近似参照形状を用いたスティッチ・アルゴリズムの開発*

根 岸 真 人** 保 坂 光 太 郎*** 堆 浩 太 郎***

Development of a Stitch Algorithm Using the Approximated Reference Shape

Mahito NEGISHI, Kotaro HOSAKA and Kotaro AKUTSU

For the mass production of large, severe aspherical optics, we have developed a new stitch algorithm named ARSA (Approximated Reference Shape Algorithm) which can be used for free-form measurement machines. The stitching measurement, which combines plural partial measurements into a whole shape, has been developed based on interferometry and is now widely used. The well known algorithm calculates the stitching parameters so as to minimize the mismatch in the overlapping area. However, with a free-form measurement machine using a scanning probe, the measured data are sparse and contain 3D points, causing significant calculation errors such as interpolation errors in the overlapping area. ARSA is based on minimizing the error of estimating the approximated reference shape. This algorithm has the unique feature that the calculation error is smaller in the case of severer asphericity and the interpolation error is also small for the same reason as in the case of interferometry. We classify the workpiece's shape into three spatial frequency domains and assess the performance for each case by simulation. The simulated measurement data are three sets of 3D points in fan-shaped partial measurements, and the workpiece's shape is a convex hyperboloid whose asphericity is 1.282 mm for the full aperture of 1200 mm. In all three domains the calculation results coincide with the theoretical values to within nanometer level. These results show the validity of this new algorithm.

Key words: stitching measurement, stitching algorithm, aspherical optics, free-form measurement, overlap area

1. 緒 言

光学素子の形状測定において、部分測定を合成して全体形状を得るスティッチ測定技術は測定領域の拡大を目的として干渉計をベースに研究が開始された¹⁾²⁾。この技術のポイントは測定した干渉波面に含まれるアライメント誤差を推定し、除去する事である。当初は対象が平面だったので高さと傾斜をスティッチパラメータとして誤差をモデル化し、オーバーラップ部のミスマッチが最小になるようにパラメータを決定する方法だった。この方法は望遠鏡用の大口径ミラー製作に応用され³⁾、実用化が進んでいる。さらに真直度測定にも応用され、X線用の高精度光学面の評価を実現している⁴⁾。

また、スティッチ技術を使えば1回の測定領域を分割して狭くできることを利用し、干渉計を使った非球面計測も可能になった。従来の代表的な非球面計測法である CGH (Computer Generated Hologram) に比べ、全面の参照波面を作る必要が無いので装置が簡単になり汎用性も高まる。自動的に小径の測定領域を重ね合わせてスティッチ測定する干渉計が開発され非球面の高精度測定が可能になった⁵⁾。さらに、ステージを一旦停止せずに干渉計測する装置も提案されている⁶⁾。その他、シャックハルトマンセンサを用いる方法⁷⁾、円環状の測定領域を組み合わせる方法、参照波面を微調整しながら部分測定する方法などが実用化されている⁸⁾。3次元立体計測に対しては円筒近似できるという制約条件つきながら、円筒誤差モデルを採用することにより 360 度の分割測定が実現できている⁹⁾。さらに6自由度の位置姿勢誤差を考慮した全周測定もスティッチ測定技術によ

Fig. 1 Principle of the stitch algorithms

て可能なことが示された¹⁰⁾。

スティッチ測定技術の重要なもう一つの側面は測定装置が固有に持っている系統誤差、すなわち各測定データに共通に現れる誤差もスティッチパラメータに加えることによって推定し、除去できることである。この技術に応用した干渉計の再現性はサブナノメートルに達している¹¹⁾。このように、スティッチ技術は単純に測定領域を拡大するだけに留まらず、被測定物の形状自由度を拡大し、測定精度の向上も可能な技術として発展し、今や市販装置に搭載される広く普及した技術となっている⁵⁾¹¹⁾。

以上述べた従来のスティッチ技術で多用されるアルゴリズムは図1(a)に示すように、オーバーラップ部のミスマッチが最小になるようにスティッチパラメータを計算する方法であった。従ってオーバーラップ部の面積や、測定データの品質が重要になる。実際、大坪らはオーバーラップ部の幅の 1.5 乗に反比例して誤差が減少する実験結果を得ている²⁾。

一方、著者らはこれまで接触式プローブを走査する A-Ruler と呼ぶ自由曲面測定装置を開発してきた^{12,13)}。このような測定装置の測定データは干渉計と異なりまばらな 3次元点列である。測定点がまばらなのでオーバーラップ領域の定義が難しいし、3次元点列なのでミスマッチを計算する際の補間誤差も大きい。

* 原稿受付 平成 26 年 10 月 25 日

掲載決定 平成 27 年 2 月 16 日

** 正 会 員 キヤノン株式会社 (神奈川県川崎市幸区柳町 70-1)

*** キヤノン株式会社

このように自由曲面測定装置のスティッチ測定には干渉計では顕在化しなかった深刻な課題がある。そこで本論文では近似参照形状を使う新しいスティッチ計算方法 ARSA (Approximated Reference Shape Algorithm) を提案する^{14,15)}。

