参照平板の横シフトおよび逐次二点法を用いた 真直度輪郭測定*

伊藤直幸** 外川一仁*** 柳 和久† 清野 慧†† 田中秀岳†

Straightness Profile Measurement by Sequential Two-Point Method Utilizing a Laterally Shifting Reference plate

Naoyuki ITO, Kazuhito TOGAWA, Kazuhisa YANAGI, Satoshi KIYONO and Hidetake TANAKA

This paper deals with invention of a new measurement principle for straightness profile measuring instrument based on numerical software datum. The novel sequential two-point method was realized using a twin heads displacement sensor and a shifting reference plate in the lateral direction. Utilizing a precise level meter for correction of the reference plate slope, a long distance straightness profile can be measured in an extrapolative way. Uncertainty analysis on designed specifications of the measuring instrument assured its high accuracy and practicality. The experimental variation of straightness profiles measured by a developed measurement system was in a good agreement with the numerical simulation.

Key words: straightness profile, accurate measurement, two-point method, software datum, uncertainty propagation

1. 緒 言

平坦面の真直度や平面度を評価する際には、ハードウェアデータムを基準とした既存の測定法として、定盤や直定規などの実基準との単純な比較測定¹⁾²⁾、およびオートコリメータや水準器を用いた二点法¹⁾²⁾がある。他方で、基準面としてソフトウェアデータムを用いた測定法の開発研究^{3)~5)}が行われている。ソフトウェアデータムは、数理的な基準面をデータ処理系内に構成することにより、被測定面の形状成分とセンサの直進運動誤差とを分離できるもので、ハードウェアデータムを用いなくても基準面の精度をセンサの測定精度と同程度の水準まで引き上げることができる。ソフトウェアデータムを用いた測定法として、シフト法⁵⁾、反転法⁶⁾、改良型反転法⁷⁾⁸⁾、複数の変位計を用いた二点法^{9)~12)}または三点法¹³⁾¹⁴⁾、二点法や三点法を改良したその他のソフトウェアデータム^{15)~17)}が上げられるが、実用化の段階でいくつかの問題を抱えている。

本研究は、うねりや形状成分を含む真直度輪郭（以下、輪郭と略す）の高精度測定法に関するもので、水準器を援用した参照平板の横シフトと一つのすき間計で逐次二点法を具現化した新たな測定法（以下、横シフト法と略す）を提案し、次に示す課題の解決と優位性を明らかにすることを目的とする。

- ・ 実基準面との単純な比較測定と比べて、横シフト法はソフトウェアデータムと比較測定を行うもので、参照面（参照平板の表面）の輪郭も同時に測定できることから参照平板の形状精度に対する要求を下げるができる。さらに、参照平板よりも長い測定長を確保できる。
- ・ 水準器を用いた二点法は、高精度であるものの測定時間が長く、温度ドリフトの影響を受けやすい。それに対して横シフト法は、水準器の読み取り前に十分な時間の静止状態を保つことができ、また、応答速度の高い変位計を併用することで、短時間で高精度な測定が可能になる。

ト法は、水準器の読み取り前に十分な時間の静止状態を保つことができ、また、応答速度の高い変位計を併用することで、短時間で高精度な測定が可能になる。

- ・ シフト法や反転法と比べて、横シフト法は改良型反転法と同程度の測定性能を有する。
- ・ 変位計を 3 つ用いる三点法と比べて横シフト法はセンサの数が少なく、センサのドリフトの影響が軽減される。

本報告では、不確かさ解析によって裏付けられたシミュレーションを通じて、測定原理の妥当性を示した。また、測定原理およびシミュレーションに基づいた実験装置を試作し、定盤を対象に輪郭曲線の測定実験を行い、繰返し性の良い結果を得た。

