三点法による真円度測定法の一考察*

小尾 誠^{*1}, 小林隆志^{*1}, 古川 進^{*1}

On a New Method of Roundness Measurement Based on the Sequential-Three-Points Method

Makoto OBI, Takashi KOBAYASHI, and Susumu FURUKAWA

A method of a roundness measurement to control not only the size accuracy but also the shape accuracy of works on machine tools is presented. Roundness is measured by three sensors which are successively fed and rotated through the distance of the sensors. This new measuring method is based on the three-points method and the sequential-three-points method which were proposed recently by Tozawa and et al. to measure the straightness. A summary of the results is as follows. (1) The measuring principle of roundness based on the three-points method and the sequential-three-points method is demonstrated. (2) A consideration on the gage angle, the number of measuring points and the coefficient of roundness is effected. (3) Some problems considered to cause the measuring error are treated. (4) The calculation time of roundness using the simplex method is reduced remarkably.

Key Words: Measurement, Roundness, Three-Points Method, Sequential-Three-Points Method, Machine Tool, Simplex Method

1. 緒 言

一般に、工作物の製品検査は環境の整った測定室で非常に高価な測定装置により測定される。しかし、生産能率の向上のためのみならず加工精度向上のためにも加工現場での精度の測定は非常に重要である。このため工作機械上での製品精度の測定技術の開発は非常に古くから行われ、オンライン計測として実用化されている例は少なくない。

工作機械の母性原理に頼らない真円度のオンライン計測方法としては三点法による例が多い⁽¹⁾。三点法による真円度測定は、実質上は一点を測定するため測定装置は簡単である反面、被測定面の周波数成分に対し拡大率が異なるため、測定結果をフーリエ級数展開し個々の周波数成分に対応した拡大率の逆数を乗じ、被測定物のプロファイルを求めなければならない⁽²⁾。

戸沢らは、二点逐次計測法による真直度の測定を示した⁽³⁾⁽⁴⁾。二点をさらに三点測定にすれば揺角をも測定できることを指摘している。逐次計測法はセンサ間隔ごとに対向する点の相対変位差を測定し、その累積

結果よりも各点の変位を求めるものである。被測定物の変位とセンサ移動に伴う変位とが分離して測定されるという特徴がある。

本研究はこのような逐次計測法の考え方を真円度測定へ応用する方法を検討し、あわせて三点法による二、三の課題を考察した。逐次計測法によればフーリエ級数展開を行わなくても被測定物真円度を求めることができる。

2. 測定装置と方法

外径の真円度測定三点法にはVブロック式と馬乗りゲージ式があるが、前者は被測定物を挟んでVブロックとセンサとを対向して設置しなければならず測定操作の自動化のためには障害となる。このため本研究では後者の馬乗りゲージ式を採用した。図1は真円度測定のための測定装置および測定原理を示す。(a)に示される測定装置は、基本的には馬乗りゲージ式三点法と同じであり、測定端子と微小変位計端子とによって構成されている極めて単純なものである。

測定装置は図(a)に示されるようにスプリングで支持され測定方向に対しては十分な余裕を持って移動することが可能である。測定端子は二つの接触子を持っており、同時に被測定物に接触できるよう回転する。

* 昭和63年7月15日 東海支部浜松地方講演会において講演、原稿受付 昭和62年11月19日。

*¹ 正員、山梨大学工学部 (〒400 甲府市武田4-3-11)。

測定は、二つの接触子の二等分線上に置かれたセンサ(微小変位計)により、被測定物を回転しながら、連続的に被測定物表面を測定することは通常の三点法と同じであるが、測定値はセンサと接触子接点間隔ごとに与えられる。すなわち、図(b)において、接触子Aを S_{n-1} 、Cを S_{n+1} 点に置き、センサにより S_n 点の変位を測定値とする。次いで、 d 間隔ずれるように被測定物を回転しセンサの位置に対応する点を測定値とする。このように実際に被測定物を測定する操作は一周であるが、 d 間隔単位で測定値を選択し結果的には1周あるいは2周以上にわたって与えられる測定結果から逐次計算により真円度を求める。