本論文の2章では提案するスティッチ・アルゴリズムを従来法と対比しながら示し、3章では計算誤差を空間周波数ごとに分類して考察する。4章ではシミュレーションにより空間周波数ごとに ARSA の計算誤差を検証し、妥当性を示す。

2. スティッチ・アルゴリズム

2.1 従来のアルゴリズムと課題

一般にスティッチ技術は次の4つの項目から構成されている。

- (1) 部分測定領域の配置方法
- (2) 評価関数の構成方法
- (3) 評価関数の最適化方法
- (4) 部分測定結果を合成する方法

従来、多用されるのは(2)の評価関数をオーバーラップ部における各測定の差異、すなわちミスマッチとし、それを最小化する方法である。次の記号を用いる。

$T(\mathbf{p}_i)$	位置姿勢パラメータ $\mathbf{p}_i$ を含む 4×4 同次座標変換行列。 i は部分測定の番号
$z = Q(x, y, \mathbf{q})$	パラメータ $\mathbf{q}$ を含む系統誤差
$z = D(x, y)$	被測定物の設計形状
f_i	第 i 番目の部分測定で得られる測定点の集合
$F_i(\mathbf{p}_i, \mathbf{q})$	グローバル座標に変換した測定点の集合

ここでグローバル座標は被測定物に唯一定義し、座標の左肩に G のマークをつけて区別する。通常は被測定面の設計形状を定義する座標系として用いる。また、測定点の番号を n とし、各測定点の座標を次のように表記する。

$$\begin{aligned} (x_{i,n}, y_{i,n}, z_{i,n})^t &\in f_i \\ ({}^G x_{i,n}, {}^G y_{i,n}, {}^G z_{i,n})^t &\in F_i(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}) \end{aligned}$$

次式で測定点 f_i をグローバル座標に変換する。末尾の1は同次座標変換するために追加した要素である。

$$\begin{aligned} ({}^G x_{i,n}, {}^G y_{i,n}, {}^G z_{i,n}, 1)^t &= \\ T(\mathbf{p}_i) \begin{pmatrix} x_{i,n} \\ y_{i,n} \\ z_{i,n} + Q(x_{i,n}, y_{i,n}, \mathbf{q}) \\ 1 \end{pmatrix}^t \end{aligned} \quad (1)$$

測定点の集合 F_i から任意の x, y 座標に対する z 座標を計算する補間関数を $z = \mathfrak{Z}(x, y, F_i)$ と表し、第 i, j 測定間のオーバーラップ領域のミスマッチを次のように表記する。

$$\begin{aligned} h_{i,j}({}^G x, {}^G y, \mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j, \mathbf{q}) \Big|_{{}^G x, {}^G y \in \text{Overlap}} \\ = \mathfrak{Z}({}^G x, {}^G y, F_i(\mathbf{p}_i, \mathbf{q})) - \mathfrak{Z}({}^G x, {}^G y, F_j(\mathbf{p}_j, \mathbf{q})) \end{aligned} \quad (2)$$

オーバーラップ領域に含まれる測定点の総数 N_{Overlap} は収束計算の途中で変動する。この影響を軽減するため評価関数は次式に示すようにミスマッチの2乗平均とする。

$$E = \frac{1}{N_{\text{Overlap}}} \sum_i \sum_{j \neq i} \sum_{x, y \in \text{Overlap}} h_{i,j}({}^G x_{i,n}, {}^G y_{i,n}, \mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j, \mathbf{q})^2 \quad (3)$$

この評価関数を最小にするパラメータ $\mathbf{p}_i, \mathbf{q}$ を計算し測定結果

を接続する(図1(a))。つまりミスマッチ最小を目指す。

しかし、この方法を自由曲面測定装置に応用するには問題がある。第1に測定データがまばらで3次元的な点の集合なので式(2)の補間処理の誤差が大きい。例えば高精度な光学レンズの測定ではナノメートルオーダーの測定精度が要求される。この場合、間隔がミリメートルオーダーのまばらな測定点に対してナノメートルの補間精度が必要となるが、これは困難な目標である。第2に評価関数がオーバーラップ領域だけで定義されるので有効なデータ点数がさらに少なくなり、1点の測定誤差が全体形状に与える影響が大きい。第3に測定点がまばらなのでオーバーラップ領域を精密に決定できない。オーバーラップ領域の変化は全体形状に影響して歪める。さらに最適化に関与するデータ点数が変化するため、式(3)の評価関数の値が不連続に変化する。これは最適化の収束性を著しく悪化させる。

以上の理由から従来のスティッチ方法を実用的な精度で自由曲面測定装置に応用することは難しい。

2.2 近似参照形状アルゴリズム (ARSA)

