基準を必要としない形状測定法の研究*

——平面形体の円周上での測定法の検証実験——

園 寄 昭 八** 岩 田 耕 一*** 岩 橋 善 久†

Profile Measurement with No Standard
— Verification Experiment for Profile Measurement along a Circle —

Shohachi SONOZAKI, Koichi IWATA and Yoshihisa IWAHASHI

A verification of a measurement method of surface profile along a circle with no standard is carried out. For the measurement, spacings between two unknown surfaces located almost in parallel are measured along a circle. One of the surfaces is rotated around the center of the circle and the spacings are measured again. This procedure is repeated many times. From these data, the profiles of two surfaces are calculated with a system of simultaneous linear equations. For the purpose of a verification experiment, a simple surface measuring apparatus is constructed which has 12 electric comparators arranged along a circle. Their zero point positions correspond to one of two surfaces. A random inclination and a random displacement can be given intentionally to the surface to be measured. The surface profiles obtained by different experiments agree well with each other and with the profiles obtained with a 3-dimensional measuring machine.

Key words: profile measurement, absolute measurement, standard, experimental verification

1. 緒 言

形状測定においては、被測定形状と何らかの基準形状との差を測定することが一般的である。

しかし、高精度な形状測定になるほど、基準が正しいかどうか問題となる。この問題解決のため、基準を必要としない形状測定法の研究が数多く行われている。

この問題を解決する方法として、円形状の測定では、いわゆる3点法真円度測定法によって、測定値を求め、その測定データをフーリエ展開することにより、回転中心の回転誤差の影響を取り除いて、形状を決定する方法がある^{1)~5)}。

1次元や2次元の形状測定に対して、逐次点法の研究が行われている。伊藤らは逐次2点法及び逐次3点法により、平面形状を測定している⁶⁾⁷⁾。山口は逐次3点法と反転法を組み合わせ、直線運動精度を測定している。この反転によって直線の基準になる形状誤差を除去し、3点法により変位計の傾きの誤差を取り除く方法をとっている。そして、この方法では被測定形状の初期値として2点、傾きとして1つ与える必要があるとしている⁸⁾。このようにこれらの測定法では何らかの基準形状を必要とする。

小尾らは逐次3点法を平面形体の円周上に適用して、その平面度を測定している。そして、その方法による測定誤差について考察し、系統的測定誤差に伴う誤差は消去されることを示している⁹⁾¹⁰⁾。高らは平面鏡の表面の直線誤差について、角度センサを用いて絶対測定を行っている¹¹⁾。

ほかに基準形状を必要としない平面形状の測定に関して、3面を使う方法¹²⁾¹³⁾が発表されているが、実用的には使用面の数は少ない方が有利である。

本研究の目的は、全く基準形状を必要とせずに、平面形体表

面の円周を含む平面に垂直な方向の未知形状を求めることであるが、それを2面のみを使うことによって行うことである。その目的達成のため、ほぼ平行に置かれた2面の相対位置を変化させながら、2面間の間隔を測定し、そのデータに計算処理を行って形状を求めることを考えている。この間隔測定データには測定操作の際に現れると考えられる2面の傾きや上下動が不規則に含まれるものとしている。その測定原理は先の研究で示し、シミュレーションによってその妥当性を明らかにした¹⁴⁾。しかし、シミュレーションはあくまで仮想的なものであるから、シミュレーションだけで基準なしに未知形状を測定できると言い切ることは問題があると思われる。シミュレーションにおいて、考慮に入れることができない不明の要素が、結果に影響を与える可能性もあると思われる。そこで、本報告では、実験的にその妥当性を検証するために、シミュレーションにおいても考慮できるものとして、測定時に測定データに混入してくる考えられる不規則な2面間の傾きや上下動を与えることができる測定装置を試作し、2面間の間隔データのみによって、2面の形状が実験的に求められることを確認する。

2. 測定原理¹⁴⁾

図1は表面形状が未知の2つの面Aと面Bの同じ半径の円周部分が、ほぼ平行に向かい合わせに置かれた状態を示す。

この円周上の形状を求めることを考える。図のように、面Aを固定し、その円周上の位置を x 軸からの角度 θ で表すものとする。面Bは z 軸の周りに回転できるものとし、面Aと同様に x 軸からの角度でその位置を示すものとする。向かい合わせのため、面Aとの対応点は $-\theta$ で表される。この状態から、図のように角度 ϕ 回転したときの、面Aの θ の位置(点Kの位置)における両円周部分の間隔 W について、その平面図と断面図を示すと図2のようになる。この平面図においては面Aと面Bの全体を示すことは図が紛らわしくなるおそれがあるため、測定対象の円周部分のみを示している。また、断面図は平面図における線分OKを含む断面(角 θ の位置)