2. 横シフト法の測定原理

2.1 基本原理および測定手順

横シフト法は、水準器が取付けられた実基準である参照面および直線状の上下 2 方向に感度軸を持つ 1 つの変位計を用いることで実現する。図 1 に示すように、まず (i) 参照面輪郭 $f(k)$ を対象に、変位計により参照面と被測定面とのすき間 $m(k)$ を走査方向に測定間隔 s 毎に測定し、その過程で参照面の傾斜 θ_R を水準器により測定する。その後、(ii) 参照面を測定間隔 s と等しい距離で横シフトさせて、シフト後の参照面輪郭 $f'(k)$ に対して、シフト前の手順 (i) と同様に、変位計によりすき間 $m'(k)$ を同間隔で測定しつつ、その過程で参照面の傾斜 θ'_R を水準器で測定する。

Fig.1 Measurement principle and measuring procedure

* 原稿受付 平成 25 年 1 月 24 日

** 学生会員 長岡技術科学大学大学院（新潟県長岡市上富岡町 1603-1）

*** 正 会 員 長岡工業高等専門学校（新潟県長岡市西片貝町 888）

† 正 会 員 長岡技術科学大学（新潟県長岡市上富岡町 1603-1）

†† 正 会 員 精密測定研究所（宮城県仙台市青葉区片平 1-2-35）

Table 2 Simulation conditions

Stitching times N , Measuring interval s , Referential length L_R		With or without uncertainty of sensors		
		Displacement sensor only	Level meter only	Both
$N=0$	$s < L_R$	A	B	$E (= \sqrt{A^2 + B^2})$
$N \geq 1$	$s = L_R$	C	D	$F (= \sqrt{C^2 + D^2})$
	$s < L_R$	—	—	$G (= \sqrt{E^2 + F^2})$

3. シミュレーション

3.1 シミュレーションが算出する不確かさ

不確かさ要因は、センサ（変位計および水準器）の不確かさおよび分解能、温度の不確かさによるドリフトの影響、測定位置（位置決め）の不確かさ、熱などによる測定機の変形の影響などがあり、これらの中で測定結果に対して最も影響するものはセンサの不確かさおよび分解能である。変位計および水準器、それぞれの不確かさおよび分解能の輪郭測定に対する影響を検証するため、数値シミュレーションを行った。不確かさは正規分布に従う乱数値の標準偏差と仮定した。

被測定面輪郭を 1 回入力すると、それに対して出力はセンサの不確かさによって各測定点で偏りが生じる。これを複数回繰り返すと、各々の偏りによってばらつきが生じる。複数の出力結果の各測定点（位置）に対して平均および標準偏差 σ を算出する。この平均はアンサンブル平均に相当し、この標準偏差 σ は輪郭の不確かさとして扱う。輪郭の不確かさから、位置に対するばらつきの大きさを定量的に確認できる。また、シミュレーションに考慮した不確かさ要因において、分解能が十分に小さい場合、輪郭の不確かさは、被測定面輪郭に依存しない。

3.2 シミュレーション結果の妥当性

3.2.1 検証する方法

シミュレーションから算出した不確かさを、不確かさ伝播則より得た導出式から算出した不確かさと比較することで、シミュレーションの妥当性を検証した。表 2 に 7 つに類別したシミュレーションの条件を示す。条件 A, B, C および D は互いに独立しており、E, F および G を構成している。例えば、G は E および F から構成され、不確かさ伝播則を応用して $G^2 = E^2 + F^2$ の関係が仮定できる。ここでは、基本的な条件である A, B, C および D についてだけ述べる。

3.2.2 A：ステッチングなしで不確かさが変位計のみ

2.1 節で述べた基本原理や式(5)からわかるように、横シフト法は、水準器の不確かさがなく傾斜誤差 d_R を正しく測定できるのならば、変位計を用いた二点法と同等であるといえる。したがって、A の不確かさ $U_{AC}(k)$ は、変位計 2 つを用いた二点法の不確かさの式(10)¹²⁾で導かれる。ただし、変位計の不確かさ u_D である。

