真円度および回転精度の多点法測定における 擬似逆行列を用いた計算処理の最適化に関する考察*

藤 巻 研 吾** 佐 瀬 浩 史*** 三 井 公 之†

A Study on Algorithm Optimization of Multi-point Method
for Measurements of Roundness and Rotation Accuracy using Pseudo-inverse Matrix

Kengo FUJIMAKI, Hiroshi SASE and Kimiyuki MITSUI

The multi-point method using more than four displacement sensors requires selections from non-unique filters deriving out-of-roundness from sensor outputs in the case of the conventional calculation technique using inverse filtering with frequency analyses. This paper analyzes propagations of sensor noises in the calculation process of out-of-roundness estimation, and shows that the calculation technique of multi-point method using pseudo-inverse matrix optimizes the calculation process and minimizes propagations of random noises occurring in sensor outputs without laborious calculations in search of the optimized filter.

Key words: multi-point method, three-point method, roundness, rotation accuracy, pseudo-inverse matrix

1. 緒 言

円筒や球などをスピンドルにより回転させて断面形状の真円度を測定する場合、回転に伴うスピンドルの振れは、断面形状の測定結果を歪ませ、真円度の測定精度を低下させる。3点法は、センサを3本用いて測定を行い、収録データに一定の計算処理をすることで、スピンドルの振れの影響を受けることなく円筒や球の断面形状を得ることができる超精密測定法である^{1)~3)}。センサ数を3本に限定せずに一般化し、多点法とも呼ばれる。また、得られた断面形状を用いてセンサ出力を補正することで、高精度な回転精度測定を行うことも可能である⁴⁾。この方法を応用して様々な真円度・回転精度測定システムが提案されており^{5)~14)}、さらに、計算処理過程の誤差解析も行われている^{15)~19)}。

3点法の場合、取り付けたセンサの角度に対して、計算処理に用いるフィルタは一意に求まるため、計算手順が非常に明解である。しかし、4本以上のセンサを用いた多点法では、そのフィルタは一意には求まらず、測定者がフィルタを選定する必要がある。ただし、それぞれフィルタによって処理結果へのセンサノイズの伝播量が異なるため、フィルタの選定は慎重に行う必要があり、特にセンサノイズの伝播を最小にするフィルタを選定するには、複雑で膨大な計算が必要となる。

一方、Vブロック法真円度測定における逆行列を用いた計算方法²⁰⁾を一般化して、3点法における擬似逆行列を用いた計算方法が提案されている²¹⁾。この方法は、一般的に使用されている周波数解析を用いた逆フィルタリング処理による計算方法と比較して、同じ処理結果を得られることが確認されており、簡素なプログラムで3点法の計算処理を行うことができる。

本研究では、この擬似逆行列を用いる計算方法が、これまで計算処理に用いるフィルタの選定に膨大な計算を必要としていた4本以上のセンサを用いる多点法において、簡単なアルゴリズムで計算処理を最適化し、処理結果へのセンサノイズの伝播量を最小にすることを明らかにしたので、以下に報告する。

2. 原 理

2.1 逆フィルタリング処理を用いた計算方法

まず、多点法において、一般的に使用されている周波数解析を用いた逆フィルタリング処理による計算方法について述べる。図1に示すように、スピンドルに取り付けられた円筒の周りに n 本のセンサ(変位センサ)をそれぞれセンサ角度 ϕ_i ($i=1,2,\dots,n$)として配置するとき、回転角度 θ における X, Y 方向のスピンドルのラジアル振れを $x(\theta), y(\theta)$ 、円筒の断面形状(真円からのずれ)を $r(\theta)$ とすると、センサ i ($i=1,2,\dots,n$)の出力 $v_i(\theta)$ は以下のように表される。

$$v_i(\theta) = r(\theta + \phi_i) + x(\theta) \sin \phi_i + y(\theta) \cos \phi_i \quad (1)$$

ここで、

$$\sum_{i=1}^n w_i \sin \phi_i = 0, \quad \sum_{i=1}^n w_i \cos \phi_i = 0 \quad (2),(3)$$

をともに満たす重み係数 w_i ($i=1,2,\dots,n$)を用いて、センサ出力 $v_i(\theta)$ の重み加算 $s(\theta)$ を求めると