* 原稿受付 平成7年1月9日

** 正 会 員 高松工業高等専門学校(高松市勸使町355)

*** 正 会 員 大阪府立大学工学部(堺市学園町1番1号)

† 大阪産業大学短期大学部(大東市中垣内3-1-1)

Fig. 1 Locations of surface A and B

Fig. 2 Inclination of surface A and B

におけるもので、それを x 軸に垂直な方向から見た図である。この図から、次式が成立する。

$$W(r, \theta, \phi) = -\xi(-\theta + \phi) - \eta(\theta) + \alpha(\phi)r \cos \theta + \beta(\phi)r \sin \theta + \varepsilon(\phi) \quad (1)$$

ただし、

ξ : 面 B の形状を表す未知量

η : 面 A の形状を表す未知量

α : 回転に伴う面 B の x 軸との不規則な傾きを表す未知量

β : 回転に伴う面 B の y 軸との不規則な傾きを表す未知量

ε : 回転に伴う面 B の不規則な上下動を表す未知量

r : 測定対象になっている円周の半径で、既知量

Fig. 3 Measuring apparatus

である。

また、形状測定の対象にしている未知量 ξ と η については、それぞれの円周面との偏差の自乗和が最小になるという条件を満足するものであると考える。そうすれば、次の関係式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \sum \cos \theta \cdot \xi &= 0, \\ \sum \sin \theta \cdot \xi &= 0, \\ \sum \xi &= 0, \\ \sum \cos \theta \cdot \eta &= 0, \\ \sum \sin \theta \cdot \eta &= 0, \\ \sum \eta &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式 (1) は観測方程式ということができるので、観測値を多く求めることにより、未知量の数より方程式の数を多くし、式 (2) と組み合わせて、連立 1 次方程式とすれば、これは唯一解を持つ。このことは先の研究と計算機シミュレーションによって明らかになった。なお、この連立 1 次方程式を形状測定方程式と呼ぶことにする。

3. 検証測定実験

シミュレーションによって、この測定方法の妥当性が確認できたので、ここでは、簡単な測定実験装置を試作して、この測定方法の検証実験を行ったことについて説明する。

3.1 測定実験装置

どんな基準形状を用いることもなく、ただ未知形状を持つ 2 面の間隔を測定することのみによって、両面の形状を決定できるかどうかの検証をすることが本測定実験の目的である。

そのため、図 3 に示すような測定実験装置を試作した。その構成の構造的な精度や測定センサの精度は高いものではないが、測定対象にしている 2 面の表面形状の変化は、この装置の精度よりはるかに大きいものとしている。そのことにより測定量に対して、装置自身のもつ実際の誤差は無視してよく、逆に作意的に測定量と同程度の大きさの誤差を作成し、回転による傾きと上下動の誤差を測定量の中に混入させることができる。したがって、この装置としては、高精度なものではないが、本測定法の実験的検証を行うためには十分であると考えられる。

同図の測定器群には電気マイクロメータが配置され、この実験では 12 本が半径 40 mm の円周上に等間隔に測定器支持腕に固定されている。それぞれの電気マイクロメータの零点位置は不ぞろいで、その不ぞろいが図 1 に示す面 B の形状に相当している。本測定法ではこの面 B の形状 ξ が分からなくても面 A の形状が求められるが、これを検証するために面 B の形状

ξ, すなわち各マイクロメータの零点位置を任意に変化できるようにしている。

このようにして、面 A に対して異なった面 B を対応させても常に同一の面 A の形状が測定できることを示す。測定器としてマイクロメータを選んだのはこのように面 B の設定が簡単にできること、かつ面 A と面 B の間隔の測定が容易であることからである。

測定面の一方は面 B であり、もう 1 つの測定面 A は機械加工によって、表面に $\pm 0.1 \text{ mm}$ 以内の凹凸をつけた円盤状で、その表面形状は図 1 の面 A の形状 η に対応する。この機械加工された面 A が目盛円盤上に固定され、目盛円盤の回転によって、電気マイクロメータの位置と測定点の対応を変えることができる。測定面 A の中心には 20 mm の穴があり、測定器群の中心には 16 mm の穴がある。これらに段付きの軸を通すことによって、両者の中心をほぼ一致させている。これによって、その中心のずれは $\pm 0.25 \text{ mm}$ 以内に納めることができる。

また、一般的に 2 つの面を相対的に移動させるときには、互いに傾いたり、上下動することが考えられる。それらの値は測定データに混入することになる。この測定データに不規則に混入してくる値を測定量と同じくくらいの大きさにするために、図のようにねじ T_1 を 1 本、 T_2 を 2 本、そして支持台の 4 つで目盛円盤を支持している。これらのねじを強制的に動かすことによって、面 A と面 B の相対的傾きや上下動を任意に変化できるようにしている。これにより、式 (1) 中の $\alpha, \beta, \varepsilon$ に対応する値を与えることができる。これは測定量と同程度の大きさのガタをもつ回転テーブルで測定データを得て、表面形状などの測定を行うことに相当している。

