合成法による形状測定に関する研究*
(基準領域選択の最適化と自動化)高 偉^{*1}, 清野 慧^{*1}, 葛 宗 濤^{*2}Profile Measurement by the Combined Method
(Optimal and Automatic Selection of the Standard Area)

Wei GAO, Satoshi KIYONO and Zongtao GE

The combined method, which combines the generalized 2-point method with the inclination method, has been developed to measure profiles that include high-frequency components whose spatial wavelengths are shorter than the distance between the two probes. In this combined method, some data points in the profile evaluated by the generalized 2-point method are chosen as the standard area and used to determine the relative heights among the data groups of the inclination method. In the present paper, we propose an automatic selection method that can select the reference points optimally and quickly. By using this proposed selection method, the profile evaluated by the combined method can reach the highest accuracy that is determined by the characteristics of the probes, such as the resolution and the stability. Computer simulations and experimental results confirming the effectiveness of the proposed selection method are also presented in this paper.

Key Words: Measurement, Accuracy, Sensor, Machine Tool, Profile Measurement, Scanning Method, Software Datum, Inclination Method, 2-Point Method

1. 緒 言

複数のプローブ情報を用いて、形状の情報と走査の際の運動誤差を同時に検出し、演算によって運動誤差を取り除いた形で形状を取り出すソフトウェアデータムの手法が種々開発されている^{1)~8)}。それによって、工作機械上でも機械の加工精度以上の精度でオンマシン測定ができる。また走査案内の運動誤差も分離して取り出すことができるので、高精度な直定規を用いなくても走査案内の運動誤差を高精度に評価できる。

従来のソフトウェアデータムでは、サンプリング間隔とプローブ間隔が等しい逐次法がよく用いられる^{1)~5)}。この方法はデータ処理が簡単で、取り上げた離散点データにはデータ処理上誤差が全くないという長所を持つ。しかし、プローブ間隔の2倍以下の波長成分が測定できない。特に段差や傷のような高周波成分を含む形状に対しては、横分解能不足の問題がある。プローブ間隔を狭くすると、低周波成分の精度が悪くなり、実際の問題の解決にならない。そこで、筆者らは逐次という条件を除くための新しいデータ処理法を示し⁶⁾、一般多点法^{7) 8)}や混合法⁹⁾などの非逐次法について検討してきた。その結果、なめらかな連続形状に対して横分解能の問題をほぼ解決した。しかしこれらの方法では、フーリエ変

換の手法を用いてデータ処理を行っているため、不連続形状が含まれる場合にはそのまま応用しにくい。

不連続形状測定のための方法として、逐次2点法と直線補間内挿法を組合せた方法が試みられた¹⁰⁾。この方法は測定対象に十分な直線範囲があればよい結果を与えるが、それ以外の場合に対しては適用範囲などはまだ不明確のようである。

筆者らは逐次2点法のデータを一般2点法による形状の一部を基準領域にして関連づける手法を体系化した合成法を提案した¹¹⁾。また実験結果から、その段差形状に対する有効性を示した¹²⁾。この方法は非逐次法のなめらかな曲線に対する精度の良さと、逐次法の離散点でのデータ処理上の正しさを活かし、高精度に不連続形状を表現できる特徴がある。

本論文では、合成法を不連続領域や高周波領域を含む一般形状に適用するときの高精度化のために、基準領域選択の最適化と自動化を行った。計算機シミュレーションによってその手法の有効性を確認した。また、今後多用されると思われる光学式プローブによるデータを使って、不連続領域を含む直線形状と走査案内の運動誤差を測定したので、その結果も合わせて報告する。