Fig.1 Sensor layout of multi-point method

* 原稿受付 平成 18 年 11 月 29 日。

** 学生会員 慶應義塾大学大学院 (神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

*** 慶應義塾大学大学院 (神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

† 正 会 員 慶應義塾大学 (神奈川県横浜市港北区日吉 3-14-1)

$$s(\theta) = \sum_{i=1}^n w_i v_i(\theta) = \sum_{i=1}^n w_i r(\theta + \phi_i) \quad (4)$$

となり、 $s(\theta)$ はラジアル振れ $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$ に依存しない値となる。よって、スピンドルの 1 回転を基本周期とする周波数 k (単位 upr: undulation per revolution) を用いて、入力 $r(\theta)$ 、出力 $s(\theta)$ のフィルタの伝達関数 $H(jk)$ は、

$$H(jk) = \sum_{i=1}^n w_i \exp(jk\phi_i) \quad (5)$$

と表すことができる。よって、この逆フィルタ $H^{-1}(jk)$ に重み加算 $s(\theta)$ を通すことで $r(\theta)$ を推定することができる。ただし、センサは変位量を計っているため、直流成分 ($k=0$ upr) は意味を持たず、また、円筒の断面形状の $k=1$ upr 成分は、円筒の偏心と等価であり、通常、それはラジアル振れに含めるため、上述の逆フィルタリング処理は $k=0, 1$ upr 以外の周波数に限られる。さらに、ゼロ割とはならないように 2 upr から処理する最大周波数 $k_{\max}$ までにおいて、 $|H(jk)| \neq 0$ となるセンサ角度 ϕ_i を選択する必要がある。また、推定された断面形状をセンサ出力から差し引くことでラジアル振れを得ることができる。以下、重み加算したデータを逆フィルタリング処理するこの計算方法を逆フィルタリング法 (Inverse filtering method) と呼ぶ。

多点法を用いた実際の測定では、静電容量型変位計を用いて GND から絶縁した円筒を測定する場合や NC 工作機械に搭載されたスピンドルにおいて測定を行う場合など、高 SN 比のセンサ出力を得られないケースがあり、計算処理においてセンサノイズの伝播を抑えることは非常に重要である。ここで、センサ出力 $v_i(\theta)$ ($i=1, 2, \dots, n$) から重み加算 $s(\theta)$ へのランダムノイズ (ホワイトガウスノイズ) の伝播を正規化するために、

$$\sum_{i=1}^n w_i^2 = 1 \quad (6)$$

とおく。このとき、センサ出力 $v_i(\theta)$ 上のノイズと重み加算 $s(\theta)$ 上のノイズは、パワースペクトルにおいて等価と見なすことができる。よって、 $r(\theta)$ の推定値におけるセンサノイズのゲイン特性は周波数 k において $|H^{-1}(jk)|$ となる。ホワイトガウスノイズは各周波数ごとに一樣のパワースペクトルを持っているため、 2 upr から処理する最大周波数 $k_{\max}$ までの周波数帯域における平均的なノイズゲイン G_{ave} は以下のように表される。

$$G_{\text{ave}} = \sqrt{\frac{1}{k_{\max}-1} \sum_{k=2}^{k_{\max}} |H^{-1}(jk)|^2} \quad (7)$$

3 点法 ($n=3$) であれば、重み係数 w_i の正負がすべて反転しただけの解を 1 つと見なすと、式(2),(3),(6)を満たす重み係数 w_i は一意に求まるため、センサ角度 ϕ_i を選択すると重み係数 w_i が決定し、逆フィルタの伝達関数 $H^{-1}(jk)$ も決定する。一方、センサ数 n を 4 以上とすると、式(2),(3),(6)の 3 式を満たす重み係数 w_i は一意には求まらない。すなわち、センサ出力 $v_i(\theta)$ から断面形状 $r(\theta)$ を推定するフィルタは無数に存在することになる。たとえば、4 点法においてセンサ角度を $(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) = (0^\circ, 23^\circ, 90^\circ, 117^\circ)$ とするとき、重み係数 $(w_1, w_2, w_3, w_4) = (0.657, -0.455, -0.291, 0.526)$ および $(-0.062, 0.370, -0.693, 0.615)$ はともに式(2),(3),(6)を満たす。それらを用いて、標準偏差 $0.1\mu\text{m}$ のランダムノイズ (ホワイトガウスノイズ) を含む 4 つのセンサ信号から $H^{-1}(jk)$ により推定される断面形状をシミュレーションすると、それぞれ図 2 の①、②の点線に示すようになる。どちらも実線で示されている真値と近い結果が得られているが、真値に対する標準偏差 σ は異なっている。よって、同じ 4 つのセンサ出力を用いても、計算処理方法によってセンサノイズの伝播特性が異なることがわかる。また、それぞれの逆フィルタのノイズゲイン $|H^{-1}(jk)|$ は図 3 に示すようになり、周波数ごとにその優劣は異なることがわかる。上記 2 組の重み係数のうち、周波