3. 真円度計測原理

3.1 逐次計測法の原理 図1(b)の等価モデルを(c)に示す。(b)において任意の同心円からの変位を y_{n+1} , y_n , y_{n-1} また接触子のなす角(ゲージ角)を 2ϕ とすれば、等価モデルにおいて各点からの任意な直線までの長さは各々 $y_{n+1}/\sin\phi$, $y_n/\sin\phi$, $y_{n-1}/\sin\phi$ となる。したがって、幾何学的関係から

$$y_n - (b_n - b) = (y_{n+1} + y_{n-1}) / 2 \sin\phi$$

b は一定であるからであるから

$$y_{n+1} = 2 \sin\phi (y_n - b_n) - y_{n-1} \quad [n > 1] \quad \dots\dots\dots (1)$$

ゆえに、 y_{n+1} の変位は y_n , y_{n-1} およびセンサ出力 b_n により計算される。初めに、式(1)は被測定物の形状を示すことを証明しておく。

円筒形状被測定物プロフィールを $r-\theta$ 座標系で表すと

$$r(\theta) = \sum_{i=1}^{\infty} c_i \cos(i\theta + \phi_i) \quad \dots\dots\dots (2)$$

一般的な馬乗りゲージ測定法におけるセンサ出力は幾何学的関係から

$$b(\theta) = (d_o - d_m)(1 - 1/\sin\phi)$$

$$+ \sum_{i=1}^{\infty} \mu_{0,i} c_i \cos(i\theta + \phi_i) \quad \dots\dots\dots (3)$$

ただし拡大率: $\mu_{0,i} = 1 - \{\cos i(\pi/2 - \phi)\} / \sin\phi$

一周 2π の分割数を $m+1$ として

$$\theta_n = 2\pi \frac{n}{m+1}, \quad \phi = \pi \left(\frac{1}{2} - \frac{2}{m+1} \right)$$

と置けば式(2)より

$$y_0 = r(\theta_0) = \sum c_i \cos(\phi_i)$$

$$y_1 = r(\theta_1) = \sum c_i \cos(i\theta_1 + \phi_i)$$

また式(3)より(ただし $d_o = d_m$ とする)

$$b_1 = b(\theta_1) = \sum \mu_{0,i} c_i \cos(i\theta_1 + \phi_i)$$

式(1)に代入すれば次式の関係が導かれる。

$$y_2 = r(\theta_2)$$

同様に

$$y_{n-1} = r(\theta_{n-1})$$

$$y_n = r(\theta_n)$$

$$b_n = b(\theta_n) = \sum \mu_{0,i} c_i \cos(i\theta_n + \phi_i)$$

より

$$y_{n+1} = r(\theta_{n+1})$$

が導かれ、式(1)によって計算される値は式(2)に等しいことが証明される。

式(1)の一般解は次のように導かれる。

$$\left. \begin{aligned} A + B &= -2 \sin\phi \\ AB &= 1 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (4)$$

と置けば

$$(y_{n+1} + A y_n) + B(y_n + A y_{n-1}) = -2 \sin\phi b_n$$

$$\therefore y_{n+1} = \{ -(-A)^{n+1} \sum_{i=1}^n (-A)^{-i} (-B)^i \} y_0$$

$$+ (-A)^n \{ 1 + \sum_{i=1}^n (-A)^{-i} (-B)^i \} y_1$$

$$- 2 \sin\phi (-A)^n \sum_{i=1}^n (-A)^{-i} (-B)^i \sum_{j=1}^i (-B)^{-j} b_j$$

式(4)の解を代入して整理すると

$$r_{n+1} = X_n r_0 - X_{n+1} r_1 + 2 \sin\phi \sum_{i=1}^n X_i b_i$$

ここで、 $i = \sqrt{-1}$ とするとき

(a) 測定装置

(b) 測定原理

(c) 等価測定モデル

図1 測定装置と原理

$$X_n = \frac{(\sin \phi - i \cos \phi)^n - (\sin \phi + i \cos \phi)^n}{2i \cos \phi}$$