2. 合成法の原理

2. 1 一般2点法と逐次2点法 図1に示すように、2点法は2本の変位計を用いて形状測定を行う。変

* 原稿受付 1995年7月19日。

^{*1} 正員、東北大学工学部 (〒980 仙台市青葉区荒巻字青葉)。^{*2} 東北大学大学院。

Fig. 1 Principle of the 2-point method

位計の出力は次のようになる。

$$m_A(x_n) = f(x_n) + e_z(x_n) \quad (1)$$

$$m_B(x_n) = f(x_n - D) + e_z(x_n) \quad (2)$$

案内誤差 $e_z(x_n)$ を取り除くために, $m_A(x_n)$, $m_B(x_n)$ の差を取り, 2点法の差動出力は次のようになる。

$$m(x_n) = m_A(x_n) - m_B(x_n) = f(x_n) - f(x_n - D) \quad (3)$$

$f(x_n)$ の一階微分は次式で近似できる。

$$m'(x_n) = m(x_n)/D = (f(x_n) - f(x_n - D))/D \quad (4)$$

$m'(x_n)$ の一階積分 $z(x_n)$ は近似的に案内誤差の影響を除去した形状を表す。

$$z(x_n) = \sum_{i=1}^n m'(x_i) s = z(x_{n-1}) + m'(x_n) \cdot s \quad (5)$$

$s=D$ の場合は逐次2点法と呼ばれ, $s \neq D$ の場合は一般2点法と呼ばれる。

波長の長い成分(低周波成分)に対して, 積分型2点法は高い精度を持つ。また逐次2点法は誤差を含まず元の形状を離散点で再現することができる⁷⁾。

なお, 求めた形状 $z(x_n)$ を式(1)に代入して, 案内誤差 $e_z(x_n)$ を求めることができる。

2.2 合成法 合成法の考え方を図2に示す¹¹⁾。

逐次法の利点を利用して横分解能を上げるための方法として次の方法が考えられる。まず図2(a)に示すようにスタート点を少しずつシフトして逐次2点法用データ群を得る。逐次2点法で得られた離散データ点は正しい相対的な位置関係を持つ。また, スタート点をずらして得られた離散的なデータ点も正しい相対的な位置関係を有する。しかし逐次2点法では, 離散的な測定点の出発点の不定性があり, 図2(b)のように各逐次データの出发点をゼロにして処理しても, 各組の逐次データの間に連続性がないため, 正確な形状情報が得られず横分解能の問題解決にならない。一方, 図2(a)のデータ全部を使って一般2点法で処理することもできる。一般2点法は低周波の形状成分を正しく表現できる。そこで, 一般2点法で得た曲線の一部のなめらかな範囲を用いて逐次2点法データ群の関連づけをすれば, 逐次2点法データ群の持つ出发点の不定性は解消される。その結果, 図2(c)のように他の測定範囲に含まれる高周波領域を含むすべての点がサンプリング間隔の許す範囲で正しく求まる。それで, 段

Fig. 2 The combined method

Fig. 3 Algorithm of the combined method

差や傷のような不連続形状に対するソフトウェアデータの横分解能不足の問題を解決することになる。

2.3 合成法の計算アルゴリズム 合成法による形状処理は次の手順で行う¹²⁾。

1) 2本の変位計で被測定面を走査する

図3に示すように2本の変位計A, Bで被測定面を走査する。プローブ間隔をD, サンプリング間隔をs, サンプリング数をNとする。また, $M=D/s$ とし, 整数とし, $s=1$ として以下の検討を行う。

2) 積分型2点法で形状 $z(x_n)$ を求める

サンプリングして得られた全データを用いて, 積分型2点法で近似形状を求める。

$$z(x_n) = z(x_{n-1}) + (m_A(x_n) - m_B(x_n))/D \quad (n=1, 2, \dots, N-1) \quad (6)$$

3) 逐次2点法で形状を求める

M組の逐次2点法があり, 各組にはN/Mの点がある。出发点をずらしたデータ群は次式の離散点 x_{ij} 上で与えられる。

$$x_{ij} = i \cdot s + j \cdot M \quad (i=0 \sim M-1, j=0 \sim N/M-1) \quad (7)$$

