高速M推定を用いたロバストガウシアンフィルタの 振幅伝達特性*

近藤 雄基** 沼田 宗敏*** 奥水 大和***

A Transmission Characteristic of the Robust Gaussian Filter by Using Fast M-Estimation Method

Yuki KONDO, Munetoshi NUMADA and Hiroyasu KOSHIMIZU

Gaussian filter to extract the roughness profile from a primary profile suffers strongly from the outliers mingled in the data. To solve this problem, several schemes of robust Gaussian filter have been proposed. However there are several fatal problems that a mean line determined with respect to the measurement data containing no outliers is not coincident with the mean line of the Gaussian filter output. To solve this problem, we have been proposed the robust Gaussian filter by using the fast M-Estimation method. This proposed method could provide completely the same results of the original Gaussian filter method. However, it is not confirmed whether a transmission characteristic of this method is corresponding to the transmission characteristic of the Gaussian filter. Therefore, this method cannot be applied to the real applications for the measurement of roughness profile where the transmission characteristic of Gaussian filter is strictly treated. In this paper, we confirm that the transmission characteristic of this method is corresponding to the transmission characteristic of the Gaussian filter.

Key words: roughness profile, robust Gaussian filter, mean line, fast M-estimation method, transmission characteristic

1. 緒 言

計測対象物表面の粗さ曲線は、カットオフ値 λc のローパスフィルタにて断面曲線の長波長成分の平均曲線を抽出し、これを断面曲線から減算して得る。この平均曲線は、一般にガウシアンフィルタ (GF: Gaussian filter) と計測データである断面曲線との畳み込み演算によって計算される¹⁾²⁾。しかし、計測データに外れ値があると、ガウシアンフィルタの出力は深刻な影響を受ける³⁾。

このような問題を解決するため、S. Brinkmannらは平均曲線からの各データ点の乖離に基づき、順次重みを変えながら繰り返し演算を行うことによって平均曲線を求めるロバストガウシアンフィルタを提案した⁴⁾。しかし、このフィルタには、外れ値がない場合に求めた平均曲線がガウシアンフィルタの出力に一致しないという問題がある。スプラインフィルタ⁵⁾をベースにしたロバースプラインフィルタ⁶⁾も、平均曲線からの各データ点の乖離に基づき、順次重みを変えながら同様の繰り返し演算によってロバーストな平均曲線を求める手法である。しかし、外れ値のない計測データに対しては、ロバーストガウシアンフィルタ以上にガウシアンフィルタとは異なる出力を与える。従って、これらのローパスフィルタはガウシアンフィルタを基本フィルタとする計測現場では実用化できない。

そこで筆者らは高速M推定を用いたロバストガウシアンフィルタを提案し、外れ値がない場合の平均曲線がガウシアンフィルタの出力に一致するようにした⁷⁾。解決の鍵は、S. Brinkmannらのロバストガウシアンフィルタの推定関数であるBeaton関数を、2次Bスプライン基底関数に置き換えたことである。ロバストガウシアンフィルタの推定関数を、Beaton関数から2次関数に変えるとガウシアンフィルタに一致する⁴⁾。一方、高速M

推定を適用するデータに外れ値がなければ、推定関数である2次Bスプライン基底関数は中央の基本幅のみが有効になるので、実質的に2次関数としての性質しか示さない。このため、高速M推定型ロバストガウシアンフィルタは、外れ値のないデータに対してガウシアンフィルタと同様にふるまうことができる。