前述した問題はミスマッチを評価関数としたことから生じた。そこで新しい評価関数を考える。まず自由曲面測定装置の測定対象は光学面なので次を仮定してもよい。

A1: 設計形状は非球面

A2: 誤差形状は低周波成分と高周波成分に分離可能

最初の仮定 A1 から設計形状にフィットすることによって位置姿勢が決まる。この時、非球面量が大きいほど位置姿勢の推定誤差が小さいので有利である。例えば平面の場合は高さや傾斜しか決定できないが、軸対象非球面の場合は光軸回りの回転を除く5自由度の位置姿勢を決定できる。ただし被測定物の誤差形状、特に低周波成分が推定値に影響するため、このままではうまくいかない。そこで低周波成分を受け持つ近似参照形状 (Approximated Reference Shape) を定義し、位置姿勢と同時に推定する。ここで近似参照形状は測定領域全体で定義される C^1 級の連続曲面であり、パラメータを $\mathbf{r}$ とし、 $z = G(x, y, \mathbf{r})$ と表記する。具体的には、位置姿勢誤差に影響する低周波成分を表現するのが目的なので低次の多項式が好適である。この場合 $\mathbf{r}$ は多項式の各項の係数となる。特に本論文では円形領域のスティッチ測定を扱うので、単位円で定義される直交関数系の Zernike 多項式を用いる。この近似参照形状を用い、残差を次式で定義、

$$e_{i,n}(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}, \mathbf{r}) = {}^G z_{i,n} - D({}^G x_{i,n}, {}^G y_{i,n}) - G({}^G x_{i,n}, {}^G y_{i,n}, \mathbf{r}) \quad (4)$$

これを用い、評価関数を次のように定義する。

$$E = \sum_i \sum_n e_{i,n}(\mathbf{p}_i, \mathbf{q}, \mathbf{r})^2 \quad (5)$$

この評価関数を最小にするパラメータ $\mathbf{p}_i, \mathbf{q}, \mathbf{r}$ を求める。従来の方法がミスマッチ最少を目指すのに対し(図1(a))提案する方法は近似参照形状の推定誤差最少を目指す(図1(b))。近似参照形状を用いることによって全部の測定点を使うパラメータ推定が可能になる。また、 D や G は連続関数なので困難だった3次元点列を補間する必要が無い。さらに、オーバーラップ領域を区別して特別な処理をする必要も無いので前述した従来法の問題を解決できる。

また、提案する方法はミスマッチの計算精度も向上できる。式(4)で定義した残差を構成する D や G は全測定で共通なので、第 i, j 測定間のオーバーラップ領域のミスマッチは残差どうしの差として次式で計算してよい。

$$h_{i,j}(G_x, G_y, p_i, p_j, q, r) \Big|_{G_x, G_y \in \text{Overlap}} \quad (6)$$

$$= \Im(G_x, G_y, e_i(p_i, q, r)) - \Im(G_x, G_y, e_j(p_j, q, r))$$

式(2)の従来法と比べると、補間するデータが残差なので値が桁違いに小さい。このため参照波面からの差を測定する干渉計の場合と同様なレベルで補間誤差を小さくできる。実際には後述するシミュレーションで確認する。

以上説明した最適化を含む全体の計算フローを図2に示す。計算手順は3つの工程から構成する。第1工程は最適化計算の前処理部である。この工程は最適化にとって有害な高周波成分を分離して保存、一旦計算から除外する。その手順はまず通常測定の場合と同様にローカルフィットし、測定データ f_i から設計形状を差し引いて誤差形状を求める¹⁶⁾。この誤差形状に対し、仮定A2を用い、高周波成分を分離する。この時用いるローパスフィルタのカットオフ周波数は近似参照形状が受け持つ低周波成分より高い周波数に設定する。また、隣接測定点との差が大きい測定点を選択して分離する方法も有効である¹⁷⁾。

第2工程ではまず式(5)を評価関数とする最適化問題を解く。残差 $e_{i,n}(p_i, q, r)$ のパラメータをまとめて α と記述し、最小2乗法を適用すると次の正規方程式を得る¹⁸⁾。この連立一次方程式を解いて修正ベクトル $\delta\alpha$ を計算、 α の修正を繰返すことにより式(5)を最小化するスティッチパラメータ α を求める。

$$\sum_j \sum_i \sum_n \frac{\partial e_{i,n}(\alpha)}{\partial \alpha_j} \frac{\partial e_{i,n}(\alpha)}{\partial \alpha_k} \delta \alpha_j = - \sum_i \sum_n \frac{\partial e_{i,n}(\alpha)}{\partial \alpha_k} e_{i,n}(\alpha) \quad (7)$$

この時、最適化が収束するように留意することが重要である。後述するようにスティッチパラメータから非独立なものを除外する方法や特異値分解を応用する方法が考えられる。

最適化が完了すると、収束したスティッチパラメータを用いて測定点をグローバル座標に変換し、設計形状と近似参照形状を差し引いて式(4)の残差 $e_{i,n}(p_i, q, r)$ を求める。

