向走査では、 -75° から $+78^\circ$ までの 153° の角度範囲で計測値が得られ、誤差の標準偏差は $8.2 \mu\text{m}$ だった。これらの結果は、位相型回折格子測距法は三角測距法と比較して 0° 周辺で誤差はわずかに大きくなるものの、オクルージョンが発生することなくピンゲージの形状を安定して計測できたことを示している。

7. 結論

開発した位相型回折格子測距法と三角測距法の比較評価を、金属ピンゲージの形状計測によっておこなった。三角測距法では、x 方向走査では 155° の角度範囲で計測値が得られ、誤差の標準偏差は $7.9 \mu\text{m}$ だったが、y 方向走査ではオクルージョンや強い正反射光による迷光に

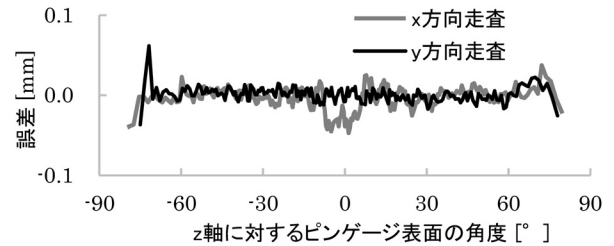


図 11 位相型回折格子測距法での形状計測誤差

x 方向走査では -80° から $+80^\circ$ で計測値が得られ、誤差の標準偏差は $14.2 \mu\text{m}$ 、y 方向走査では -75° から $+78^\circ$ で計測値が得られ、誤差の標準偏差は $8.2 \mu\text{m}$ だった。

より、計測値の欠損や大きな誤差が生じた。他方、位相型回折格子測距法では、x 方向走査では 160° の角度範囲で計測値が得られ、誤差の標準偏差が $14.2 \mu\text{m}$ 、y 方向走査では 153° の角度範囲で計測値が得られ、誤差の標準偏差が $8.2 \mu\text{m}$ と、安定して計測することができた。

本手法は距離計測に着目しているが、幅広い計測にも適用できる可能性をもっており、今後はファクトリーオートメーションやプロセスオートメーションなどにおいて適用の範囲を検討し、さまざまな用途へ応用していく予定である。

(2023 年 12 月 22 日受付)

参考文献

- 1) M. Furuya, E. Fujii, H. Fujiwara: Coaxial Displacement Sensor Using a Lateral Shear Interferometer with a Phase Grating, *Measurement: Sensors*, **18**-100084, 1/4 (2021)
- 2) G. Sirat and D. Psaltis: Conoscopic Holography, *Opt. Lett.*, **10**-1, 4/6 (1985)
- 3) D. Malacara: Optical Shop Testing, 3rd ed., 124/184, Wiley, Hoboken, NJ (2007)
- 4) J. Turunen and F. Wyrowski: Diffractive Optics for Industrial and Commercial Applications, Akademie Verlag, Berlin (1997)
- 5) J. W. Goodman: Statistical Optics, 2nd ed., 98/100, Wiley, Hoboken, NJ (2015)
- 6) A. V. Oppenheim and R. W. Schaffer, with J. R. Buck: Discrete-Time Signal Processing, 2nd ed., chapter 11, Prentice-Hall, Upper Saddle River, NJ (1999)
- 7) K. Creath: V Phase-Measurement Interferometry Techniques, *Progress in Optics*, **26**, 349/393 (1988)

[著者紹介]

(本誌 62-11 会告 参照)