ここで、ガウシアンフィルタと同様にふるまう、という意味を明確にしておく。もともとガウシアンフィルタは他の位相補償フィルタと同列に扱われ、ISO11562⁸⁾によると、これには大きくわけて3つの意味があった。第1はフィルタの位相補償性で、位相遅れによる出力のひずみがあってはならない。第2はカットオフ値 λc で50%の伝達率であること、第3はガウス関数とほぼ等しい重み関数をもつことである。その後、重み関数は厳密にガウス関数である事が要請されるようになり、ISO11562はISO16610⁹⁾に置き換えられた。これらの経緯から、フィルタの振幅伝達特性がガウシアンフィルタの振幅伝達特性に一致することが示されればよいことになる。しかしながら、高速M推定型ロバストガウシアンフィルタを外れ値のないデータに適用した場合、ガウシアンフィルタの出力との誤差がごく僅かであることは確認されているものの、振幅伝達率の分布特性までは明らかになっていない。もしも、この僅かな出力の誤差が特定の波長の伝達率の誤差に起因するならば、高速M推定型ロバストガウシアンフィルタの振幅伝達特性に偏りが存在することになる。このような偏りは計測現場では歓迎されないし、カットオフ値 λc で50%の伝達率を実現できない場合にはフィルタの存在価値さえ問われかねない。このため、高速M推定型ロバストガウシアンフィルタの振幅伝達特性の検証が必要となる。

ところで、一般にローパスフィルタの振幅伝達特性は、フィルタの重み関数をフーリエ変換して計算できる。しかし、ロバストガウシアンフィルタの場合は、フィルタの重み関数が陽には与えられないので、振幅伝達特性を計算することは困難である。これは、ロバストガウシアンフィルタの重み関数が数式で

* 原稿受付 平成24年9月21日

** 学生会員 中京大学大学院 (豊田市貝津町床立101)

*** 正会員 中京大学 (豊田市貝津町床立101)

表現できないことに加え、唯一の手掛かりである推定関数の座標軸が重み関数の座標軸と直交するために生じる。高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタも、フィルタの重み関数を陽には求められないので事情は同じである。

このような問題は 2 つの関数の畳み込み出力のフーリエ変換が、各々の関数のフーリエ変換の積に等しいという性質を用いて解決できる可能性がある。計測データとローパスフィルタの畳み込み出力として平均曲線が得られるが、これは計測データのフーリエ変換とローパスフィルタのフーリエ変換との積に他ならない。このことから、ローパスフィルタのフーリエ変換は平均曲線のフーリエ変換から計測データのフーリエ変換を除算することで得られそうである。これがローパスフィルタの振幅伝達特性になる。しかし、定義域が無限大のフーリエ変換を有限の離散的フーリエ変換 (DFT) で代用しなければならないため、データ端におけるリングングなど離散的フーリエ変換特有の問題¹⁰⁾への対応が不可欠となり、計算方法の確立が必要である。

そこで本論文では、高速 M 推定法を用いたロバストガウシアンフィルタの振幅伝達特性を算出し、ガウシアンフィルタの振幅伝達特性と一致するか検証する。以下、第 2 章では高速 M 推定法型ロバストガウシアンフィルタについて概説し、第 3 章では離散的フーリエ変換を用いた振幅伝達特性の計算方法について述べる。第 4 章で実験を行い、第 5 章で全体をまとめる。

2. 高速 M 推定法を用いたロバストガウシアンフィルタ

2.1 ロバストガウシアンフィルタへの高速 M 推定の応用

N 個の計測データを $z_i = f(x_i)$ とする。誤差は z 方向に広がるので、 z 軸を Δz 間隔で離散化することにより高速 M 推定法が適用できる。まず、データに対し x 方向に 1 次元のガウシアンフィルタを畳み込み、各格子点に度数を累積する。続いて z 方向に、基本幅 $T = m\Delta z$ の 1 次元の 2 次 B スプライン基底関数を畳み込んで 2 次 B スプライン曲線を得る。 m は基本幅分割数である。この曲線の頂点が x_i における高速 M 推定の出力値となる。なお、 z 方向への 2 次 B スプライン基底関数の畳み込みは基本幅分割数 m の幅をもつ矩形フィルタの 3 回連続適用で代用でき、高速処理が可能である。