第3工程ではまず第1工程で除去した高周波成分を残差に加えてもとに戻す。次に重み付け平均して一つに合成する。この時、重みとして目標のXY位置からの偏差を使う方法が提案されている¹⁹⁾。本報では部分測定データをより滑らかに合成するため、測定領域周辺からの距離も重みとした。これには中央部のほうが周辺部よりデータの信頼性が高いという意図がある。最後に第2工程で推定した近似参照形状 G を加算する。このように、データを合成した後に加算する理由は、合成するときの補間誤差を軽減するためである。

3. 計算誤差の考察

測定データのパワースペクトルを、図3に示すように3種類の形状成分 S1~S3 と、3種類の測定誤差成分 E1~E3 に分類して考える。被測定物を非球面光学素子とすると中間周波数成分 S2 と高周波成分 S3 は周波数が高いほど振幅が小さい。また、低周波成分 S1 は加工条件により制御可能である。例えば、形状測定に基づくスモールツール修正研磨法では工具の滞留時間を調節することにより目標形状に近づけることができる²⁰⁾。その結果、低周波成分の振幅が抑えられ、パワースペクトルは図のように折れ曲がるが、一般的に S1 の振幅が最も大きい。このように、周波数とともに振幅が小さくなる形状は測定点を多くできない自由曲面測定装置にとっては好都合である。一方、測定誤差についてはセッティング誤差とも呼ばれる被測定物の位置

Fig. 2 Flow chart of ARSA (Approximated Reference Shape Algorithm)

Fig. 3 Power spectrum of the measured data

姿勢誤差 E1、再現する系統誤差 E2、そして再現性の無い誤差 E3 に分類する。それらの振幅は測定原理や装置の構成によって異なるが、自由曲面測定装置の場合は E1 が最も大きい。

目的は測定データから誤差 E1~E3 を推定、除去し、被測定物の形状 S1~S3 を抽出することである。その目的に向けて、図2に示した ARSA がどのように作用するのか考察する。

高周波成分についてはまず再現性の無いランダム誤差 E3 の低減が重要である。スティッチでは同一箇所を重複測定する領域がある。その領域では n 回の重複に対し誤差が $1/\sqrt{n}$ となる平均効果が期待できる。また被測定物の高周波成分 S3 については振幅が小さい上に、測定点がまばらな自由曲面測定装置では感度が無い。しかし実用上注意すべき高周波を含む形状として段差や溝といった形状がある。これらは加工中の条件変動が原因となり、工具軌跡が転写されて生じる。図2の工程1はこのような形状を正しく評価することが目的である。この処理が無いと近似参照形状で表現できない高周波成分が近似参照形状の推定誤差を悪化させる。次節ではその効果をシミュレーション

により検証する。

中間周波数成分 S2 は、うねり、リップルとも呼ばれる。修正加工による光学素子生産への実用を考えたとき、うねりを正しく測定し、修正加工できるかどうかが重要となる。この成分は工程 1 で除去する高周波成分と、工程 2 で推定する近似参照形状が受け持つ低周波成分との間の成分である。ARSA では最適化計算の際の残差として処理する。主な誤差要因はパラメータの推定誤差と工程 3 で部分測定データを一つに合成する時の補間誤差である。次節ではその誤差を検証する。

低周波成分 S1 については位置姿勢誤差 E1 との分離が課題である。両者とも振幅が大きい上に互いに強く干渉し合う。実はこの課題は全面一括測定でも変わらない。通常は設計形状にベストフィットするよう最小 2 乗法で位置誤差 E1 を推定する¹⁶⁾。つまり位置姿勢の調節で修正できる E1 は測定結果から全て取り除く。そして現実には、光学系の組立時に行う光軸調整やレンズ外形を仕上げる芯取りがそれを実現する工程である。ARSA でも同じ考え方を採用し設計形状にベストフィットするように E1 を推定し除去する。パラメータ間の干渉を防ぎ、この推定計算を実現する簡単な方法は E1 と干渉する成分をあらかじめ S1 から除外しておく方法である。ARSA では S1 を近似参照形状で表現するが、前述したように本論文では近似参照形状として Zernike 多項式を用いる。つまり式(4)のパラメータ r は Zernike 多項式の各項の係数である。

Zernike 多項式のうち位置姿勢誤差 E1 と干渉する項は被測定物の設計形状によって決まる。ここで光学面として多用する次式の 2 次曲面を例とし、どの項を計算から除外すべきか考える。

$$D(x, y) = \frac{(x^2 + y^2)/R}{1 + \sqrt{1 - (1 + \kappa)(x^2 + y^2)/R^2}} \quad (8)$$

この曲面の x 方向の位置誤差 d が誤差形状に与える影響は

$$\frac{\partial D(x, y)}{\partial x} d = \text{sign}(R) \frac{xd}{\sqrt{R^2 - (1 + \kappa)(x^2 + y^2)}} \quad (9)$$