X_n の n 乗項を 2 項定理で分解して、公式⁽⁵⁾

$$\sin(n\theta) = \sum_{r=0}^{[(n-1)/2]} (-1)^r C_{2r+1} \sin^{2r+1} \theta \cos^{n-2r-1} \theta$$

を応用すれば

$$X_n = -\sin\{n(\pi/2 - \phi)\} / \cos \phi$$

ゆえに

$$\begin{aligned} y_{n+1} &= -y_0 \sin\{n(\pi/2 - \phi)\} / \cos \phi \\ &+ y_1 \sin\{(n+1)(\pi/2 - \phi)\} / \cos \phi \\ &- 2 \tan \phi \sum_{i=1}^n b_i \sin\{i(\pi/2 - \phi)\} \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

初期項 y_0 と y_1 は測定系の偏心に相当する被測定物回転の 1 周期成分であるから、結局被測定物真円度はこれらの項を除いた次の計測値より計算されるものに同値である。

$$r_{n+1}^* = -2 \tan \phi \sum_{i=1}^n b_i \sin\{i(\pi/2 - \phi)\} \dots\dots\dots (6)$$

いずれの式を用いても被測定物各点の相対変位は非常に簡単かつ短時間で計算される。すなわち、フーリエ級数展開をしなくて計算することを可能にする。ここに示す逐次計測による真円度測定法の大きな特徴である。反面、測定データ数はゲージ角により有限個に定められる点に問題がある。そこで測定点数と真円度計算誤差について考察する。

3・2 ゲージ角度と測定点数および真円度係数

真円度を計算するとき測定点数が十分でないと必ずしも真値を得られない場合もある。そこで有限個の測定値より計算された値と真値との比

$$\text{真円度係数} = \frac{\text{有限個測定値により計算された値}}{\text{真値}}$$

を真円度係数と呼ぶことにする。

表 1 は一般的なゲージ角度、90 度 (測定点数 8)、120 度 (同 12) および 150 度 (同 24) として測定されるとき真円度係数の最大値を示した。ここで n は被測定物周波数成分の周期数でまた括弧内は拡大率を示す。これらの結果を見ると単一周波数成分を持つ被測定物でかつ拡大率が十分なゲージ角度では測定可能になる。なぜなら単一周波数の場合測定点数は限定されるが、真円度計算の結果が最大になるような測定点を選択し、真円度係数の逆数を乗ずることにより真円度は求められる。しかし周波数成分が 2 以上になるとそれらの位相は必ずしも一致しないため測定は不可能となる。

このような課題を解決するためにはいくつかの方法が考えられるが比較的容易な方法として、ゲージ角度を適当に選択し測定点数を増やす方法を考察する。

すでに示したように、被測定物 1 周に相当する測定結果のうちゲージ角度により定まる間隔ごとの測定値により真円度が計算される。この測定点が被測定物 1 周後も前測定点と一致しないなら 2 周め以後も前測定点と一致するまで測定値として選択することができる。したがって、ゲージ角度を適当に設定することにより任意の測定点数を選択することができる。このゲージ角度とその角度による測定点数を表 2 に示す。ここではゲージ角度が 50 度以上 150 度以下で整数で表されるすべてについて示している。

表 3 は測定点数 24 から 144 までを取るとき真円度係数を示している。被測定物周期数 2 から 15 までについて、上は真円度係数の最大値、下は最小値を示す。これらはいずれの条件でも 1 であることが理想である。

表 3 の計算結果を見るといずれの測定点数でも 12 周期の周波数成分の場合が最も悪い。これを除くと測定点数 72 の場合、最も悪い測定条件でも誤差は 1 に対し約 0.08、また測定点数を 144 までにすると 15 以下のいずれの周期を持つ被測定物でも誤差は 1 に対し