$$U_{AC}(k) = u_D \sqrt{2k \left(1 - \frac{k}{n-1}\right)} \quad (10)$$

3.2.3 B：ステッチングなしで不確かさが水準器のみ

B は 2.2 節で説明した放物線状誤差（偏り）が生じる条件である。ただし、ここでは偏りではなく、不確かさがある場合を対象としている。傾斜誤差 d_R に伝播する不確かさ $u_{Ld}(k)$ は、水準器の不確かさを u_L とすれば、式(4)から不確かさ伝播則より式(11)

$$u_{Ld}(k) = \sqrt{u_L^2 + u_L^2} = u_L \sqrt{2} \quad (11)$$

B の不確かさ $U_B(k)$ は、式(5)および(11)から不確かさ伝播則より式(12)で導かれる。

$$U_B(k) = u_L \frac{k(n-1-k)s\sqrt{2}}{2} \quad (12)$$

3.2.4 C：ステッチングありで不確かさが変位計のみ

変位計を用いた二点法について記述した図 2 において、C は測定間隔 s と参照面長 L_R が等しいため、変位計が傾斜誤差を伴いながら走査している状態と同等である。さらに、その傾斜誤差は水準器で不確かさなく測定できる。つまり、C の不確かさは、A と同様に式(10)で導かれる。

3.2.5 D：ステッチングありで不確かさが水準器のみ

C と同様に、図 2 の変位計が傾斜誤差を伴いながら走査している状態と同等である。しかし、不確かさは水準器のみであるから、2 点間の高さの差 $d(k)$ を測定するときに伝播する不確かさは、C が変位計 2 つに対して、D が水準器 1 つである。ここで、式(13)¹⁰⁾に変位計 1 つを用いた逐次二点法の不確かさ $U_a(k)$ を示す。

$$U_a(k) = u_D \sqrt{k \left(1 - \frac{k}{n-1}\right)} \quad (13)$$

水準器の測定値を高き変位に換算するには、測定間隔 s を乗ずる。つまり、D の不確かさ $U_D(k)$ は、式(13)を換算し、式(14)で導かれる。ただし、水準器の不確かさ u_L 、測定長 L とする。

$$U_D(k) = u_L s \sqrt{k \left(1 - \frac{k}{n-1}\right)} = u_L \frac{L}{n-1} \sqrt{k \left(1 - \frac{k}{n-1}\right)} \quad (14)$$

3.2.6 シミュレーションおよび導出式の不確かさの比較

表 3 の条件において A の不確かさについてシミュレーション結果と導出式からの算出結果との比較を図 5 に示す。図 5 には B, C および D についても同様の比較が併記されている。ただし、不確かさは変位計 $u_D = 0.1 \mu\text{m}$ 、水準器 $u_L = 0.001 \mu\text{m/mm}$ とした。図 5 のように、それぞれの不確かさは概ね一致していることが確認でき、シミュレーションは妥当といえる。

Table 3 Comparison conditions for A, B, C and D

Simulation conditions of Table 2	Stitching times N	Measuring interval s mm	Referential length L_R mm	Number of measurement points n
A, B	0	20	200	11
C, D	3	200	200	5

Fig.5 Simulation results of A, B, C and D compared with introduced equations from the law of propagation of uncertainty

3.3 放物線状誤差の補正

2.3 節で述べた水準器に起因する放物線状誤差の補正が有効であるか否かを検証する。表 4 の条件 B, E および G において放物線状誤差を補正した結果を、それぞれ図 6(a)~(c)に示す。いずれの条件においても輪郭の不確かさが低減されていることがわかる。

図 6(a)の条件では、水準器に起因する放物線状誤差のみが生じ、補正により輪郭の不確かさを大きく低減していることが確認できる。図 6(b)の条件では、図 6(a)と比べると、輪郭の不確かさが左右対称に膨らんでいるが、これは変位計の不確かさによるものである。本測定法の補正は、水準器に起因する放物線状誤差のみを低減させるものであるため、変位計に起因する不確かさは補正できていない。