ここで、設計形状を $R = -1800$ mm, $\kappa = -2$ の双極面とし、測定領域を $\phi 1200$ mm とすると位置誤差 $d = 1$ mm の影響は上式から $633 \mu\text{mPV}$ の大きな誤差形状となる。比較するため大きさを 1 に正規化し、Zernike 展開、係数の大きい最初の 3 項を図 4 に示す。周波数が低いほど係数が大きく、影響が強い。同様に、他の位置姿勢パラメータも Zernike に展開、1~8 項の係数を表 1 に示す。この結果から位置姿勢パラメータと干渉する Zernike 第 1~3 項および 7, 8 項を近似参照形状から除くこととする。

次節では誤差 E1~E3 のうち位置姿勢誤差 E1 を考慮し、3 種類の形状成分 S1~S3 についてシミュレーションを実施、アルゴリズムの妥当性を検証する。

4. シミュレーション

4.1 高周波成分を含む形状のスティッチ測定

前述したように測定点がまばらな自由曲面測定装置では高周波に対する感度は小さいが、実用上注意すべき高周波成分を含む形状として段差や溝については対応が必要である。このような形状を ARSA でスティッチ測定したときの計算誤差をシミュレーションで確認する。図 5 に手順を示す。図中、(1) 設計形状は式(8)において $R = -1800$ mm, $\kappa = -2$ の凸双極面とし、測定領域を $\phi 1200$ mm とし、被測定物表面の 3 次元点列を計算する。この時、非球面量は 1.282 mm である。この設計形状に対し、

Fig. 4 Zernike terms of the shape error caused by X position error

Table 1 Zernike terms of the shape error caused by setting errors

E1: Setting errors Position and orientation parameters	S1: Zernike terms							
	1	2	3	4	5	6	7	8
X	0	0.509	0	0	0	0	0.009	0
Y	0	0	0.509	0	0	0	0	0.009
Z	1.000	0	0	0	0	0	0	0
θ_x	0	0.492	0	0	0	0	0.008	0
θ_y	0	0	0.492	0	0	0	0	0.008

Fig. 5 Simulation procedure to check the validity of the algorithm

次に 2 種類の誤差形状を加える。(2) まず被測定物の低周波成分を加算する。ここでは軸対称成分として Zernike 多項式の第 4 項を、非軸対称成分として第 17 項を加える。その振幅は共に $2 \mu\text{m}$ とした。(3) 次に高周波成分として幅 50 mm 高さ $1 \mu\text{m}$ の帯状誤差を加える。以上を被測定物の理論形状とする。その大きさは $1.325 \mu\text{mRMS}$ である。(4) 領域を 120 度おきに 3 分割し、プローブの走査軌跡を考慮しながら 3 次元的な点列を作成する。さらに接触式プローブを使う自由曲面測定装置を想定し、点列を半径 0.5 mm の先端プローブ球中心位置に変換する。(5) 最後に $1 \sim 5$ mm の位置誤差と $1 \sim 5$ mrad の姿勢誤差を加えて擬似測定データとする。ここで、姿勢誤差のうち θ_z については設計形状が軸対称なので誤差をゼロとした。実際の測定でも θ_z だけは機械的に精度を保証しておく必要がある。例えば外周部の位置誤差として 0.6 mm を許容すると θ_z の精度は 1 mrad といった目標値である。一つの部分測定領域を 650×1200 mm, 測定点数を 200×200 とした。(6) 最後に擬似測定データを ARSA でスティッチ計算し、理論形状と比較評価する。

高周波成分を含む帯状誤差は図 2 のフローにおける第 1 工程でローカルフィットしたあと抽出、除去される。この第 1 工程の処理が無いと近似参照形状に大きな推定誤差が生じる。図 6 に計算結果を示す。図において、理論形状 (a) とほぼ同じステ

Fig. 6 Stitch measurements including the high-frequency component (RMS: Root Mean Square)

スティッチ結果 (b) を得た。両者の差、すなわちスティッチの計算誤差 (c) は $0.0306 \mu\text{mRMS}$ となり、理論形状の $1.325 \mu\text{mRMS}$ に対し十分小さく、誤差の影響範囲も段差付近に限定している。この計算誤差の主要因は工程 3 でデータを合成する際の補間誤差である。また ARSA の第 1 工程を省略した場合のスティッチ計算誤差を図 6 (d) に示す。高周波成分を含む帯状の誤差が近似参照形状の推定に影響するため、図のように低周波成分に大きな誤差を生じ、計算誤差は $0.0496 \mu\text{m}$ に悪化する。以上、図 2 における第 1 工程の重要性を確認できた。

その他の評価指標を表 2 に示す。位置と姿勢の誤差は各測定毎に 3 方向の値を持つが、ここでは平均した数値で評価した。例えば位置の計算誤差は理論値と比較して平均 $9.67\text{E}-10 \text{ mm}$ と十分小さい。Zernike 成分の第 4, 17 項の係数は理論値として加えた低周波成分の値と合致している。また、それ以外 36 項までの成分も表に示すように平均 $3.21 \text{E}-10 \mu\text{m}$ と良好である。式(4)で計算する近似参照形状の推定誤差も $1.79 \text{E}-8 \mu\text{mRMS}$ と良好である。また、式(6)のオーバーラップ部のミスマッチも $1.83\text{E}-8 \mu\text{mRMS}$ と良好である。以上、シミュレーションの全評価項目で計算誤差が十分小さいことから ARSA は妥当と言える。

