

## スティッチング処理を用いたきさげ加工面の広範囲測定に関する研究

富山県立大学 ○有賀正和, ◎伊東 聡, 松本 公久, 神谷 和秀

## 要旨

きさげ加工は定盤や工作機械摺動面の表面を高精度な平滑面に仕上げる手仕上げ作業である。先行研究では、きさげ加工された粗面の表面形状測定のために斜入射干渉計を導入したが、1回の測定における範囲の制限に課題があった。本研究では、斜入射干渉計による測定範囲を拡大するために、複数枚の表面形状データをスティッチング処理し、測定範囲の拡大を試みた結果について報告する。

## 1. はじめに

きさげ加工<sup>1)</sup>はのみ状工具を用いて金属表面を高精度な平滑面に仕上げる手仕上げ作業であり、高い平面度が要求される定盤や工作機械の摺動面など大型部品に多く施されている。きさげ加工によって創生された表面の微小な窪みは油溜りの形成によりリングングを防ぐため、優れた摺動性を付与するとされている<sup>2)</sup>。しかしながら、表面微細形状と摺動特性の関係は学術的に明らかになっていない。一方、加工現場におけるきさげ加工の平面度検査では、顔料を塗った加工面と基準の定盤とをすり合わせ、顔料の剥離に基づき高低差を識別する定性的な手法が広く行われている。きさげ加工やすり合わせは作業者の技能に依存し、技能の習得には多大な時間と経験を要する。そのため、きさげ加工の能率向上や技能習得の効率化のために、加工面全体の形状を加工現場にて定量的に測定可能なシステムが有効であると期待される。光干渉法を用いた非接触式測定機は表面形状の非接触測定に広く使用されるが、きさげ加工面のような粗面では反射光の取得が困難であり、形状測定が難しい。先行研究<sup>3)</sup>では、きさげ加工面における表面形状の非接触計測を目的として、粗面上での反射光検出が容易な斜入射干渉計を用いた計測が行われた。一般的なきさげ加工面は数 cm 四方に対し、先行研究の測定範囲は 24.1 mm × 15.1 mm と小さく、きさげ加工面全体に及ぶ表面形状の計測が行えなかった。本研究では、斜入射干渉計によるきさげ加工面形状の測定範囲を拡大するために、複数枚の表面形状データを連結させるスティッチング処理<sup>4)</sup>の導入について検証を行った。測定された2つの表面形状にスティッチング処理を適用し、測定範囲の拡大への有効性と測定精度を評価した。

## 2. 原理

## 2.1. 位相シフト型アブラムソン干渉計を用いた表面形状測定

図1に斜入射干渉の1種であるアブラムソン干渉計<sup>5)</sup>の原理を示す。拡大された平行レーザ光は直角プリズムのAB面から入射する。BC面にて入射光の一部は反射して参照光となり、その他は透過して測定物体表面で反射し測定光となる。再度BC面に入射した測定光は参照光と重なり干渉縞を形成する。プリズム底面と測定物体表面との距離 $h$ は、レーザ光波長 $\lambda$ 、入射角 $\theta$ 、繰回数 $m$ より、次式で示される。

$$h = \frac{1}{\cos\theta} \cdot \frac{m\lambda}{2} \quad (1)$$

式(1)より、入射角 $\theta$ によって干渉縞の感度が適度に減少するため、表面の凹凸が数  $\mu\text{m}$  の粗面においても縞間隔が密にならず干渉縞画像を取得できる。1枚の干渉縞画像では隣接する縞間の高低は不明であるため、参照光と測定光の光路差を一定間隔で変化させて取得した5枚の干渉縞画像に位相シフト法<sup>6)</sup>を適用することによって位相分布 $\varphi(x, y)$ を算出する。算出された位相分布 $\varphi(x, y)$ の範囲は $(-\pi, \pi)$ に畳み込まれているため、位相接続を行う。隣接する縞間の高低差は $\lambda/2\cos\theta$ であるため、位相分布 $\varphi(x, y)$ と表面形