Fig.2 Out-of-roundness estimation using inverse filtering method (Simulation of 4-point method, $(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) = (0^\circ, 23^\circ, 90^\circ, 117^\circ)$)

Fig.3 Noise gain of the inverse filtering method

数ごとにノイズゲインの小さい方を選択して計算処理を行い、推定断面形状を合成すると、図 2 の③に示すようにセンサノイズの伝播のより小さい結果が得られる。さらに、式(2),(3),(6)を満たす上記 2 組以外の重み係数 (実数係数) においても、同様のことを行えば、図 2 の④に示すように、さらにノイズの伝播を小さく抑えることができる。このことから、文献 6)でも提案されているように、センサノイズの伝播を最小に抑えるには、式(2),(3),(6)を満たし、かつ $|H^{-1}(jk)|$ を最小にする重み係数 w_i を各周波数ごとに求める必要があることがわかる。しかし、各周波数ごとに最適な重み係数 w_i を求めるのは多大な計算時間を要し、センサ数 n が増えるほど、ますます困難になる。

2.2 擬逆行列を用いた計算方法

ここでは、多点法における擬逆行列を用いた計算方法について述べる。センサ数を n 、1 回転当たりのサンプル数を M とし、センサ角度 ϕ_i ($i=1, 2, \dots, n$) が回転角のサンプリング間隔 $2\pi/M$ の P_i 倍であるとする。サンプリングタイミング $m=0, 1, \dots, M-1$ におけるセンサ i の出力 $v_{i(m)}$ は、式(1)の断面形状 $r(\theta)$ およびラジアル振れ $x(\theta)$ 、 $y(\theta)$ をそれぞれ離散時間データ $r_{(m)}$ 、 $x_{(m)}$ 、 $y_{(m)}$ において

$$v_{i(m)} = r_{(m+P_i)} + x_{(m)} \sin \phi_i + y_{(m)} \cos \phi_i \quad (8)$$

と表すことができる。ここで、

$$\mathbf{V}_i = [v_{i(0)} \ v_{i(1)} \ \cdots \ v_{i(M-1)}]^T \quad (9)$$

$$\mathbf{R} = [r_{(0)} \ r_{(1)} \ \cdots \ r_{(M-1)}]^T \quad (10)$$

$$\mathbf{X} = [x_{(0)} \ x_{(1)} \ \cdots \ x_{(M-1)}]^T \quad (11)$$

$$\mathbf{Y} = [y_{(0)} \ y_{(1)} \ \cdots \ y_{(M-1)}]^T \quad (12)$$

$$\mathbf{T}_i = \begin{bmatrix} \underbrace{0 \cdots 0}_{P_i} & \underbrace{1 \ 0 \cdots 0}_{M-P_i-1} \\ \vdots & \vdots \\ 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ \vdots & \vdots \\ \underbrace{0 \cdots 0}_{P_i-1} & \underbrace{1 \ 0 \cdots 0}_{M-P_i} \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$\cos \Theta = \begin{bmatrix} \cos(2\pi \cdot 0/M) \\ \cos(2\pi \cdot 1/M) \\ \vdots \\ \cos(2\pi \cdot (M-1)/M) \end{bmatrix}^T \quad (14)$$

$$\sin \Theta = \begin{bmatrix} \sin(2\pi \cdot 0/M) \\ \sin(2\pi \cdot 1/M) \\ \vdots \\ \sin(2\pi \cdot (M-1)/M) \end{bmatrix}^T \quad (15)$$