図 6(c)の条件では、測定長が参照面長より長く、3つの輪郭を2回スティッチングしている。位置 0~200mm で参照面輪郭および被測定面輪郭の不確かさが決まり、その不確かさは図 6(b)に相当する。位置 200~400mm および 400~600mm は、参照面輪郭の不確かさが被測定面輪郭に伝播するため、位置 0~200mm の分布と似たものになっている。

Table 4 Numerical verification of parabolic error correction

Relevant simulation conditions of Table 2	B	E	G
Uncertainty of displacement sensor μm	0	0.1	
Uncertainty of level meter $\mu\text{m}/\text{mm}$		0.001	
Measuring interval mm		20	
Referential length mm		200	
Measuring length mm	200		600
Stitching times	0		2
Designation for Fig.6	(a)	(b)	(c)

Fig.6 Reduction of uncertainty by each parabolic error correction

3.4 変位計または水準器を用いた逐次二点法との比較

横シフト法による不確かさを変位計のみあるいは水準器のみを用いた逐次二点法の不確かさと比較した。表 5 に条件、図 7 にその比較結果を示す。センサの不確かさは同じで、測定間隔を変えた条件とした。

水準器を用いた逐次二点法は測定間隔を小さくするほど、測定間隔あたりの高さ分解能が向上するため、輪郭の不確かさも小さくなる。逆に、横シフト法および変位計を用いた逐次二点法は、測定間隔を小さくして測定点数を増やすと、変位計の不確かさが累積するため、輪郭の不確かさは大きくなる傾向にある。しかし、図 7 からわかるように、横シフト法は変位計のみを用いた逐次二点法よりもその傾向は小さく、変位計の不確かさに影響されにくいことが確認できる。つまり、横シフト法は変位計を用いた逐次二点法よりも高精度な測定が可能である。また、横シフト法は参照面長を短くすることで、水準器を用いる回数が増えるため測定時間は長くなるが、水準器を用いた逐次二点法と同等以上の高精度化が図れる。

3.5 実験装置に必要な変位計および水準器の分解能

実験装置のセンサに求められる分解能をシミュレーションによって導出する。与えた波形は目標の測定精度とする振幅 1 μm 、表面波長 150 mm の正弦波、出力は 1000 個のアンサンブル平均とした。また、条件は表 6 に示すようにセンサの分解能を変え、不確かさはそれぞれの分解能と同じ値とした。図 8 に入力とアンサンブル平均との差を示す。分解能によっては R_1 や R_3 のように入力との差が零にならず誤差が生じている。誤差のない結果は R_2 であるから、実験装置を製作するにあたって、変位計の分解能を 0.1 μm 、水準器の分解能を 0.001 $\mu\text{m}/\text{mm}$ とする。

Table 5 Comparison conditions under sequential two-point method

Sequential two-point method	Uncertainty		Stitching times
	Displacement sensor μm	Level meter $\mu\text{m}/\text{mm}$	
Lateral shift	0.1	0.001	2
Displacement sensors only	—	—	—
Level meter only	—	0.001	—

Fig.7 Overall comparison of sequential two-point method among various sensor combinations

Table 6 Sensor resolution and its uncertainty

Resolution and uncertainty		Measuring interval mm	Designation for Fig.8
Displacement sensor μm	Level meter μm/mm		
1.0	0.001	20	R ₁
0.1			R ₂
	0.01		R ₃

Fig.8 Variation of ensemble average due to sensor resolution

Fig.9 Twin heads air micrometer

4. 実用を志向した変位計および機構条件

4.1 変位計の要求事項

2.1 節で示した変位計には以下の要求事項が挙げられる。

- ・ 被測定面への押し付け力が無視できるほど小さい。
- ・ 被測定面の表面粗さおよび塵などの影響を受けにくい。

これらを満足する変位計すなわちすき間計として、図 9 に示すようなツインヘッド空気マイクロメータを採用した。この空気マイクロメータは、上下 2 つのノズルから対象面へ空気を噴射することで、対象面間のすき間を同時に非接触測定できるものである。ノズルの直径を 1mm 程度とすることで、その領域内での平均的な面の垂直変位が測定できる。したがって、両対象面にある表面粗さの効果が平滑化され、また、塵などの飛散が期待できる。なお、すき間の測定点座標を変動させるヘッド部のピッチングを抑制する機構が必要となる。