2.2 セル間投票による離散化誤差の低減

高速 M 推定を用いたロバストガウシアンフィルタの計算精度は、 z 軸の離散化誤差に大きく依存する。ガウシアンフィルタの振幅伝達特性の一致度を検証する際、この離散化誤差が影響する可能性は大きい。この問題を防ぐため、セル間投票による高精度化法を用いる¹¹⁾。これは、投票する重みがセルと同じ大きさをもつと考え、 z 値に最も近いセルと隣接するセルに占める

Fig. 1 Vote to cell and cell

各々の面積比率に応じて、重みを分散して投票する方法である (図 1)。

3. 離散的フーリエ変換を用いた振幅伝達特性の計算

3.1 基本的な計算モデル

N 個の計測データを $z_i = f(x_i)$ 、離散化されたローパスフィルタの重み関数を $l(x_i), f(x_i)$ に重み関数を畳み込んで得られる出力の平均曲線を $h(x_i)$ とする。

$$h(x_i) = \sum f(x_k) l(x_i - x_k) = (f \otimes l)(x_i) \quad (1)$$

ここで、 $f(x_i), l(x_i), h(x_i)$ の離散的フーリエ変換を各々 $\tilde{F}(u_k), \tilde{L}(u_k), \tilde{H}(u_k)$ とすると次式が成立する。ただし、 $u_k = k/N$ とする。

$$\tilde{H}(u_k) = \tilde{F}(u_k) \tilde{L}(u_k) \quad (2)$$

これより、ローパスフィルタの振幅伝達関数 $\tilde{L}(u_k)$ は次式で与えられる。

$$\tilde{L}(u_k) = \frac{\tilde{H}(u_k)}{\tilde{F}(u_k)} \quad (3)$$

3.2 振幅伝達特性計算のための条件

ここでは λc 幅のガウシアンフィルタを例に、式(3)の手法を用いて振幅伝達特性を計算するための条件を見出す。

Fig. 2 Test data $f(x_i)$

Fig. 3 Discrete Fourier transform of GFs and theoretical GF

図 2 は、なめらかなベース曲線に三角波とランダムデータを加えて生成した 200 点の計測データ $f(x_i)$ 、およびこれにガウシアンフィルタ $l(x_i)$ を適用して得られた平均曲線 $h(x_i)$ である。なめらかな曲線の波長や位相を変えた (a)~(c) の 3 つのケースで振幅伝達率 $\tilde{L}(u_k)$ を計算し、式(4)に示す理論上のガウシアンフィルタの振幅伝達率 $\tilde{G}(u_k)$ ¹²⁾ と比較する。

$$\tilde{G}(u_k) = \exp^{-2\sigma^2\pi^2 u_k^2} = \exp^{-\log 2 \lambda_c^2 u_k^2} \quad (4)$$

図 2(a) のケース A はベース曲線を正弦曲線の一部とし、図 2(b) のケース B は区間の両端で高さが等しい放物線をベース曲線とした場合、図 2(c) のケース C は区間の両端で高さと傾きが等しい 2 次 B スプライン曲線をベース曲線として用いた場合である。

図 3(a) は図 5 の 3 つのケースで計算した各々のガウシアンフィルタの離散的フーリエ変換で、横軸が空間周波数、縦軸が振幅伝達率、すなわちスペクトルの大きさである。また、図 3(b) に各ガウシアンフィルタと理論的ガウシアンフィルタとの各々の離散的フーリエ変換の偏差を示す。ケース A では理論的ガウシアンフィルタとは非常に大きな誤差がある。ベース曲線の区間の両端の高さが等しいケース B では、誤差はかなり小さくなり 10^{-1} から 10^{-2} となった。一方、ベース曲線の区間の両端の高さと傾きを一致させたケース C では、理論的ガウシアンフィルタの振幅伝達特性が最大でも 10^{-2} 程度の誤差に収まった。