と、さらに $\mathbf{O}_{b \times M}$ を 0 の要素からなる $1 \times M$ の横ベクトル、 $\mathbf{E}$ を $M \times M$ の単位行列とにおいて

$$\mathbf{V} = \begin{bmatrix} \mathbf{V}_1 \\ \mathbf{V}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{V}_n \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \mathbf{Z} = \begin{bmatrix} \mathbf{R} \\ \mathbf{X} \\ \mathbf{Y} \end{bmatrix}, \mathbf{A} = \begin{bmatrix} \mathbf{T}_1 & \sin \phi_1 \mathbf{E} & \cos \phi_1 \mathbf{E} \\ \mathbf{T}_2 & \sin \phi_2 \mathbf{E} & \cos \phi_2 \mathbf{E} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{T}_n & \sin \phi_n \mathbf{E} & \cos \phi_n \mathbf{E} \\ \cos \Theta & \mathbf{O}_{b \times M} & \mathbf{O}_{b \times M} \\ \sin \Theta & \mathbf{O}_{b \times M} & \mathbf{O}_{b \times M} \end{bmatrix} \quad (16), (17), (18)$$

とすると、 $m = 0, 1, \dots, M-1$ において式(8)が成り立つとして、以下のように表すことができる。

$$\mathbf{V} = \mathbf{A} \mathbf{Z} \quad (19)$$

ただし、 $\mathbf{V}$ の下 2 つの要素および $\mathbf{A}$ の下 2 行は、文献 21) でも述べられているように、ラジアル振れの 1upr 成分と断面形状の 1upr 成分が分離できないことに起因したランク落ちを補うため、断面形状 r_m に 1upr 成分がないとして拘束条件を加えたものである。後は、式(19)を $\mathbf{Z}$ について解けば断面形状ベクトル $\mathbf{R}$ およびラジアル振れベクトル $\mathbf{X}, \mathbf{Y}$ を得ることができる。このとき、

(たとえば、4 点法において $(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) = (0^\circ, 90^\circ, 180^\circ, 270^\circ)$ などのような) 特異なセンサ角度を選択しない限り、 $(nM+2) \times 3M$ の行列 $\mathbf{A}$ は $\text{rank}(\mathbf{A}) = 3M$ であるため、 $\mathbf{A}$ の擬似逆行列は、

$$\mathbf{A}^+ = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \quad (20)$$

と表される。この擬似逆行列 $\mathbf{A}^+$ は、 $\mathbf{A}^+ \mathbf{V}$ を $\mathbf{Z}$ の最小二乗解として与えるもので、すなわち $\|\mathbf{A}^+ \mathbf{V} - \mathbf{Z}\|$ を最小にする行列である。ここで、センサノイズの標準偏差を $0.1 \mu\text{m}$ 、センサ角度を $(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) = (0^\circ, 23^\circ, 90^\circ, 117^\circ)$ とした前節 2.1 と同じセンサ出力を用いて、4 点法による断面形状の推定をシミュレーションすると、図 4 に示すようになる。これより、文献 6) に提案されている周波数ごとに最適な重み係数を求めて逆フィルタリング法により計算する方法 (図 2 の④) と比べても、よりセンサノイズの伝播の小さい結果が得られることがわかる。よって、この擬似逆行列による計算方法 (以下、これを擬似逆行列法 (Pinv matrix method) と呼ぶ。) を用いれば、センサ数が 4 本以上の多点法においては一意ではない計算処理を最適化し、計算結果に対して、センサに生じるランダムノイズ (ホワイトガウスノイズ) の伝播を最小に抑えることができると考えられる。ただし、擬似逆行列法の計算を PC 上で行う場合、特に式(20)の逆行列計算において、多大な計算量およびメモリを必要とする。そのため、逆フィルタリング法と比較して、擬似逆行列法は計算速度および PC 上のメモリ使用量の点で不利である。

Fig.4 Out-of-roundness estimation using pinv matrix method (Simulation of 4-point method, $(\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4) = (0^\circ, 23^\circ, 90^\circ, 117^\circ)$)