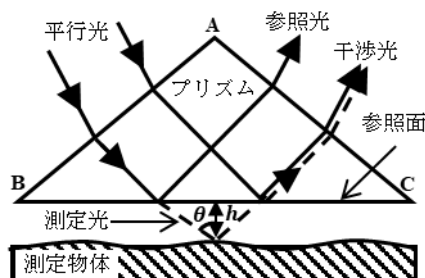


図1 アブラムソン干渉計の原理

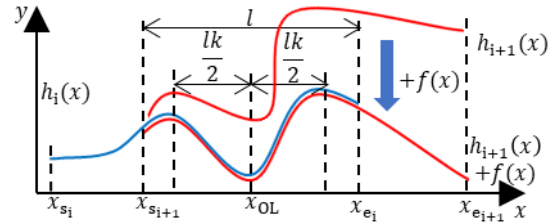


図2 スティッチングによる形状結合

状 $h(x, y)$ の関係は次式で表される。

$$h(x, y) = \frac{\lambda}{4m\cos\theta} \cdot \varphi(x, y) \quad (2)$$

結果として、5枚の干渉縞画像から表面形状 $h(x, y)$ が算出される。

## 2.2. スティッチングを用いた広領域断面プロファイルの生成

スティッチングは部分的に測定したデータを合成し、1つの結合したデータにする方法である。図2にスティッチングによる測定形状結合の模式図を示す。1回目の測定で得られる形状プロファイルを $h_i(x)$ とする。長さ $l$ のオーバーラップ(OL)部分を含むように2回目の形状プロファイルを $h_{i+1}(x)$ とする。ここで、 $h_i$ 、 $h_{i+1}$ の $x$ 軸上の始点を $x_{s_i}$ 、 $x_{s_{i+1}}$ 、終点を $x_{e_i}$ 、 $x_{e_{i+1}}$ とする。また、OL部分のうちスティッチング処理に使用する範囲の割合を $k$  ( $0 < k < 1$ ) とするとき、 $l$ 及び $lk$ の中心を $x_{OL}$ とする。本研究では、測定箇所の移動量と移動方向が既知であり、各測定範囲の拡大倍率は一定とした。 $h_i(x)$ を基準とすると、 $h_{i+1}(x)$ には傾斜とバイアスからなる姿勢情報が含まれる。これらによる誤差を姿勢誤差と称し、姿勢誤差は上述の範囲 $lk$ における形状プロファイルの差分 $h_i(x) - h_{i+1}(x)$ から算出する。姿勢誤差に最小二乗近似を適用し得られる一次関数 $f(x)$ は、 $h_{i+1}(x)$ の $h_i(x)$ に対する傾斜成分誤差を $p_1$ 、バイアス成分誤差を $p_2$ として次式で表される。

$$f(x) = p_1x - p_2 \quad (3)$$

最小二乗近似により得られた一次関数 $f(x)$ は、 $h_{i+1}(x)$ の $h_i(x)$ に対する $h_{i+1}(x)$ に $f(x)$ を加算し、形状プロファイル間の姿勢誤差を除去することで形状プロファイルが接合される<sup>7)</sup>。隣り合う形状プロファイル $h_i$ 、 $h_{i+1}$ にスティッチングを施すことで合成された形状プロファイル $H_{sti}(x)$ は次式で示される。

$$H_{sti} = \begin{cases} h_i & \left(x_{s_i} \leq x < x_{OL} - \frac{lk}{2}\right) \\ \frac{\{h_i + h_{i+1} + f(x)\}}{2} & \left(x_{OL} - \frac{lk}{2} \leq x \leq x_{OL} + \frac{lk}{2}\right) \\ h_{i+1} + f(x) & \left(x_{OL} + \frac{lk}{2} < x \leq x_{e_{i+1}}\right) \end{cases} \quad (4)$$

線形最小二乗法は残差二乗和が最小になる回帰直線を算出する方法であり、極端な外れ値が大きく影響する。そこで、Random Sample Consensus (RANSAC) アルゴリズムを用いた MATLAB の関数 ransac により外れ値を省いた最小二乗法を適用した。

## 3. 実験

図3に実験に用いた位相シフト型アブラムソン干渉計の構成を示す。測定対象は平面精度  $15 \mu\text{m}$  の箱型定盤(OS-105, 大西測定)を用いた。光源は波長  $633 \text{ nm}$  の He-Ne レーザを使用し、空間フィルタと凸レンズを通してビーム径が拡大される。拡大されたレーザ光は直角プリズムに入射され、測定光と参照光の干渉縞はカメラレンズを通してイメージングセンサ( $1280 \times 1024 \text{ pixel}$ )で撮影される。斜面上の撮影対象全体に焦点を合わせるために、シャインブルーの条件を満たすカメラレンズ(PC Micro-Nikkor 85mm f/2.8D)を用いた。測定範囲は  $27.0 \text{ mm} \times 16.9 \text{ mm}$  とした。定盤は圧