本来なら、3 つのケースとも式(3)から振幅伝達特性を精度よく計算できるはずであるが、ケース(a)では離散的フーリエ変換に不自然な振動をもたらすデータ端の段差の影響が、ケース(b)

では区間データを繰り返し並べた際にデータ端でなめらかに接続できない影響が誤差の要因になったと考えられる。ケース(c)ではベース曲線の区間端の高さと傾きの両方とも等しいため、式(3)から得られる振幅伝達特性はほぼ理論的ガウシアンフィルタの特性に一致した。ただ、離散的フーリエ変換の性質からみると、三角波や振幅の大きいランダムデータも誤差の要因であり、これらの改善を行えばさらに理論的ガウシアンフィルタの振幅伝達特性に近づけることができると思われる。

3.3 計測データの与え方

振幅伝達特性を計算するための計測データは、上記 3.2 に留意して設計したなめらかなベース曲線に小さな振幅のランダムデータを加えて求める。おおまかにはこのベース曲線を平均曲線、ランダムデータを粗さ成分とみなすことができる。そこで、以下の式(5)のように点対称で、データの両端で関数値および 1 次微分係数が一致する 2 次 B スプライン関数をベース曲線とする。ただし、 L を評価長さ、 C を振幅に関する定数とする。

$$z = \begin{cases} -C\left(x - \frac{1}{4}L\right)^2 + \frac{CL^2}{16} & (0 \leq x \leq \frac{L}{2}) \\ C\left(x - \frac{3}{4}L\right)^2 - \frac{CL^2}{16} & (\frac{L}{2} < x \leq L) \end{cases} \quad (5)$$

4. 実験

高速 M 推定を用いたロバストガウシアンフィルタの振幅伝達特性を求めるための実験を行う。図 4 に示す評価長さが $L=4\text{mm}$ の断面曲線 $f(x_i)$ は、式(5)からなる振幅 $25\mu\text{m}$ の周期関数をベース

Fig. 4 Case D: Test data (Primary profile)

Fig. 5 Deviation of discrete Fourier transform compared with theoretical GF

Fig. 6 Output of the Low-pass filters (No outlier)

Fig. 7 Deviation of mean line compared with the Gaussian filter (Fig. 6)

曲線として、これに最大 $1\mu\text{m}$ のランダムデータを加えたものである。データ数は $N=200$ 点で、図 2 の 3 つのケースの改善版としてケース D とする。ガウシアンフィルタの幅とカットオフ値はともに $\lambda_c=0.8\text{mm}$ である。

図 5 に図 4 のデータ $f(x_i)$ を式(3)に適用して得られた離散的フーリエ変換と理論的ガウシアンフィルタの離散的フーリエ変換との偏差、およびフィルタ幅 λ_c のガウシアンフィルタと理論的ガウシアンフィルタとの各々の離散的フーリエ変換の偏差とを示す。2 つの偏差は最大でも 10^{-2} と高精度で、しかも一致した。このことから、図 4 の断面曲線 $f(x_i)$ は式(3)を用いて振幅伝達特性を求めることが可能なデータであることが確かめられた。

4.1 ガウシアンフィルタ出力との比較

高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタの z 方向の離散化間隔を $\Delta z=4\mu\text{m}$ とし、基本幅分割数パラメータを $m=7, 9, 11$ とした。 m を奇数としたのは、2 次 B スプライン基底関数を推定関数とするフィルタの左右対称性を保つためである。また、高精度化のためセル間投票を用いた。

図 6 は、図 4 のデータに高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタを適用したものである。 $m=7, 9, 11$ のいずれの場合も、 λ_c 幅のガウシアンフィルタ出力とほぼ一致した。その偏差を図 7 に示す。最も大きな偏差は $m=7$ の場合で、その時でさえも最大で $0.06\mu\text{m}$ と小さかった。