なお、ここではセンサ角度をサンプリング間隔の整数倍であると仮定して、断面形状をセンサ角度 ϕ_i だけ位相シフトさせる行列 $\mathbf{T}_i$ を 0 と 1 の要素のみで表した。これは、断面形状 $\mathbf{R}$ のナイキスト周波数 $k = M/2$ 以上の成分が、サンプリング間隔の整数倍以外に位相シフトできないことに因るものである。センサ出力がサンプリング定理を満たし、かつ 1 回転あたりのサンプル数 M が奇数の場合に限れば、推定する断面形状 $\mathbf{R}$ にナイキスト周波数以上の成分は存在しないため、サンプリング間隔の整数倍以外に位相シフトさせることが可能である。このとき、周波数解析を必要としないという擬似逆行列法の利点は薄れるが、離散フーリエ変換の行列 $\mathbf{W}$ および周波数ごとにセンサ角度 ϕ_i に応じて位相シフトさせる行列 $\mathbf{L}_i$ を

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} e^{-2\pi j \cdot 0 \cdot 0/M} & e^{-2\pi j \cdot 0 \cdot 1/M} & \cdots & e^{-2\pi j \cdot 0 \cdot (M-1)/M} \\ e^{-2\pi j \cdot 1 \cdot 0/M} & e^{-2\pi j \cdot 1 \cdot 1/M} & \cdots & e^{-2\pi j \cdot 1 \cdot (M-1)/M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ e^{-2\pi j \cdot (M-1) \cdot 0/M} & e^{-2\pi j \cdot (M-1) \cdot 1/M} & \cdots & e^{-2\pi j \cdot (M-1) \cdot (M-1)/M} \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$\mathbf{L}_i = \text{diag} \left(e^{j0\phi_i}, e^{j1\phi_i}, \dots, e^{j\frac{M-1}{2}\phi_i}, e^{-j\frac{M-1}{2}\phi_i}, \dots, e^{-j1\phi_i}, e^{-j0\phi_i} \right) \quad (22)$$

とにおいて、 $\mathbf{T}_i$ は

$$\mathbf{T}_i = \mathbf{W}^{-1} \mathbf{L}_i \mathbf{W} \quad (23)$$

と表すことができる。擬似逆行列法は PC 上のメモリを多く使用することから、推定する断面形状の最大周波数に応じてセンサ出力をあらかじめダウンサンプリングして、計算する行列のサイズを極力小さくした方がよい。この多くの場合、センサ角度はサンプリング間隔の整数倍とはならないため、たとえば、断面形状 $\mathbf{R}$ を周波数 $k_{\max} = 10\text{upr}$ まで計算する場合に $M = 21$ 、 $k_{\max} = 100\text{upr}$ まで計算する場合に $M = 201$ といった具合に、1 回転あたりのサンプル数を奇数にして式(23)を用いて計算する必要がある。

3. 解 析

3.1 各周波数におけるノイズゲインの関係

多点法において、ラジアル振れは推定された断面形状を用いてセンサ出力を補正するだけであるので、ここではセンサ出力から推定される断面形状へのランダムノイズ (ホワイトガウスノイズ) の伝播特性について詳しく解析を行う。

まず、3 点法 ($n=3$) について、上述した逆フィルタリング法と擬似逆行列法を比較する。1 回転あたりのサンプル数を $M = 360$ 、3 本のセンサ角度を $(\phi_1, \phi_2, \phi_3) = (0^\circ, 23^\circ, 90^\circ)$ とすると、逆フィルタリング法と擬似逆行列法によるランダムノイズのゲイン特性は図 5(a) に示すようになり、両者は完全に一致する。なお、逆フィルタリング法のノイズゲインは $|H^{-1}(jk)|$ を用い、擬似逆行列法のノイズゲインは、擬似逆行列 $\mathbf{A}^+$ が一種の FIR (有限インパルス応答) フィルタであることから、 $\mathbf{A}^+$ の要素のうち $\mathbf{R}$ に関する部分を z 変換することで求めた。この結果より、

Fig.5 Comparison of noise gains ($M = 360$)

センサが 3 本の場合には、センサ出力から断面形状を推定するフィルタは一意に求まるため、2 つの方法は計算手順が異なるだけで、結果的には同じ処理を行っていることがわかる。