4.2 中間周波数成分 (うねり) を含む形状のスティッチ測定

前述した第 1 工程で処理できる高周波成分と、近似参照形状で表現できる低周波との間の中間周波数成分は ARSA では最適化計算の残差として処理する。この計算方法の妥当性を図 5 と同様な手順で検証する。図 5 の(3)で加える誤差を次式の中間周波数成分に変更する。

$$A \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda}\right) + A \sin\left(2\pi \frac{y}{\lambda}\right) \quad (10)$$

振幅 A は $0.1 \mu\text{m}$ とし周期 λ は 5 mm から 100 mm を検討した。測定データの点数は 650×1200 とした。およそ 1 mm ピッチの測定である。周期 $\lambda = 50 \text{ mm}$ に対するスティッチ計算結果を図 7 に示す。図において理論形状 (a) とほぼ同じスティッチ結果 (b) を得た。低周波成分の Zernike 第 4, 17 項、およびうねりが復元できていることがわかる。このスティッチ結果 (b) と理論形状 (a) との差、すなわちスティッチ計算誤差 (c) は理論形状の $1.320 \mu\text{mRMS}$ に比べて $0.0026 \mu\text{mRMS}$ と小さく、良好である。しかし、うねりの周期が短くなるとこの誤差が大きくなる。

Table 2 Calculation errors in measuring high-frequency components

Items		Theoretical Errors		
Setting errors	Position	mm	1-5	$9.67 \text{E}-10$
	Orientation	mrad	1-5	$7.73 \text{E}-10$
Zernike components	Z4	μm	-2	$1.56 \text{E}-9$
	Z17	μm	2	$8.00 \text{E}-11$
	Other	μm	0	$3.21 \text{E}-10$
Fitting residue, Eq.(4)		μmRMS		$1.79 \text{E}-8$
Mismatch in overlap area, Eq.(6)		μmRMS		$1.83 \text{E}-8$
Stitch error in whole area		μmRMS		$3.06 \text{E}-2$

Fig. 7 Stitch measurements including the mid-frequency component

Fig. 8 Center lines of mid-frequency stitch measurements

例えば、図 7 (d) に示すように $\lambda = 10 \text{ mm}$ の場合、計算誤差は $0.0105 \mu\text{mRMS}$ に悪化する。ただし、うねりの周期は短いほうが低周波成分を受け持つ近似参照形状への影響が少ないため、この計算誤差が全体形状に大きく影響することはない。これは部分的なミスマッチが全体形状に影響する従来法とは異なる ARSA の利点である。この周期の短いうねり成分に対する計算誤差の主要因は ARSA の第 3 工程で全体形状を計算する際の補間誤差である。複数の測定領域が重なる部分では補間誤差を含む点がさらに重みづけ平均され、図 7 (d) のように複雑な模様となって現れる。図 8 にうねり周期 $\lambda = 50 \text{ mm}$ と 10 mm についてスティッチ結果と計算誤差の中央断面を示す。周期 10 mm においても計算誤差はうねりの振幅 $0.1 \mu\text{m}$ に対して十分小さいが、さらに周期が短くなると計算誤差が悪化する。自由曲面測定装置では少ない測定点から周期の短い中間周波数を評価しなければならない。スティッチ測定についても全面一括測定と同等の性能が求められる。そこで次に様々な周期のうねりに対して計

Fig. 9 Waviness measurement sensitivity of the two methods

算し、うねりの測定感度を評価する。うねりの測定感度は中央断面から低周波成分を差引き、周波数解析して理論的な振幅、すなわち $0.1 \mu\text{m}$ に対する比率をパーセントで表現する。図9にうねりの測定感度を示す。比較のためスティッチではなく全面を一括測定する通常測定についてもシミュレーションを行った。全面一括測定でも高周波側で感度が落ちているが、測定点列を等間隔格子点へ変換する際の補間誤差などの影響である。修正加工の経験から実用的な測定感度を80%と考えると、今回のように約1 mm ピッチで測定した場合、空間周波数 0.17 mm^{-1} 、周期6 mm が本スティッチ・アルゴリズムを用いて修正加工できるリップル誤差の限界と言える。また、この範囲において、全面一括測定と遜色ないうねりの測定感度を実現できている。