3.2 測定実験方法

図 3 に示す測定装置で、目盛り円盤の回転位置目盛を 0° とし、12 本の電気マイクロメータを測定面に接触させて、12 個の測定データを取り、次に 1 分割分の角度 (30°) ずつ、 330° まで、回転させては測定データをとることを行った。したがって、1 回の測定で 144 個の測定データが得られる。

この方法による実験を次の 3 種類について行った。

a 測定実験 1

電気マイクロメータの取付位置はある値に設定した状態で、図 3 の T_1, T_2 を動かさずに測定データを求める。これは 2 つの面の形状 ξ, η に比べて、 $\alpha, \beta, \varepsilon$ をほとんど変化させない場合に対応する。

b 測定実験 2

電気マイクロメータの取付位置は実験 1 のままで、 30° 回転ごとに図 3 の T_1, T_2 を不規則に動かして、測定データを求める。これは 2 つの面の形状 ξ, η に比べて、かなり大きく $\alpha, \beta, \varepsilon$ を変化させた場合に対応する。

c 測定実験 3

電気マイクロメータの取付位置を実験 1 の状態から変化させて、図 3 の T_1, T_2 は動かさずに、測定データを求める。これは面 B の形状 ξ を変化させて、 $\alpha, \beta, \varepsilon$ をほとんど変化させない場合に対応する。

次に、この測定装置よりもはるかに測定精度の良い、3 次元測定機によって測定面 A の半径 40 mm の円周部分と、それより半径が 0.25 mm 大きい部分と小さい部分の合計 3 円周部分を測定し、本測定法による結果との比較を行った。

この 0.25 mm の意味は測定面 A の円周部分 η が半径 $40 \pm 0.25 \text{ mm}$ の範囲に入っているということである。

Fig. 4 Read data of each electric micrometer in experiment b

両測定装置についての比較として、3 次元測定機の目量は $1 \mu\text{m}$ 、本装置の電気マイクロメータの目量は $5 \mu\text{m}$ である。そして、電気マイクロメータの支持腕は、厚さ 15 mm、幅 30 mm、高さ 240 mm の柱に片持ちの状態に取り付けられているので、その剛性は 3 次元測定機に比べて非常に小さい。この剛性が小さいということは、測定時に 2 面間の相対的傾きや上下動が起りやすいということになるが、それらの面の形状に関係しない不規則な測定値の変動量は、本測定法には関係しないという意味がある。ただ、電気マイクロメータ 12 本の支持腕は剛性が高く、各電気マイクロメータの相対的位置の変動は非常に小さい。

4. 測定結果および考察

図 4 は測定実験 2 の場合の図 3 における 12 本の電気マイクロメータのうちの 8 本の読みを示すものである。

この実験の場合は面の組合せごとに図 3 に示すねじ T_1, T_2 を強制的に動かしているため、それぞれの測定データが非常に不規則に変動している。

図 4 に示すような測定データによる観測方程式と条件式による形状測定方程式を解くことにより、未知量である $\xi, \eta, \alpha, \beta, \varepsilon$ を求めて図 5～図 9 の結果を得た。これらの図では上の 3 つの実験の結果をすべて示している。図の右の a, b, c はそれぞれの実験に対応している。

なお、形状測定方程式としては、未知数の数より方程式の数の方が多ければ十分である。すなわち、この場合は面の組合せが 3 種類で、36 個の測定データに対する観測方程式と 6 個の条件式による形状測定方程式で未知量が唯一解を持つ。しかし、ここでは、測定誤差も考慮して、すべての測定データ 144 個を使って計算している。

図 5 は測定データから計算することによって求められた電気マイクロメータの取付位置を示すものであり、それらの位置は同図に示すように不ぞろいであり、図 1 の面 B の形状 ξ に相当する。このように、 ξ の形状は実験 1 と実験 2 がほぼ同じで、実験 3 で異なったものとなっている。これは実験方法の電気マイクロメータの設定位置の変更に一致している。

図 6、図 7 はそれぞれ面 B の x 軸、 y 軸に対する傾きによる面 B の移動 (αr と βr に相当) を示す。これは目盛円盤の回転ごとのガタにより生じる面 B の傾きに対応している。

図 8 は面 B の上下動 (ε に相当) を示す。

これら図 6、図 7、図 8 に共通することとして、実験 1 と実験 3 では図 3 のねじ T_1 と T_2 を動かさず、実験 2 で不規則に

 Fig. 5 Micrometer positions (corresponding to ξ)