図 6 の全区間における、高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタ出力とガウシアンフィルタ出力との誤差を表 1 に示す。 $m=7$ のとき RMSE は $2.30 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ で、RMSE を評価長さ L における最大高さ R_y で割った比率も 1.07% と小さかった。同様に、 $m=9$ とすると RMSE が $1.22 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ 、 R_y に対する誤差 RMSE の

Table 1 Filtering error

m	7	9	11
RMSE μm	2.30×10^{-2}	1.22×10^{-3}	0
RMSE/ R_y %	1.07	0.057	0

(a) $m=7$

(b) $m=9$

(c) $m=11$

Fig. 8 Transmission characteristic of the fast M-estimation type

比率も 0.057% と一段と小さくなった。さらに、 $m=11$ では RMSE および R_y に対する誤差 RMSE の比率も 0% となり、ガウシアンフィルタの出力と厳密に一致した。なお、 R_y は $2.14\mu\text{m}$ であった。

4.2 振幅伝達特性の算出

図 8 は、図 6 の計測データ $f(x_i)$ と高速 M 推定型ガウシアンフィルタ $l(x_i)$ 、平均曲線 $h(x_i)$ の結果を基に、式(3)により振幅伝達特

Table 2 Transmission ratio at cut-off wave length λ_c

Filter	Fast M-estimation type			GF
Remarks	$m=7$	$m=9$	$m=11$	Filter size λ_c
Transmission ratio	0.5044	0.5090	0.5085	0.5085

性を算出した結果である。データ数 $N=200$ 点の離散的フーリエ変換 $\tilde{F}(u_k), \tilde{L}(u_k), \tilde{H}(u_k)$ の計算は Chirp-Z 変換¹²⁾ を用いた。横軸はカットオフ値 λ_c に対する空間周波数の比率で対数軸、縦軸は振幅伝達率である。

図 8(a)は $m=7$ の場合である。全体的には理論的ガウシアンフィルタの振幅伝達特性に類似しているものの、短波長域の特性がガウシアンフィルタと異なる。ただ、表 2 に示すように、カットオフ値 λ_c における振幅伝達率が 0.5044 とガウシアンフィルタの振幅伝達特性にほぼ一致すること、 λ_c よりも長波長の帯域でもほぼ一致することがわかる。

図 8(b)は $m=9$ の場合である。低波長域の一部の特性がガウシアンフィルタと異なる点を除けばほぼ一致する。カットオフ値 λ_c における振幅伝達率も、フィルタ幅 λ_c のガウシアンフィルタの振幅伝達率とほぼ等しい 0.5090 であった (表 2)。

図 8(c)は $m=11$ の場合である。全波長域で振幅伝達率が理論的ガウシアンフィルタとほぼ一致した。カットオフ値 λ_c における振幅伝達率も、フィルタ幅 λ_c のガウシアンフィルタの振幅伝達率と等しい 0.5085 であった (表 2)。振幅伝達率は理論的ガウシアンフィルタとは若干差異があるが、カットオフ値 λ_c のガウシアンフィルタの振幅伝達特性とは一致する可能性がある。そこで、理論的ガウシアンフィルタおよび λ_c 幅のガウシアンフィルタの振幅伝達率との偏差を調べ図 9 に示した。理論的ガウシアンフィルタの振幅伝達率との偏差は λ_c 幅のガウシアンフィルタの場合と同じで、最大 1% であった。一方、 λ_c 幅のガウシアンフィルタの振幅伝達率との偏差は 10^{-3} %未満と小さく、高精度に一致することが示された。このような一致は、高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタの計算ステップにおいて、 λ_c 幅のガウシアンフィルタを最初に適用するために生じる。もしも $1.5\lambda_c$ から $2\lambda_c$ 幅のガウシアンフィルタを適用すれば、高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタの振幅伝達特性は、理論的ガウシアンフィルタの振幅伝達特性と高精度に一致することになる。