ただし, iはデータグループの番号で, jは各データグループのデータの番号である。

固定したiに対して, 出发点の高さをゼロとしたとき各

Fig. 4 Flow chart of the selection method

離散点の形状の高さ p_{ij} は次のようになる。

$$p_{ij} = \sum_{k=1}^j [m_A(x_{ik}) - m_B(x_{ik})] \quad (8)$$

4) 合成法による形状 f_{ij} を求める

添え字 i を固定したそれぞれの逐次法の結果 f_{ij} は、出発点の高さ q_i と全体の傾き a_i を自由度として持ち、次のように表すことができる。

$$f_{ij} = q_i + x_{ij} \cdot a_i + p_{ij} \quad (9)$$

積分型2点法で得た形状 $z(x_a)$ から基準領域を選択し、次のように最小自乗法で q_i , a_i を決める¹¹⁾。

$$E_i = \sum_j \{z_{ij} - f_{ij}\}^2 \quad (10)$$

$$\partial E_i / \partial a_i = 0 \quad (11)$$

$$\partial E_i / \partial q_i = 0 \quad (12)$$

3. 基準領域選択の最適化と自動化

合成法による形状の精度は、 q_i と a_i を求めるときに選んだ基準領域の形状精度によって決まる。合成法の精度を高めるために、前報まで^{11) 12)}は、単独の変位計の出力を参考にして、一般2点法による形状のなるべくならかな領域を作画上で探して基準領域に選択する方法を用いた。

段差形状では、エッジ部など高周波成分が抜け落ちる部分は比較的簡単に判別できるので、上記の選択法は十分に有効である¹²⁾。しかし、一般形状などそれ以外の場合においては、形状精度の悪い領域を完全に基準領域か

ら除去しきれない恐れがある。また、サンプリング時の偶然誤差の影響を低減するため、なるべく多くの点を基準領域に選ぶのが望ましいが、この点においても上記の選択法は最適の結果を見出せない。また、選択プロセスは自動的に行われていないのも非効率的である。

そこで、本研究では、基準領域を選ぶときの原則を次のようにし、基準領域選択の最適化と自動化を行った。

- a) 形状精度の悪い点を基準領域から除去する。
- b) サンプリング時の偶然誤差の影響を低減するため、なるべく多くの点を基準領域に選ぶ。

その原則のもとに、次の基準領域選択法を用いた。その流れ図を図4に示す。また、全ての過程はコンピュータで自動的に行う。

- 1) 一般2点法の結果 z_{ij} の全ての点を基準領域に選ぶ。
- 2) 基準領域を使って、 q_i , a_i を決める。
- 3) q_i , a_i を用いて式(9)のように f_{ij} を補正し、 f_{ij} と z_{ij} の基準領域における差を求める。その差の最大値 e_{it} が定められたしきい値 $comp$ より大きいとき、最大値の点 x_{it} を選び出し、基準領域から除く。
- 4) 差の最大値 x_{it} がしきい値 $comp$ より小さくなるまで、2) から3) まで繰り返す。

これで精度の高い基準領域を選択することができる。通常、 $comp$ は変位計のドリフト特性や分解能などで決めた形状測定精度の限界に設定する。それによって、その測定精度の限界まで逐次2点法データ群の出発点の高さを求めることができる。

4. 計算機シミュレーション

2種類の形状を対象に計算機シミュレーションを行い、節3に示した基準領域選択法の有効性を確かめた。シミュレーションの条件は次の通りである。

プローブ間隔	$D=10\text{mm}$
サンプリング間隔	$s=1\text{mm}$
サンプリング数	$N=300$

また、変位計の分解能は十分であるとする。

図5に示す形状1は段差と三角形を含むものである。図6に本研究の手法で選択した基準領域を示す。しきい値 $comp$ をそれぞれ $0.01\mu\text{m}$ と $1.0\mu\text{m}$ とした。基準領域に選ばれた基準点の数はそれぞれ208と283である。また図7にそれぞれのしきい値で合成法によって求めた形状の評価誤差を示す。しきい値が $1.0\mu\text{m}$ の場合は、段差のエッジ部及び三角形の部分は完全に基準領域から除去できず、形状評価誤差は $\pm 0.08\mu\text{m}$ と大きい。それに対して、しきい値が $0.01\mu\text{m}$ の場合はエッジ部及び三角形の部分はほぼ基準領域から除去され、形状評価誤差は $\pm 0.0005\mu\text{m}$ と小さくなる。なお、どちらの場合もその形状評価誤差