4.2 参照平板の要求事項

横シフト法は、参照面のシフト前後および変位計の走査中に、並進誤差、傾斜誤差、輪郭および長さが経時変化しないことを前提としている。さらに、変位計および水準器の測定範囲が有限であることから、参照面と被測定面とのすき間の変動幅は小さくする必要がある。参照面およびそれを支える支柱に要求される条件を以下に示す。

- ・ 両端支持された状態での参照面が良好な真直度を保有すること。
- ・ ノズルの直径を基準長と見なした場合の参照面の表面粗さが概ね一定値となるような均一な仕上げ面であること。
- ・ 支柱端面が被測定面に損傷を与えないように横滑り運動できること。

- ・ 必要となる参照面の傾斜情報と水準器の計測分解能が同等となるような支柱間隔であること。

4.3 製作した実験装置

表 7 に以上の要求事項を満たすと判断できる構成部品の主な仕様、図 10 にその構成を示す。3.5 節で述べたように、センサの分解能はシミュレーションに基づいて選定し、変位計が 0.1 μm 、水準器が 0.001 $\mu\text{m}/\text{mm}$ とした。また、実験装置は、変位計に空気マイクロメータを採用したことで、非接触で被測定面の表面粗さおよび塵などに影響されにくいことから、定盤のように表面の比較的粗い測定対象にも有効な測定手段となりうる。

5. 実験結果および考察

測定原理に従い、測定対象を石製定盤として、輪郭を繰返し測定した。実験条件として表 8 に、実験結果として図 11(a)に定盤の輪郭の測定結果、図 11(b)に参照面輪郭の測定結果を示す。図 11 には実験結果から算出した 1 σ の実験標準偏差も併記されており、その値は大きくても 0.2 μm 程度で、高い繰返し性があることが確認できる。

Table 7 Metrological specifications of apparatus components

Twin heads air micrometer	Manufacturer	Dai-ichi Sokuhan Works Co.
	Measuring range	25 μm
	Nominal resolution	0.1 μm
Reference plate and support	Material	SKS31
	Thickness t , Width b	30 mm, 60 mm
	Gap h	30 mm
	Surface roughness	R_a 0.089
	Support end	Circle (5 mm in radius)
	Support distance D_s	390 mm
	Effective length L_R	0 ~ 300 mm
Level meter	Manufacturer	WYLER
	Type name	ZERO 1
	Measuring range	± 1 degree
	Nominal resolution	0.001 $\mu\text{m}/\text{mm}$

Fig.10 Configuration of measuring apparatus

Table 8 Experimental conditions

Frequency of measurements	4
Object surface	Granite surface plate (2 m $\times$ 1.5 m)
Measuring interval	20 mm
Referential length	200 mm
Measuring length	600 mm
Stitching times	2

Fig.11 Measured straightness profiles and their repeatability

Fig.12 Before and after parabolic error correction

Fig.13 Comparison of standard deviation of profile between experiment and simulation

図 12 に参照面の測定結果に対するアンサンブル平均および実験標準偏差 σ について、放物線状誤差の補正前後で比較したものを示す。図 12 から、補正によってばらつきは小さくなっていることが確認できる。

図 13 に定盤の輪郭の実験標準偏差とシミュレーションから得た標準偏差（輪郭の不確かさ）との比較を示す。シミュレーションの条件は図 6(c) と同じである。補正前の太線においてはシミュレーションでの 3 つの山状分布が実験にも確認できる。また、補正後の細線においては、シミュレーションでは 6 つの山状分布が確認できることに対して、実験ではその確認が難しい。