Fig. 9 Calculated profile of surface A for full data

 Fig. 6 Surface displacements αr

Fig. 10 Profiles of surface A measured with 3-dimensional measuring machine

 Fig. 7 Surface displacements βr

Fig. 8 Vertical random motion of surface B

 Fig. 11 Differences of calculated values in each measuring point θ of surface A for different number of rotations

している。

図9は測定面Aの形状 η を示し、3つの実験の値が一致している。

この図によって、測定表面Aの形状 η は電気マイクロメータの取付位置の状態 ξ や面Bの傾き $\alpha r, \beta r$ および上下動 ε には関係なく、求められていることが分かる。

図10は3次元測定機によって、面Aの半径40 mm, 40-0.25 mm, 40+0.25 mmの3つの円周部分について測定した結果である。その形状変化の最大の大きさは約140 μm であった。図に示すように、半径の大きさによっても形状に大きな違いはなく形状変化が緩やかであることが確認できた。これらの結果は本方法によって求めた形状と $\pm 10 \mu\text{m}$ の範囲で一致している。

動かした。すなわち、以上の3つの図で、実験1と実験3における $\alpha r, \beta r, \varepsilon$ はほぼ同じで、実験2でこれらが不規則に変動

このことにより本方法の妥当性を確認することができる。

図 11 は測定実験における、面の組合せの数 3 から 12 を使ったときの測定面 A の形状 η の決定状況を示したものである。面の組合せ数は、円周の分割数 N 個と同じだけ作ることができるが、本測定方法の場合には最低 3 つの組合せ数が必要である。面の組合せ数を M とすれば、観測方程式の数は $M \cdot N$ となる。したがって、この図は観測方程式の数の増加による測定面 A の形状 η の決定状況を示すものといえる。図中の θ は η の測定点を表す。測定点は円周の 30° ごとにあり、12 個である。図に示されるように面の組合せ数が多くなれば、計算結果は安定してくることがわかる。

5. 結 論

以上の測定実験によって、2 つの平面上の円周部分の形状を基準を必要とせず同時に求める方法の妥当性を実験的に確かめた。

文 献

- 1) 後藤充夫, 飯塚幸三: 円筒形状誤差の一解析法, 精密機械, 41, 5 (1975) 477.
- 2) 後藤充夫, 飯塚幸三: 真円度測定機の誤差特性の解析, 精密機械, 44, 10 (1978) 1265.
- 3) 園崎昭八, 藤原晴夫: 複数の 3 点法を用いた円形部品の断面形状と回転精度を同時に測定する方法, 精密工学会誌, 54, 11 (1988) 2095.
- 4) 加藤秀雄, 中野嘉邦, 野村雄二郎: 精密円筒研削における機上真円度測定システムの開発, 精密工学会誌, 56, 5 (1990) 861.
- 5) 加藤秀雄, 野村雄二郎, 中野嘉邦: 3 点法に基づく機上真円度測定法の改良と n 点法への拡張, 精密工学会誌, 56, 12 (1990) 2303.
- 6) 伊藤俊治, 成清辰生, 佐藤 豊, 岡田弥高: 2 次元最小 2 乗逐次 2 点法による平面形状誤差の測定, 精密工学会誌, 57, 10 (1991) 1844.
- 7) 伊藤俊治, 成清辰生, 伊藤正美: 2 次元最小 2 乗逐次 3 点法による平面形状誤差の測定, 精密工学会誌, 58, 6 (1992) 1023.
- 8) 山口城治: 改良逐次三点法による直線運動精度の計測, 精密工学会誌, 60, 4 (1993) 773.
- 9) 小尾 誠, 松本達也, 小林隆志: 平面度のオンザマシーン測定, 日本機械学会論文集 C 編, 54, 503 (1988) 1463.
- 10) 小尾 誠, 小林義之: 逐次三点法を応用した円周上の変位測定, 日本機械学会論文集 C 編, 58, 548 (1992) 1278.
- 11) 高 偉, 清野 慧, 奥山栄樹: ソフトウェアデータムによる形状の絶対測定, 精密工学会誌, 60, 4 (1994) 554.
- 12) J. Grzanna: Absolute Testing of Flatness Standards at Square-grid Points, Opt. Commun., 77, 2, 3, (1990) 107.
- 13) J. Grzanna: Absolute Testing of Optical Flats at Point on a Square Grid, Appl. Opt., 33, 28, (1994) 6654.
- 14) 園崎昭八, 岩田耕一, 岩橋善久: 基準を必要としない形状測定法の研究 (平面形体の円周上での測定), 日本機械学会論文集 C 編, 60, 576 (1994) 2560.