表 1 真円度係数の最大値と拡大率

n	90° (8)	120° (12)	150° (24)
2	1 (1.0)	1 (.423)	1 (.103)
3	.834 (2.0)	1 (1.0)	1 (.268)
4	1 (2.414)	.750 (1.577)	1 (.482)
5	.834 (2.0)	.928 (2.0)	.944 (.732)
6	1 (1.0)	1 (2.155)	1 (1.0)
7	- (0)	.928 (2.0)	.928 (1.268)
8	- (.414)	.750 (1.577)	.750 (1.518)
9	- (0)	1 (1)	1 (1.732)
10	1 (1.0)	1 (.423)	1 (1.897)
11	.834 (2.0)	- (0)	.983 (2.0)
12	1 (2.414)	- (.155)	1 (2.035)

表 2 ゲージ角度と測定点数

$n+1$	$2\phi^\circ$	$n+1$	$2\phi^\circ$	$n+1$	$2\phi^\circ$
6	60	48	75, 105	240	51, 57 69, 87 93, 111 123, 129 141, 147
8	90	60	96		
9	100	72	50, 70 110, 1300		
10	108	80	66, 81 99, 117	360	58, 62 74, 82 86, 94, 98 106, 118 122, 134 142, 146
12	120				
15	84, 132	90	76, 92 124		
16	135	120	66, 78 102, 114 138	720	53, 59 61, 67 71, 73 77, 79 83, 89 91, 97 101, 103 107, 109 113, 119 121, 127 131, 133 137, 139 143, 149
18	140				
20	72, 144				
24	150	144	55, 65 85, 95 115, 125 145		
36	80				
40	55, 126	180	56, 64 88, 104 112, 128 138		
45	52, 116 68, 948				

表 3 真円度係数

n	24	36	48	72	144	n	24	36	48	72	144
2	1.000 0.906	1.000 0.985	1.000 0.993	1.000 0.997	1.000 0.999	9	1.000 0.927	1.000 0.729	1.000 0.982	1.000 0.923	1.000 0.982
3	1.000 0.927	1.000 0.969	1.000 0.989	1.000 0.992	1.000 0.998	10	1.000 0.966	1.000 0.986	1.000 0.993	1.000 0.997	1.000 0.999
4	1.000 0.816	0.985 0.972	1.000 0.966	0.999 0.987	1.000 0.997	11	0.983 0.975	0.991 0.988	0.993 0.991	0.993 0.992	0.993 0.993
5	0.946 0.943	0.075 0.971	0.995 0.994	0.999 0.997	0.998 0.998	12	1.000 0.000	0.866 0.750	1.000 0.707	1.000 0.886	1.000 0.982
6	1.000 0.707	1.000 0.869	1.000 0.927	1.000 0.969	1.000 0.992	13	0.983 0.975	0.989 0.985	0.989 0.988	0.989 0.989	0.990 0.990
7	0.973 0.965	0.950 0.948	0.974 0.973	0.999 0.997	0.999 0.999	14	1.000 0.966	1.000 0.985	1.000 0.993	1.000 0.996	1.000 0.999
8	0.866 0.750	0.985 0.971	1.000 0.866	0.985 0.971	1.000 0.985	15	1.000 0.927	1.000 0.966	1.000 0.982	1.000 0.993	1.000 0.998

約 0.02 以下であり実質的には問題にならない大きさと言える。例えば測定点数 144 点になるゲージ角度は表 2 より 55 度以上 145 度まで 7 種類あることがわかる。

3・3 測定精度 三点法で常に問題になる課題は拡大率である。本測定方法では拡大率が小さくなると実質的な測定分解能は比例して小さくなる。先の測定点数が 144 点になるゲージ角度の拡大率を図 2 に示す。いくつかのゲージ角度の場合を示しているが、その中で太線で示されるゲージ角度 55 度についてみると、最も小さい値を取る拡大率は約 0.5 であるから、分解能は 2 分の 1 に落ちる。一つのセンサ、1 回の操作で測定を行うためやむを得ないところである。この程度のセンサ性能の低下が許されるなら 15 周期以下のすべての周波数成分を含む被測定物の測定は可能である。