6. 結 言

参照平板の横シフトおよび逐次二点法を用いた新たな測定法を提案し、不確かさ解析ならびに基礎実験から次の知見を得た。

- (1) 真直度輪郭およびその測定不確かさを算出する数値シミュレーション結果は、不確かさ伝播則より導出した式による値と概ね一致した。
- (2) 水準器の不確かさによって、真直度輪郭に放物線状の測定不確かさが生じることを示し、その不確かさを低減するための補正方法を提案した。
- (3) すき間の相対変動を計測する変位計ならびに高精度な水準器を併用することで、水準器のみを用いた逐次二点法よりも高速に、変位計のみを用いた逐次二点法よりも高精度な真直度輪郭測定が実現する。
- (4) 空気マイクロメータを変位計とすることの優位性を示し、水準器を含めて必要な測定分解能を明示した。さらに、試作した実機で定盤を対象に真直度輪郭測定実験を行い、繰返し性の良い測定結果を得た。

謝 辞

最後に、本研究を遂行するに際して、装置製作ならびに実験解析に多大なご尽力を賜った株式会社 第一測範製作所、原司氏と幸平博喜氏の両氏に、深甚な謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) Wayne R. Moore: 超精密機械の基礎, 国際工業株式会社, 1st edition (1970) 72.
- 2) ISO 230-1: 2012, Test code for machine tools, 100.
- 3) 清野慧: 基準のいらない精密測定法 多点法, 精密工学会誌, **76**, 2 (2010) 165.
- 4) 清野慧: ソフトウェアデータを用いた形状評価, 精密工学会誌, **61**, 8 (1995) 1059.
- 5) Chris J. Evans, Robert J. Hocken, W. Tyler Estler: Self-Calibration: Reversal, Redundancy, Error Separation, and 'Absolute Testing', Annals of the CIRP, **45**, 2 (1996) 617.
- 6) 沢辺雅二: 形状測定器および形状公差等の規格の動向, 精密機械, **48**, 2 (1982) 268.
- 7) オズワルド・ホリカワ, 佐藤海二, 下河辺明: 改良型反転法による真円度および絶対回転運動精度の評価, 精密工学会誌, **57**, 12 (1991) 2231.
- 8) 艾曉庸, 清水毅, 小尾誠: 改良型反転法による真直度測定, 精密工学会誌, **66**, 10 (2000) 1578.
- 9) 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.
- 10) G. Makosch and B. Drollinger: Surface profile measurement with a scanning differential ac interferometer, Applied Optics, **23**, 24 (1984) 4544.
- 11) 清野慧, 奥山栄樹, 住田正臣: 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) 85.
- 12) 奥山栄樹: 真直形状測定のためのサンプリング点数の多い一般化した二点法, 精密工学会東北支部学術講演会講演論文集, (2012) 33.
- 13) 小尾誠, 古川進: 逐次点法による真直度測定の考察 (第 1 報), 日本機械学会論文集, **C, 57**, 542 (1991) 3197.
- 14) 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**, 551 (1992) 256.
- 15) 久米達哉, 江並和宏, 東保男, 上野健治: 3 点法を用いた真直度測定におけるゼロ点ずれの除去, 精密工学会誌, **75**, 5 (2009) 657.
- 16) Eiki Okuyama: Multi-probe method for straightness profile measurement based on least uncertainty propagation (2nd report), Precision Engineering, **34**, 4 (2010) 683.
- 17) 庄司哲史, 池内克徳, 吉田昌弘, 柳和久, 清野慧: 広領域精密平板を対象とした実用的な表面輪郭測定システム, 精密工学会北陸信越支部学術講演会講演論文集, (2012) 45.
- 18) 伊藤直幸, 外川一仁, 清野慧, 柳和久, 原司: 参照平板の横シフトおよび逐次二点法を組み合わせた平坦面の真直度輪郭測定, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2012) 437.
- 19) 久米達哉, 江並和宏, 東保男, 山中将, 上野健治: 大型対象物の形状測定における偶然誤差の蓄積, 精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2012) 445.