4.3 低周波成分を含む形状のスティッチ測定

低周波成分を有する形状をARSAで正しくスティッチ測定できるか図5と同様なシミュレーション手順で検証する。低周波成分として振幅 $1 \mu\text{m}$ のZernike多項式を1項づつ加えることとし第1から49項まで検討する。Zernike関数系列は完全系なので1項づつは対称だが、任意形状を展開できる。一つの部分測定の点数は 221×407 、おおよそ3 mm ピッチの測定とした。前節で説明したように近似参照形状から位置姿勢誤差と干渉するパラメータのZernike1~3, 7, 8項を除いて計算した。図10に第20項の計算結果を示す。図において理論形状(a)とほぼ同じスティッチ結果(b)を得た。このスティッチ結果(b)と理論形状(a)との差、すなわちスティッチ計算誤差(c)は $0.2887 \mu\text{mRMS}$ の理論形状に対し $6.31\text{E-}5 \mu\text{mRMS}$ と小さく、良好である。さらに式(6)で計算するオーバーラップ部のミスマッチ(d)も非常に小さい。同様に、全49項の計算結果を図11に示す。近似参照形状から除いたZernike1~3, 7, 8項は位置姿勢誤差に割り振られるため結果には現れない。この事情は3章で述べたように全面一括測定の場合でも同じである。これらの項を除いた計算誤差の平均を表3に示す。表中、最下段のスティッチ計算誤差は $2.23\text{E-}4 \mu\text{mRMS}$ となり良好である。また式(4)で計算する近似参照形状の推定誤差、および式(6)で計算するオーバーラップ部のミスマッチは全部のZernike項の計算で良好だった。

4.4 非軸対称な成分を含むスティッチ測定

これまでARSAの妥当性を各成分ごとに検討してきた。この節ではそれらを複合し、非軸対称な成分を含む形状に対しても正しくスティッチ測定できるか、これまでと同様図5の手順で検討する。検討する理論形状を非軸対称な低周波成分とランダム成分を加えた形状とした。図12(a)にその低周波成分を示す。これはZernike多項式における第9から36項の係数を、形状が

Fig. 10 Stitch measurement including the low-frequency component ($Z_{20} = 1 \mu\text{m}$)

Fig. 11 Stitch measurements including the low-frequency components

Table 3 Calculation errors in measuring low-frequency components

Items	Averaging range	Theoreticals and Units	Calculation Errors
Setting errors			
Position	Z4-6,9-49	1-5 mm	$1.52 \text{ E-}9$
Orientation	Z4-6,9-49	1-5 mrad	$8.15 \text{ E-}10$
Zernike components	Z4-6,9-49	1 μm	$7.90 \text{ E-}11$
Fitting residue, Eq.(4)	Z1-49	μmRMS	$8.92 \text{ E-}9$
Mismatch, Eq.(6)	Z1-49	μmRMS	$6.97 \text{ E-}9$
Stitch error in whole area	Z4-6,9-49	μmRMS	$2.23 \text{ E-}4$

非軸対称になるように適当に1または-1として作成した。具体的には9,10,11,14,15,19,20,23,24,25,28,29,32,33項を1,残りの項を-1とした。この成分の大きさは $1.597 \mu\text{mRMS}$ である。また、図12(b)にランダム成分を示す。これはホワイトノイズにローパスフィルタをかけて作成する。大きさが約 $0.1 \mu\text{mRMS}$ 、波長50mm以上のランダム成分である。図8で説明したようにARSAの計算誤差はこの波長で変化する。その他の計算条件は中間周波数のシミュレーションと同じ条件とし、測定データの間隔は約1mmとした。スティッチ計算結果を図13に示す。

Fig. 12 Theoretical shape including the non-axisymmetric component

Fig. 13 Stitch measurement including the non-axisymmetric component

理論形状 (a) とほぼ同じスティッチ結果 (b) を得た。両者の差、すなわちスティッチの計算誤差 (c) には低周波成分の誤差が見られるが、大きさは $0.0021 \mu\text{mRMS}$ であり、理論形状の $1.600 \mu\text{mRMS}$ に対し十分小さい。ミスマッチも (d) に示すように良好な結果を得た。また、(e)(f) は波長 10mm 以上に対する計算誤差とミスマッチである。図 8 でも検討したがリップル測定感度の低下を反映して誤差が悪化する。

この節の最後に、今回のシミュレーションで得られた ARSA の計算誤差についてまとめる。高周波成分については段差や溝などの形状を抽出し、推定計算から除去する工程が重要だった。理論形状との差、すなわちスティッチ計算誤差は段差 $1 \mu\text{mRMS}$ に対し $0.0306 \mu\text{mRMS}$ と良好だった (図 6)。この誤差は主に補間誤差によるものである。中間周波数成分については波長の長い成分が近似参照形状の推定誤差に、短い成分が補間誤差に影響する。波長 50mm 以上、振幅 $0.1 \mu\text{mRMS}$ のランダム形状に対し、計算誤差は $0.0021 \mu\text{mRMS}$ であり良好だった (図 13)。波長 10mm 以上の場合には $0.0121 \mu\text{mRMS}$ に悪化する。しかし図 8 の検討から全面一括測定の場合と同程度の実用的リップル測定感度を有する。低周波成分については位置姿勢誤差との干渉回避が重要だった。近似参照形状で表現できる成分なので誤