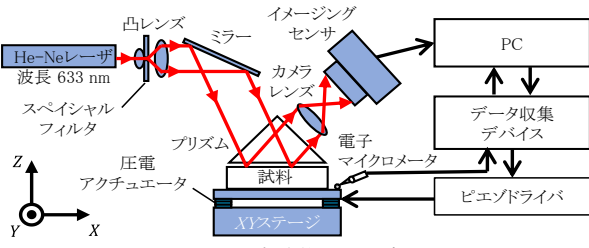


図 3. 実験装置の構成

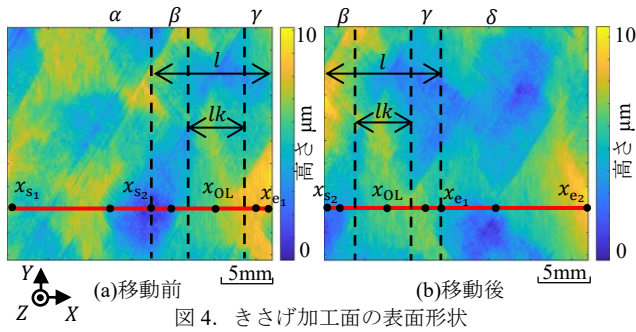
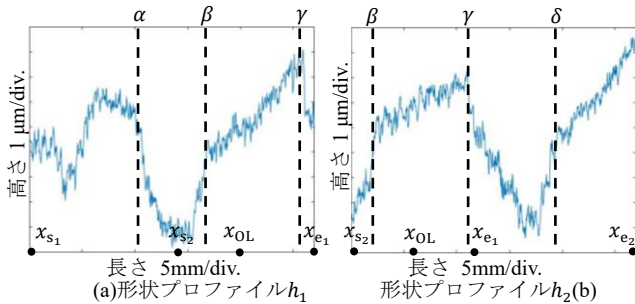


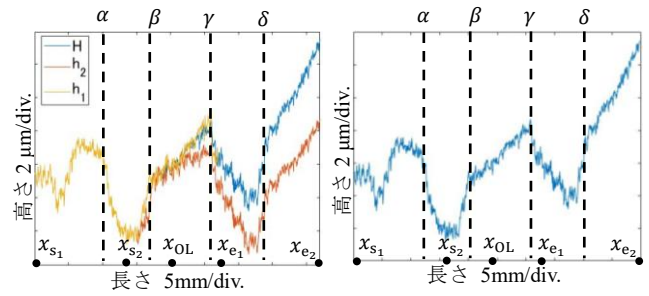
図 4. きさげ加工面の表面形状

図 5. 線分 $x_{s_1}$ - $x_{e_1}$ ,  $x_{s_2}$ - $x_{e_2}$ における形状プロファイル

電アクチュエータにより Z 軸方向に変位させ、干渉縞の位相シフトを行った。測定光の入射角は  $79.0^\circ$  であり、 $\pi/2$  rad の位相シフトに対応する定盤の Z 軸方向の変位は  $0.413 \mu\text{m}$  であった。干渉縞の位相が  $\pi/2$  rad シフトする毎に形状測定のための 5 枚の干渉縞画像を撮影した。その後、X 方向に 15 mm 移動させ、同様に干渉縞画像を撮影した。

#### 4. 結果・考察

干渉縞画像より算出したきさげ加工面の表面形状を図 4 に示す。図 4(b)は、図 4(a)の測定範囲から X 方向に 15 mm 移動させて測定し、OL 部分の長さ  $l$  は 12 mm である。図 4 に示す表面形状から形状プロファイルを抽出し、2-2 節に示したステッチング処理により結合した。図 4(a), (b)中の赤線  $x_{s_1}$ - $x_{e_1}$  及び  $x_{s_2}$ - $x_{e_2}$  によって示す形状プロファイル  $h_1$ ,  $h_2$  を図 5 に示す。図 5 の範囲  $\alpha$ - $\beta$ ,  $\gamma$ - $\delta$  では、 $5 \mu\text{m}$  以上の高さの減少が確認され、きさげ加工痕と推定される。きさげ加工痕の最大深さを  $D$  としたとき、 $h_1$ ,  $h_2$  の範囲  $\alpha$ - $\beta$ ,  $\gamma$ - $\delta$  におけるきさげ加工痕の最大深さ  $D_1$ ,  $D_2$  はそれぞれ  $5.4 \mu\text{m}$ ,  $6.5 \mu\text{m}$  であった。また、著しい凹部が観察されない範囲  $\beta$ - $\gamma$  はきさげ加工が施されていない平坦部分と推定される。形状プロファイルの最大値と最小値の差分を最大振幅  $A$  としたとき、図 5 に示す形状プロファイル  $h_1$ ,  $h_2$  の最大振幅  $A_1$ ,  $A_2$  はそれぞれ  $7.8 \mu\text{m}$ ,  $8.4 \mu\text{m}$  であった。 $k = 0.5$  として  $h_2$  にステッチング処理を適用し、姿勢誤差を取り除いた形状プロファイル  $H$  を算出した。最小二乗近似により得られた一次関数  $f(x)$  の傾斜成分誤差  $p_1$  は  $5.2 \times 10^{-3}$ 、バイアス成分誤差  $p_2$  は  $-4.3739$  であった。図 6(a)に形状プロファイル  $H$  および  $h_1$ ,  $h_2$  の比較を示す。 $H$  の範囲  $\gamma$ - $\delta$  におけるきさげ加工痕の最大深さ  $D_H$  は  $5.4 \mu\text{m}$  であり、 $D_2$  に比べ  $1.1 \mu\text{m}$  減少したため、傾斜成分誤差の除去はきさげ加工痕の最大深さに影響を与えた。形状プロファイルの範囲  $\beta$ - $\gamma$  における平均振幅の平均を  $Z$  としたとき、形状プロファイル  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $H$  の平均振幅  $Z_1$ ,  $Z_2$ ,  $Z_H$  はそれぞれ  $6.32 \mu\text{m}$ ,  $5.88 \mu\text{m}$ ,  $6.27 \mu\text{m}$  であった。平均振幅の差分  $Z_1 - Z_2$ ,  $Z_1 - Z_H$  はそれぞれ  $434 \text{ nm}$ ,  $41.5 \text{ nm}$  であり、バイアス成分誤