4.3 基本幅分割数の影響

基本幅分割数 m は、 z 軸の離散化と大きく関連する。 z 軸上に累積された重みの分布幅が m 以下であれば、高速 M 推定を適用

Fig. 9 Deviation of transmission characteristic between the fast M-estimation type ($m=11$) and Gaussian Filter

するデータがすべて基本幅の中に入るので、出力は必ずガウシアンフィルタと一致する。それは、データのばらつき範囲が 2 次 B スプライン基底関数の基本幅内におさまる、実質 2 次関数として扱うことができるためである。本実験では、図 4 で用いた計測データを $\Delta z=4\mu\text{m}$ で分割した場合に、重みの分布幅が $m=11$ 以下となった。このため、 $m=11$ のときに、 λ_c 幅のガウシアンフィルタの振幅伝達特性と高精度に一致した。

4.4 ロバスト性の確認

高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタの振幅伝達特性がガウシアンフィルタとほぼ一致することが確かめられたが、ここでは外れ値のあるデータに対するロバスト性を確認する。

図 10 は図 6 の計測データ $f(x_i)$ の $x=1.14\text{mm}$ の位置に人為的な外れ値を設定し、これに λ_c 幅のガウシアンフィルタ $g(x_i)$ および高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタ $l(x_i)$ の両方を適用した。基本幅分割数を $m=7$ とする。ガウシアンフィルタの出力と高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタとの出力の偏差を図 11 に示す。

$x=1.14\text{mm}$ の前後 $\pm 0.4\text{mm}$ の範囲では、高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタの出力はガウシアンフィルタの出力と大きく異なる。これは、ガウシアンフィルタでは 1 つの外れ値によって $\lambda_c=0.8\text{mm}$ のフィルタ幅の分だけ出力に影響が及ぶためである。これに対し高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタでは外れ値の影響がないので、フィルタ幅の区間で偏差が大きくなる。一方、それ以外の区間では高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタの出力はガウシアンフィルタの出力とほぼ一致

Fig. 10 Output of the Low-pass filters (An outlier) **Fig. 11** Deviation of mean line compared with the Gaussian filter (Fig. 10)

Table 3 Filtering error

m	7	9	11
RMSE μm	2.58×10^{-2}	1.37×10^{-3}	0

Fig. 12 Output of the Low-pass filters (Outliers)

Fig. 13 Deviation of mean line compared with the Gaussian filter (Fig. 12)

する。この区間におけるガウシアンフィルタ出力と高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタ出力との誤差を表 3 に示す。RMSE は $2.58 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ と小さかった。同様に、 $m=9$ の場合で実験すると RMSE が $1.37 \times 10^{-3} \mu\text{m}$ となり一段と小さくなった。さらに、 $m=11$ では RMSE が $0 \mu\text{m}$ となり、ガウシアンフィルタ出力と厳密に一致した。

図 12 は、評価長さが $L=4\text{mm}$ 、データ数が $N=400$ 、からなるステンレス工具表面の断面曲線 $f(x_i)$ である。カットオフ波長 $\lambda_c=0.8\text{mm}$ のガウシアンフィルタ $g(x_i)$ および高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタ $l(x_i)$ の両方を適用した。基本幅分割数を $m=7$ とする。ガウシアンフィルタの出力と高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタとの出力の偏差を図 13 に示す。外れ値が存在する箇所では出力 $l(x_i)$ はロバストにふるまい、外れ値が存在しないと思われる箇所ではガウシアンフィルタの出力にほぼ一致することが実データでも確かめられた。なお、測定区間の前半部分ではガウシアンフィルタとの出力誤差が観測されたが、これは区間の前半に外れ値ほどではないが大きな変動があり、ここでもロバストにふるまったためと考えられる。

5. 結 言

高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタの振幅伝達特性を、離散的フーリエ変換を用いて計算する方法を確立した。これに