次に、上で用いた 3 本のセンサに、 $\phi_4 = 117^\circ$ の 4 本目のセンサを加えた 4 点法 ($n = 4$) について検討する。ここでは、文献 6) で提案されているように、各周波数ごとにノイズゲインを最小にする重み係数を求めて、逆フィルタリング法により計算する場合と比較する。結果は図 5(b) に示すようになり、すべての周波数において、最適な重み係数を求めて逆フィルタリング法を用いるよりも、擬逆行行列法の方がより小さいノイズゲインを実現できることがわかる。これは、逆フィルタリング法において最適な重み係数を実数の範囲で求めているためであり、各周波数の複素フーリエ係数ごとに考える場合、重み係数は複素数を取りうる。このとき、擬逆行行列法により求めた $\mathbf{A}^+$ を基にして、周波数 $k = 2\text{upr}$ における重み係数を求めると (w_1, w_2, w_3, w_4) = $(0.534, -0.348 - 0.164j, -0.295 + 0.360j, 0.484 - 0.332j)$ となっており、これらの複素係数は確かに式(2),(3),(6)を満たす。

同様に、5 本目のセンサを $\phi_5 = 144^\circ$ 、6 本目のセンサを $\phi_6 = 173^\circ$ 、7~10 本目のセンサを $(\phi_7, \phi_8, \phi_9, \phi_{10}) = (199^\circ, 221^\circ, 266^\circ, 293^\circ)$ として加え、それぞれ 5 点法、6 点法、10 点法として、擬逆行行列法におけるノイズゲインの特性を求めると、図 5(c),(d),(e) に示すようになる。これらより、センサ数を増やすほどノイズゲインの大きな周波数は少なくなるが、その値は常に $1/\sqrt{n}$ 以上であることがわかる。これは、ランダムノイズを含む n 本のセンサ出力信号を同期加算する以上には SN 比を向上することができないことに因るものである。

3.2 センサ角度とノイズゲインの関係

ここでは、多点法において擬逆行行列法を用いて計算を行う場合のセンサ角度とノイズゲインの関係の例として、4 点法 ($n = 4$) においてセンサ角度を $\phi_1 = 0^\circ$ 、 $\phi_2 = 90^\circ$ としたときについて検討する。処理する最大周波数 $k_{\max}$ を 10upr 、 15upr 、 20upr としたときの、センサ角度 ϕ_3, ϕ_4 に対する擬逆行行列法の平均ノイズゲインの分布を図 6 に示す。これは、各周波数のノイズゲインの平均自乗根 (自乗平均平方根) により計算しており、 2upr から $k_{\max}$ までの周波数において一様なパワースペクトルを持つセンサノイズに対するゲインを表している。この分布から、 $k_{\max}$ が大きくなるほど、式(19)の $\mathbf{A}$ のランクが $3M$ から落ちて平均ノイズゲインが無限大に発散する特異点の数が増え、また、その近傍のセンサ角度でもノイズの伝播が大きくなる。一方、特異点ないしその近傍のセンサ角度を選択しない限り、平均のノイズゲインは概ね 1 を下回っており、センサの SN 比を低下させずに計算処理できることがわかる。

4. 結 言

多点法測定における擬逆行行列法について、解析およびシミュレーションを行い、センサに生じるランダムノイズ (ホワイトガウスノイズ) の伝播特性について検討した。本研究により得られた結果をまとめ、以下に示す。

- (1) 擬逆行行列法は、4 本以上のセンサを用いる場合、本来、一意とはならない多点法の計算処理を最適化し、測定した断面形状の推定結果に対して、各センサ上のランダムノイズの伝播を最小に抑えて処理を行うことができる。その際、実数の範囲で最適な重み係数を求め、逆フィルタリング法を用いて計算する方法よりも、擬逆行行列法は、さらに最適化した計算処理を実現する。
- (2) センサ数が n 本のとき、たとえ多点法の計算処理を最適化したとしても、センサに生じるランダムノイズの各周波数におけるゲインは $1/\sqrt{n}$ を下回ることではない。

Fig.6 Distribution of average noise gain between 2upr and $k_{\max}$
($\phi_1 = 0^\circ$, $\phi_2 = 90^\circ$)