Fig. 5 Input profile 1

Fig. 8 Input profile 2

Fig. 6 Selected standard area 1

Fig. 9 Selected standard area 2

Fig. 7 Evaluation error 1

Fig. 10 Evaluation error 2-1

はそれぞれのしきい値より小さい。

形状2は図8に示す高周波の変動を含む一般形状である。シミュレーションの条件は形状1の場合と同じである。図9に本研究の手法で選択した基準領域を示す。しきい値compをそれぞれ0.01 μm と0.5 μm とした。基準領域に選ばれた基準点の数はそれぞれ140と207である。また図10にそれぞれのしきい値で合成法によって求めた形状の評価誤差を示す。しきい値が0.5 μm の場合は、形状の高周波変動の部分が完全に基準領域から除去できず、形状評価誤差は $\pm 0.05\mu\text{m}$ と大きい。それに対して、しきい値が0.01 μm の場合は形状の高周波変動の部分はほぼ基準領域から除去され、形状評価誤差は $\pm 0.001\mu\text{m}$ と小さくなる。なお、どちらの場合もその形状評価誤差はそれぞれのしきい値より小さい。表1にcomp=0.01 μm の場合の図4に従った処理の経過を示す。各グループとも16または17回目のループで節3の4)の条件を満たし、計算

を終了する。なお、 f_0 の計算結果は変動しながら理論値に近づき、最終計算値と理論値はnmオーダで一致している。また、変位計の分解能を0.005 μm として、変位計の出力に最大幅が0.005 μm のランダム誤差を入れたときの評価誤差を図11に示す。しきい値compは変位計の分解能から0.01 μm にした。形状はプローブの精度で決まる限界まで正しく求められたことが分かる。

5. 実験

5.1 測定システム 図12に測定システムを示す。2本の変位計が一体となった光学式センサ⁹⁾を用いる。変位計の先端開口(スポット径)は2mmであり、プローブ間隔は6mmである。変位計の分解能は0.1 μm である。センサはモータ駆動の一軸ステージに置かれ、空間的に固定された平面鏡を走査する。位置決めはモータに

Table 1 Height of the starting point f_{j0} (μm)

		Data group number i			
		2	4	6	8
Loop number k	1	0.0809	0.1131	-0.1149	0.2524
	2	-0.0033	0.2062	-0.1596	0.3018
	4	-0.0426	0.1468	-0.0905	0.3444
	6	0.0063	0.0100	-0.0157	0.2637
	8	-0.0153	0.0321	0.0471	0.1683
	10	0.0397	0.0818	0.0271	0.0968
	12	0.0169	0.0466	0.0859	0.1355
	13	0.0113	0.0221	0.0879	0.0957
	14	0.0208	0.0367	0.0543	0.0929
	15	0.0232	0.0356	0.0650	0.0762
Theoretical value	16	0.0187	0.0346	0.0575	0.0760
	17		0.0383	0.0573

Fig. 11 Evaluation error 2-2

Fig. 12 Experimental system

内蔵されているエンコーダの信号を用いる。

5. 2 測定結果 平面鏡を試料として測定を行った。図 1 3 に変位計の出力データを示す。測定範囲は 60mm であり、サンプリング間隔は 0.1mm である。17mm 付近では、リップル的な変化がある。その変化は 2 本の変位計の出力にプローブ間隔分の距離だけずれて現われているので、ステージの移動誤差によるものではなく、傷などによる形状成分であることが分かる。そのリップルは不連続的な形状である。

節3に示した手法を用いて合成法による形状処理を行った。図14に本手法を使って、基準領域から除去した部分を示す。しきい値は変位計の分解能を考慮して $0.2\mu\text{m}$ にした。高周波変動の部分が基準領域から除去されたことが分かる。