図 6. ステッチングによる合成  
(a)形状プロファイルの比較 (b)合成測定形状 $H_{st1}$ 

差は  $392.5 \text{ nm}$  減少した。結果として、ステッチング処理により形状プロファイル  $h_1$  と  $h_2$  間の姿勢誤差は除去できたと考えられる。図 6(b)に  $h_1$ ,  $H$  を合成した測定形状プロファイル  $H_{st1}$  を示す。1 回の測定における X 方向の測定範囲は  $27.0 \text{ mm}$  であった。ステッチング処理により測定範囲は  $42 \text{ mm}$  にまで拡大された。ステッチング処理前後で斜入射干渉計の水平分解能は変わらないため、2 つの表面形状により測定範囲を 1.6 倍に拡大できた。 $H_{st1}$  の最大振幅  $A_{Hst1}$  は  $12.6 \mu\text{m}$  であり、ステッチング処理前の振幅  $A_2$  と比較し  $4.2 \mu\text{m}$  増加した。一方、 $A_{Hst1}$  は用いた定盤の平面度の公称値である  $15 \mu\text{m}$  以内であることが確認された。合成測定形状は各形状プロファイル間の相対的な姿勢誤差が除去されるため、基準となる形状プロファイルの傾斜が合成測定形状の最大振幅やきさげ加工痕の最大深さに影響する。今後は基準とする測定形状の姿勢誤差の除去や補正方法について検証が必要である。既知の表面形状を有する参照基準を用いた測定を実施し、測定形状及び高さに対する校正を実施することで、アライメント誤差や測定誤差の影響を評価し、ステッチング処理の基準とする測定形状の姿勢誤差の評価を試みる。

#### 5. まとめ

本研究では、斜入射干渉計によるきさげ加工面形状の測定範囲の拡大を目的として、2 枚の表面形状にステッチング処理を適用した。その結果、姿勢誤差の低減を行えたと考えられ、X 軸方向の測定範囲が 1.6 倍に拡大できた。合成測定形状は 2 つの形状プロファイルの相対的な姿勢誤差のみを取り除き算出される。基準姿勢の傾斜が合成測定形状振幅やきさげ加工痕の深さに影響するため、基準姿勢の決定に課題があった。今後は基準とする測定形状の姿勢誤差の補正方法について検証が必要である。

#### 謝辞

本研究は 2020 年度コニカミノルタ光みらい若手奨励金の助成を受けて行われたことを記し、謝意を示す。

#### 参考文献

- WAYNE R. MOORE: Foundations of Mechanical Accuracy, Moore Special Tool Company, (1970), pp.20-29.
- 堤 博貴, 久曾神 煌, 福田 勝己: きさげ仕上げされたすべり案内面のトライボロジー特性評価, 日本機械学会論文集, 第 72 巻, 第 721 号, (2006), pp.325-331.
- So Ito, Daiki Kameoka, Kimihisa Matsumoto, Kazuhide Kamiya: Design and Development of Oblique-Incident Interferometer for form Measurement of Hand-Scraped Surfaces, Nanomanufacturing and Metrology, (in press).
- Qiaolin Li, Yuki Shimizu, Toshiki Saito, Hiraku Matsukuma and Wei Gao: Measurement Uncertainty Analysis of a Stitching Linear-Scan Method for the Evaluation of Roundness of Small Cylinders, (2020), pp. 4750
- 大谷 幸利, 吉澤 徹, 押野 則子: 位相シフト型アブラムソン干渉計による粗面測定, 精密工学会誌, 第 60 巻, 第 3 号, (1994), pp. 432-435.
- Daniel Malacara 編: 光学実験・測定法 II (成相 恭二, 清原 順子, 辻内 順平 訳), (2010), pp.134-136.
- Yuan-Liu Chen, Yuki Machida, Yuki Shimizu, Hiraku Matsukuma, Wei Gao: A stitching linear-scan method for roundness measurement of small cylinders, CIRP Annals, (2018), pp.535-538.