- (3) 擬似逆行列法は、PC 上のメモリを多く使用することから、推定する断面形状に要求される最大周波数に合わせて、あらかじめセンサ出力のデータをダウンサンプリングし、計算する擬似逆行列のサイズを小さくする必要がある。そのとき、1 回転当たりのサンプル数は奇数とする。

参考文献

- 1) 青木保雄, 大園成夫: 3 点法真円度測定法の一考察, 精密機械, **32**, 12 (1966) 831.
- 2) D. J. Whitehouse: Some theoretical aspects of error separation techniques in surface metrology, J. Phys. E, **9**, 7 (1976) 531.
- 3) D. Moore: Design considerations in multiprobe roundness measurement, J. Phys. E, **22**, 6 (1989) 339.
- 4) 三井公之: 精度診断技術の研究 3 点式主軸回転精度測定装置の開発, 日本機械学会論文集 (C 編), **48**, 425 (1982) 115.
- 5) H. Shinno, K. Mitsui, Y. Tatsue, N. Tanaka, T. Omino and T. Tabata: A new method for evaluating error motion of ultra precision spindle, CIRP Ann., **36**, 1 (1987) 381.
- 6) G. X. Zhang and R. K. Wang: Four-point method of roundness and spindle error measurements, CIRP Ann., **42**, 1 (1993) 593.
- 7) 島岡博章, 藤田昭次, 須藤勝蔵, 垣野義昭: 3 点法による寸法・形状測定に関する研究 (第 1 報) 工作機械上での大口径外径測定装置の開発, 精密工学会誌, **61**, 3 (1995) 363.
- 8) 鴻巣健治, 小野寺克博, 富田宏貴, 佐藤建吉: 円形状の機上測定システム, 日本機械学会論文集 (C 編), **64**, 617 (1998) 336.
- 9) 横田篤也, 山田隆一, 柳和久: 光学式仮想 V ブロック方式による真円度評価システムの開発 (第 2 報) 開発システムの性能評価, 精密工学会誌, **67**, 3 (2001) 483.
- 10) 小倉一朗, 岡崎祐一: 多点法による工作機械回転主軸のアキシャルおよびアンギュラモーションエラーの精密測定に関する研究, 精密工学会誌, **67**, 7 (2001) 1120.
- 11) M. J. Jansen, P. H. J. Schellekens and B. De Veer: Advanced spindle runout-roundness separation method, Advanced Mathematical and Computational Tools in Metrology V, **57**, (2001) 212.
- 12) 高偉, 佐藤栄二郎, 大沼孝真, 清野慧: 角度 3 点法による真円度と回転誤差測定に関する研究 第 1 報 角度 3 点法による真円度測定, 精密工学会誌, **68**, 9 (2002) 1195.
- 13) G.B. Jeong, D. H. Kim and D. Y. Jang: Real time monitoring and diagnosis system development in turning through measuring a roundness error based on three-point method, Int. J. Machine Tools and Manufacture, **45**, 12-13 (2005) 1494.
- 14) 鈴木紀和: 高速スピンドルの動特性評価, 機械と工具, **49**, 12 (2005) 77.
- 15) 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.
- 16) 岸智章, 鴻巣健治: 多点法による形状測定の一搬化, 精密工学会誌, **62**, 3 (1994) 441.
- 17) 原外満, 滑川徹, 松村文夫: 3 点法による真円度測定における高次成分算出の試行, 日本機械学会論文集 (C 編), **62**, 604 (1996) 4596.
- 18) 奥山栄樹, 守時一: 3 点法真円度測定法における検出子間の特性ずれの影響, 精密工学会誌, **65**, 3 (1999) 447.
- 19) 奥山栄樹, 守時一: 3 点法による真円度形状測定と軸の回転精度測定に関する一考察, 精密工学会誌, **65**, 9 (1999) 1312.
- 20) E. Okuyama, K. Goho and K. Mitsui: New analytical method for V-block three-point method, Precision Engineering, **27**, 3 (2003) 234.
- 21) 奥山栄樹: 真円度形状測定と軸の回転精度測定のための一般化された 3 点法への逆行列法の適用について, 精密工学会誌, **67**, 4 (2001) 649.