差は非常に小さい (図 10)。以上、スティッチ計算で得られた形状と理論形状を比較した結果、ARSA の計算誤差は小さく、アルゴリズムの妥当性を確認できた。

5. 結 言

スティッチ測定は干渉計をベースに発展、実用化してきたが、自由曲面測定装置では誤差が急増する。本報では近似参照形状の最適化に基づく ARSA と呼ぶ新しいスティッチ計算法を提案した。この方法は測定データがまばらな三次元点列でも良いため、ミスマッチ最小に基づく従来法では困難だった自由曲面測定装置でのスティッチ測定が可能になる。また、被測定物の形状を 3 種類の空間周波数成分に分類し、位置姿勢誤差を考慮してスティッチ測定をシミュレート、次の結論を得た。

- (1) 高周波成分の測定について、最適化計算の前処理として高周波成分を分離する工程の有効性を確認した。
- (2) うねりの測定について、全面一括測定と比べて遜色ない測定感度を得た。
- (3) 低周波成分の測定について、位置誤差と干渉する成分を参照形状から除外する方法の有効性を確認した。

以上の結果から ARSA の計算誤差は十分小さく、アルゴリズムの妥当性を確認できた。今後はランダムな測定ノイズ等、より実際に近い具体的な測定条件を考慮した検討を行う。

参 考 文 献

- 1) W. M. Cheng and M. Chen: Transformation and connection of subapertures in the multiaperture overlap-scanning technique for large optics tests, *Opt. Eng.*, **32**, 8 (1993) 1947.
- 2) M. Otsubo, K. Okada and J. Tsujiuchi: Measurement of large plane surface shapes by connecting small-aperture interferograms, *Opt. Eng.*, **33**, 2 (1994) 608.
- 3) C. Zhao and J.H. Burge: Stitching of off-axis sub-aperture null measurements of an aspheric surface, *Proc. SPIE*, **7063** (2008) 706316-1.
- 4) 湯本博勝, 三村秀和, 木村隆志, 大橋治彦, 他: SPing-8 における大型 X 線ミラーのためのスティッチング干渉計測法に基づく高精度表面形状計測装置の開発, 精密工学会秋季大会講演論文集 (2009) 141.
- 5) J. Fleig et. al.: An automated subaperture stitching interferometer workstation for spherical and aspherical surfaces, *Proc. SPIE*, **5185** (2003) 296.
- 6) C.W. Liang, H.S. Chang, P.C. Lin, C.C. Lee and Y.C. Chen: Vibration modulated subaperture stitching interferometry, *Opt. Exp.*, **21**, 15 (2013), 18255.
- 7) 吉武康裕, 吉田実, 針山達雄: シャックハルトマンセンサの画像による波面収差繋ぎ測定技術, 精密工学会誌, **77**, 7 (2011) 676.
- 8) 近藤余範: 表面形状の計測技術と標準に関する調査研究, 産総研計量標準報告, **8**, 3 (2011) 299.
- 9) H. Guo and M. Chen: Multiview connection technique for 360 deg three dimensional measurement, *Opt. Eng.*, **42**, 4 (2003) 900.
- 10) 佐藤祐介, 笹島和幸, 原精一郎: 円筒機能面全体計測に対する新しい接続手法の開発, 精密工学会春季大会講演論文集 (2010) 473.
- 11) 三浦勝弘 他: スティッチングを用いた高 NA 非球面レンズの非接触形状計測法, 精密工学会秋季大会講演論文集 (2004) 187.
- 12) 根岸真人: 高精度自由曲面形状測定装置の開発, 精密工学会誌, **67**, 10 (2001) 1632.
- 13) M. Negishi, K. Sawaguchi, M. Iino, K. Hosaka, and T. Maruyama: A Double-Sided Contour Measurement Machine, *Proc. EUSPEN* (2006) 273.
- 14) 根岸真人, 保坂光太郎, 堆浩太郎: 自由曲面測定装置におけるスティッチ技術の開発, 精密工学会秋季大会講演論文集 (2010) 501.
- 15) 根岸真人, 保坂光太郎, 堆浩太郎: 自由曲面測定装置におけるスティッチ技術の開発 (第 3 報), 精密工学会秋季大会講演論文集 (2014) 837.
- 16) M. Negishi, A. Deguchi, M. Ando, M. Takimoto, N. Nakamura: A High-Precision Coordinate Measurement System for Super Smooth Polishing, *Nanotechnology*, **6**(1995), 139.
- 17) 根岸真人: 日本国特許, 2996165, (1999).
- 18) 中川徹, 小柳義夫: 実験データ解析, 東京大学出版会, (1989) 96.
- 19) M. Sjodahl and B.F. Oreb: Stitching interferometric measurement data for inspection of large optical components, *Opt. Eng.*, **41**, 2 (2002) 403.
- 20) M. Ando, M. Negishi, M. Takimoto, A. Deguchi, N. Nakamura: Super-smooth polishing on aspherical surfaces, *Nanotechnology*, **6**(1995), 111.