より高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタが、計測現場で求められていた外れ値に対してはロバストにふるまい、外れ値のないデータに対してはガウシアンフィルタと同じ出力を与えるフィルタである事が確かめられた。

実験では以下のことが明らかになった。高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタの基本幅分割数が $m=11$ のとき、振幅伝達特性が λ_c 幅のガウシアンフィルタと高精度に一致した。 λ_c 幅のガウシアンフィルタ出力との偏差も 0 であった。理論的ガウシアンフィルタの振幅伝達特性とは若干差異があるが、これは計算のステップで、 λ_c 幅のガウシアンフィルタを用いることによる。従って、もしも $1.5\lambda_c$ から $2\lambda_c$ 幅のガウシアンフィルタの使用が許されるならば、理論的ガウシアンフィルタの振幅伝達特性にも高精度に一致することになる。一方、外れ値があるデータに対してはロバストにふるまうことが確かめられた。

基本幅分割数を $m=9, 7$ と小さくするにつれ、高速 M 推定型ロバストガウシアンフィルタの振幅伝達特性とガウシアンフィルタの振幅伝達特性との一致性は崩れたが、大まかな特性までは崩れず、実際のガウシアンフィルタ出力との偏差もごくわずかなのであることが確かめられた。基本幅分割数 m は、大きい方がガウシアンフィルタとの一致性は増すが、計算量が大きくなれば、外れ値がある際のロバスト性が低下してしまうので、どのように定めるかが課題となる。しかし、同じような表面性状をもつ材料では、事前に z 軸上に累積された重みの分布幅から基本幅分割数 m を決めておくことで、同一材料であればガウシアンフィルタと等しい振幅伝達特性となることが期待できる。

本研究は、JSPS 科研費 23560271 の助成によって行われた。研究を遂行するにあたり、貴重な意見を賜った長岡技術科学大学柳和久教授に謝意を表す。

参 考 文 献

- 1) 柳和久, 原精一郎: ISO での「製品の幾何特性仕様: 表面性状」に呼応して, 精密工学会誌, **69**, 8 (2003) 1057.
- 2) 吉田一郎: 表面粗さ—その測定方法と規格に関して—, 精密工学会誌, **78**, 4 (2012) 301.
- 3) 原精一郎, 笹島和幸, 牛島尊之: 3 次元表面微細形状測定データにおける異常値の処理, 2005 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2005) 109.
- 4) S. Brinkmann, H. Bodschinna and H.-W. Lemke: Assessing roughness in three-dimensions using Gaussian regression filtering, International J. of Machine Tools & Manufacture, **41**, 13, (2001) 2153.
- 5) M. Krystek: Form filtering by splines, Measurement, **18**, 1, (1969) 9.
- 6) T. Goto, J. Miyakura, K. Umeda, S. Kadowaki and K. Yanagi: A Robust Spline Filter on the basis of L_2 -norm, Precision Engineering, **29**, (2005) 157.
- 7) 沼田宗敏, 藤原孝幸, 舟橋琢磨, 興水大和, 神谷和秀, 野村俊: 高速 M 推定を用いたロバストガウシアンフィルタの提案, 精密工学会誌, **76**, 6 (2010) 684.
- 8) ISO 11562, Geometrical product specifications (GPS) — Surface Texture: Profile method — Metrological characteristics of phase correct filters, 1996.
- 9) ISO 16610, Geometrical product specifications (GPS) — Filtration— Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters, 2011.
- 10) 中村周: フーリエ解析, 朝倉書店, (2003) 29.
- 11) 沼田宗敏, 興水大和: 高速 M 推定を用いたロバストガウシアンフィルタの高精度化, 2011 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, (2011) 821.
- 12) Munetoshi Numada, Takashi Nomura, Kazuhide Kamiya, Hatsuzo Tashiro, Hiroyasu Koshimizu: Filter with variable transmission characteristics for determination of three-dimensional roughness, Precision Engineering, **30**, (2006) 431.