15 周期以下の全周波数成分に対し拡大率が 1 以上を示すゲージ角度も存在する。図 2 中に破線で示したゲージ角度 30 度の場合はその一例である。ただし、このような小さい角度では次のような問題がある。

図 3 はゲージの力学的変形に伴う測定誤差も示すものである。[I] を a を固定したはりと考えると b 点での変位 y_1 および傾き θ_1 は

$$y_1 = -\frac{Pl_1^2}{12EI_1} \left(2l_1 + \frac{3l_2}{\sin \phi} \right)$$

$$\theta_1 = -\frac{Pl_1}{4EI_1} \left(l_1 + \frac{3l_2}{\sin \phi} \right)$$

[II] を b を固定したはりと考えると

$$y_2 = -\frac{Pl_2^3}{6EI_2 \sin \phi}$$

c 点は [I] の傾き θ_1 によりさらに $l\theta_1$ 変位するから

$$\delta_2 = -\frac{Pl_1 l_2}{4EI_1} \left(l_1 + \frac{2l_2}{\sin \phi} \right)$$

図 2 拡大率

図 3 ゲージの力学的変形

ゆえに、傾きは ϕ に対して十分小さいとすれば、はりの変形に伴うゲージの変位による測定誤差 e は

$$e = y_1 + \sin \phi (y_2 + \delta_2) \\ = -\frac{P}{12E} \left[\frac{2l_1^3}{I_2} + \frac{6l_1 l_2^2 + 2l_1^3}{I_1} \right. \\ \left. + \frac{3l_1^2 l_2}{I_1} \left(\sin \phi + \frac{1}{\sin \phi} \right) \right] \dots\dots\dots (7)$$

ここで、 E :縦弾性係数、 I :断面二次モーメント

最後の項を見るとゲージ角が小さくなると $\sin \phi$ すなわち分母が小さくなり、また図3の幾何学的関係より ϕ が小さくなると設計上 l_2 を大きく取らなくてはならないため結果的に誤差は大きくなる。例えば l_1 : 50 mm, l_2 : 70 mm, E : 2100 kgf/mm², ϕ : 20° としてゲージ変形に伴う誤差を計算してみると $e=4.19 \times 10^{-3} P \text{ mm}$ となる。

これらは剛性の問題であり構造的に解決することは不可能ではないが、さらに ϕ が小さくなると図3で示されるようにゲージと被測定物との接触点での垂直応力が大きくなり接触変形および摩擦力が大きくなる。

ところで、実測定ではセンサは被測定物形状に完全には追従せず、被測定面と接触子面との接触点における形状偏差が含まれる。

通常真円度測定は滑らかな直線を持つ接触子と円筒上に凹凸を持つ半径 R の被測定物との接触であるが、これを直線上に凹凸を持つ被測定物と半径 R の円(スタイラス)との接触との等価であると考えれば、図4のような接触機構として考察される。

図に示されるような幾何学的関係において、全測定長さを L とするときうねりを単一周成分として

$$y = a_0 \sin(2\pi k X/L) \dots\dots\dots (8)$$

とする。ここで k はうねりの山数を示す。

円心からの測定基準線への垂線に対する誤差点への直線のなす角を θ とすれば

$$\tan \theta = a_0 \frac{2\pi k}{L} \cos \frac{2\pi k}{L} (X + r\theta)$$

このとき $r\theta/L$ は極めて小さい値であり、形状測定では k は比較的小さいので $(2\pi k r\theta)/L$ は1に対して十分小さいものとしてその2次項を無視すれば

$$\theta = a_0 \frac{2\pi k}{L} \cos \frac{2\pi k}{L} X / \left\{ 1 - a_0 \left(\frac{2\pi k}{L} \right)^2 r \right\}$$