図 15 に合成法によって求められた形状及び単独の変位計からその形状を除いたステージの運動誤差を示す。

Fig. 13 Output data of the probes

Fig. 14 Points removed from the standard area

Fig. 15 Evaluated results with the combined method

図 15(a)には全測定範囲の結果を示し、図 15(b)には 10mm から 20mm の範囲の結果を拡大して示す。リップル形状がしっかりと表現されていることが分かる。また図 16、17 にそれぞれ図 15(a) に示す形状及び移動誤差の周波数分布を示す。プローブ開口で決まるカットオフ波長(約 1mm)⁹⁾ まで形状の波長成分が検出できていることが分かる。またステージのボールネジの送りと同周

Fig. 16 Spectra of the profile ($f_0=1/51.2\text{mm}$) Fig. 17 Spectra of the scanning error ($f_0=1/51.2\text{mm}$)

期 (1mm) の移動誤差も検出されている。これによって、形状と運動誤差は正しく分離して求まったことが分かる。

また、測定中に移動台に振動を与えたときの合成法の処理結果を図 18 に示す。図 18 と図 15 の形状はよく一致する。最大で約 $3\mu\text{m}$ の振動誤差も正しく検出された。基準領域から除去した部分を図 19 に示す。図 19 と図 14 を比べると、本手法は移動誤差の影響を受けないことが分かる。

6. 結 言

以上の結果をまとめると次のようになる。

(1) 合成法の処理において、最適の基準領域を自動的に選択できる手法を提案した。この方法を用いることによって、形状精度の悪い点を基準領域から除去することができ、またより多くの形状精度の高い点を基準領域に選ぶことができる。その結果、プローブの分解能や安定性で決めた形状測定精度の限界まで形状を正しく評価することができる。

(2) 計算機シミュレーションによって、その手法が段差形状だけでなく、高周波変動を含む一般形状にも有効であることを確認した。

(3) 光学式センサを用いて、不連続成分を含む一般形状及び走査ステージの運動誤差の測定を行った。本研究の手法を適用することによって、形状と運動誤差を正

Fig. 18 Evaluated results with the combined method

Fig. 19 Points removed from the standard area

しく分離し、表現することができる。

参考文献

- (1) 田中宏明, 佐藤壽芳: 逐次 2 点真直度測定法の基本的な特性に関する研究, 日本機械学会論文集 (C), 48-436 (1982), 1930-1935.
- (2) 小尾 誠, 古川 進: 逐次点測定法による真直度測定の考察, 日本機械学会論文集 (C), 57-542 (1991), 3197-3201.
- (3) 田村洋一, 平卯太郎, 坂本貴保: 逐次多点法による表面プロフィール計測方法, 計測自動学会論文集, 25-5 (1989), 509-516.
- (4) Timothy R. Corle and Gordon S. Kino: Differential interference contrast imaging on a real time confocal scanning optical microscope, Applied Optics, 29-26 (1990), 3769-3774.
- (5) G.makosch and B.Drollinger: Surface profile measurement with a scanning differential ac interferometer, Applied Optics, 23-24 (1984), 4544-4553.
- (6) 清野 慧: ソフトウェア基準法による形状計測, 精密工学会春季大会講演論文集, (1987), 168-169.
- (7) 清野 慧, 奥山栄樹: 平面のうねり形状の測定に関する研究 (第 2 報), 精密工学会誌, 54-3 (1988), 513-518.
- (8) 清野 慧, 高 偉: 多点法によるソフトウェアデータとその誤差評価, 日本機械学会論文集 (C), 58-7 (1992), 2262-2267.
- (9) 清野 慧, 高 偉, 鎌田 治: 鏡面形状のオンマシン測定に関する研究, 精密工学会誌, 58-2 (1992), 247-252.
- (10) 永田 努, 大堀真敬ほか: 逐次 2 点法を用いた超精密真直度に関する研究 - 補間測定による高精度化の試み, 日本機械学会論文集 (C), 57-542 (1991), 3330-3304.
- (11) 清野 慧, 大垣英章: ソフトウェアデータによる段差形状の測定, 精密工学会誌, 59-8 (1993), 1319-1324.
- (12) S. Kiyono and W. Gao: Profile measurement of machined surface with a new differential method, Precision Engineering, J. of ASPE, 16-3 (1994) 212-218.