スタイラスの変位誤差 ϵ は

$$\epsilon = r(\cos \theta - 1) + a_0 \left\{ \sin \frac{2\pi k}{L} \times (X + r\theta) X - \sin \frac{2\pi k}{L} X \right\}$$

前仮定と同様にして近似すれば

$$\epsilon = -\frac{1}{2} - r\theta^2 + a_0 r\theta \frac{2\pi k}{L} \cos \frac{2\pi k}{L} X$$

ここで、被測定物の半径を R すると

$$\theta = \frac{a_0 k}{R - a_0 k^2} \cos k \frac{X}{R}$$

$$\epsilon = \frac{(a_0 k)^2 (1 - 2a_0 k^2/R)}{R(1 - a_0 k^2/R)^2} \cos^2 k \frac{X}{R}$$

$a_0 k^2/R$ の2次項を無視すると

図4 スタイラスと表面うねりの接触機構

$$\epsilon = \frac{(a_0 k)^2}{R} \cos^2 k \frac{X}{R} \dots\dots\dots (9)$$

ゆえに、この誤差の最大値はうねりの振幅およびその周波数の二乗に比例し、被測定物の半径に反比例する。

センサの出力誤差は二つの接触子とセンサとの相対的位置関係により定まるから、各点におけるスタイラスの変位誤差を ϵ_n とするとセンサ出力誤差 e_n は

$$e_n = (\epsilon_{n-1} + \epsilon_{n+1})/2 \sin \phi - \epsilon_n$$

センサの半径は被測定物に比較し十分小さいから ϵ_n を無視すると、 $X_n = n(\pi/2 - \phi)R = naR$ と置けば

$$e_n = \frac{(a_0 k)^2}{2R \sin \phi} (1 + \cos 2ka \cos 2kna) \dots\dots (10)$$

4. 真円度の計算

真円度は円筒形状断面の輪郭を二つの同心円で挟むときの最小領域によって評価される。この最小領域は、円筒断面内に任意な一点を同心円の中心として取るとき、その点から被測定物輪郭までの距離の最小値と最大値との差が他のすべての点の場合と比較し最小となるときの値である。

すなわち、被測定物の半径を r とすれば、真の中心点近傍にある任意の点 (dx, dy) との距離 l は

$$l^2 = \{(r + r_n) \cos \theta - dx\}^2 + \{(r + r_n) \sin \theta - dy\}^2$$

$dx/(r + r_n)$, $dy/(r + r_n)$ の2次項を無視すると

$$l = r + r_n - (dx \cos \theta + dy \sin \theta)$$

したがって、真円度 H は

$$H = \{h(dx, dy)\}_{\min}$$

$$h(dx, dy) = \{r_i^* - (dx \cos 2\pi i/m + dy \sin 2\pi i/m)\}_{\max} - \{r_i^* - (dx \cos 2\pi i/m + dy \sin 2\pi i/m)\}_{\min} \\ [i=0, 1, 2, \dots, m] \dots\dots\dots (11)$$

なる dx, dy を求める非線形計画法の課題に帰す。

このような最小領域法による形状精度の評価に関する研究は山登り法を初め多く報告されている。ここでは計算が単純で結果の収束が安定している Nelder らが示したシンプレックス法を採用した。しかし、シン

ブレックス法は計算時間が長いという欠点がある。ちなみに、表4に真円度計算時間を示しているが、モデルAの場合パーソナルコンピュータ(PC-9801vm 数値演算プロセッサ8087未使用)ベーシックで116秒、コンパイル形のターボ・パスカルで68秒かかる。モデルBの場合ターボ・パスカルでも117秒かかる。本測定方法はオンライン計測等に応用されることを考慮すればこれらの計算時間は極めて長く実用的には問題があるといえる。このため試行錯誤的に計算時間の短縮を試みた。

平面度を計算する過程は計算時間的には大きくは式(11)を計算する過程とシンプレックスアルゴリズムとに分かれる。したがって、計算時間を短縮するためにはシンプレックス法のアルゴリズムを変更し試行回数を減らすか、式(11)等の計算時間を短縮する方法による。ここでは主に後者により考察した。

式(11)において計算結果は i を零から測定点数まで変化させたときの最大値と最小値との差を求め、その差の最小値として与えられる。このとき i を変える途中で前回の試行結果得られた真円度値より悪い値に至ればそれ以上計算を続ける必要がないため今回の試行は失敗として中止する。このようにすれば表4 [3.1]が示すように117秒の計算時間は90秒に短縮される。また式(11)において測定点数が決定されれば三角関数の取る値は定まるのでこれをディメンジョンの形のテーブルにし三角関数演算を回避すれば表4 [3.2]のようにさらに11秒に短縮される。式(11)は非常に短くかつ単純であるからこの計算のみを機械語でプログラムすれば約10分の1と極めて効果的に時間短縮される(表4 [3.3])。ただしこれは単に機械語にしたのみならず次のような理由による。

通常の演算は符号付き不動小数点形式で行われるが、ここではすべて符号付き16bit整数演算に変更して計算している(16bit CPUのため)。この方法は計算時間短縮に非常に効果的であることがわかる。なお、演算精度は与えられるデータはA/D変換されたデジタルデータでA/D変換精度の多くは12bit以下であることを考えると、十分である。さらにシンプレックスアルゴリズムをも同様な方法でアセンブラでプログラムすることにより表4 [5]が示すように約3分の1程度に計算時間は短縮される。

ところで、塚田らはシンプレックスアルゴリズムを変更することにより計算時間の短縮を計っている⁽⁶⁾。改良シンプレックス法はシンプレックスの発展を途中の計算結果を考慮して決定していく方法である。この方法によると117秒の計算時間は70秒に短縮され、

表4 真円度計算時間

method of cal.	model	time (sec)	i	j	program language
[1]	A	116	70	21	basic
[2]	A	68	53	26	pascal (turbo)
[2]	B	117	57	29	
[3.1]	B	90	57	29	
[3.2]	B	11	57	29	
[3.3]	B	1.0	51	25	pascal
[3.4]	A	1.0	63	30	in machine
[4.1]	B	70	38	18	pascal
[4.2]	B	7.9	38	18	
[4.3]	B	1.1	38	18	pascal
[4.4]	A	0.86	28	18	in machine
[5]	B	0.34	52	25	assembler
[5]	A	0.30	48	23	

model A $30\sin(\theta)$, $\sigma=0.01$

model B $\sin(\theta)\{\sin(\theta+\pi/3)+\sin(\theta+\pi/4)+\sin(\theta+\pi/5)\}$, $\sigma=0.001$

measuring points:144

さらに先ほどと同様に計算の途中中止かつ三角関数演算の回避によれば7.9秒(表4 [4.2])、式(11)の機械語化により1.1秒(表4 [4.3])になる。なお表3中 i は試行回数、 j は式(11)の計算回数であるが改良シンプレックス法によると57回の試行回数は38回に減少する。

5. 結 言

逐次計測法の真円度測定への応用を検討し、あわせて三点法の2・3節の課題を考察した。結果として项目的に整理すると次のようになる。

- (1) 逐次計測法による真円度測定原理を示した。
- (2) ゲージ角度と測定点数およびそのときの真円度係数について考察した。
- (3) 測定誤差と考えられる2・3の課題を考察した。
- (4) 真円度計算時間の短縮に成功した。

文 献

- (1) 例えば、日本機械学会編、機械第I計測技術、(昭61)、92、朝倉。
- (2) 中田・山本、機論、53-5 (昭23)、159。
- (3) 戸沢・ほか3名、機論、47-419、C (昭56)、909。
- (4) 田中・佐藤、機論、48-436、C (昭57)、1930。
- (5) 森口・ほか2名、数学公式II、(昭56)、186、岩波。
- (6) 塚田・ほか2名、精密機械、49-10 (昭58)、1351。