

平成 30 年 6 月 21 日現在

機関番号：33908

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05880

研究課題名(和文) 表面粗さ用ローパスフィルタの振幅伝達特性と位相補償特性の計算方法開発

研究課題名(英文) Development of calculation method of transmission characteristics and phase correct characteristics of low-pass filter for surface roughness

研究代表者

沼田 宗敏 (NUMADA, Munetoshi)

中京大学・工学部・教授

研究者番号：00554924

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：表面粗さ計測の現場で使用されるローパスフィルタは多くの場合、国際標準であるガウシアンフィルタとは全く異なる結果を与える。このような不一致の要因は、ローパスフィルタの2つの重要な特性である振幅伝達特性と位相補償特性を検証すれば明らかになる。しかし、エンド効果やデータの両端の不連続性などから、実際の測定データを用いてこれらの特性を計算することは不可能である。この問題を解決するために、せん断、点对称拡張、周期的伸長を用いたローパスフィルタ処理の方法を提案した。エンド効果や両端の不連続性の影響を受けずに、実際のデータから振幅伝送特性と位相補償特性の計算を行うことができた。

研究成果の概要(英文)：Low pass filters used at the site of surface roughness measurement often give totally different results from international standard Gaussian filters. The cause of such inconsistency becomes clear by examining the two important characteristics of the low-pass filter, the transmission characteristics and the phase correct characteristics. However, it is not possible to calculate these characteristics from actual measurement data owing to the end effect and the discontinuity at each end of the data, etc.

To address these problems, this research proposed a method for the low-pass filter processing that uses shearing, point symmetric extension, and periodic extension, and produced no end effect but allows the transmission characteristics and phase correct characteristics to be obtained.

研究分野：計測工学

キーワード：機械計測 表面粗さ

1. 研究開始当初の背景

表面粗さ計測の現場では、数十年にわたりガウシアンフィルタが用いられローパスフィルタの業界標準となっている。このガウシアンフィルタはデータの境界近傍で歪を生じること、また異常値の影響を受けやすいことから、その対策として2つの境界条件型ローパスフィルタ (M. Krystek 1996, S. Brinkmann 2001) と2つのロバスト型ローパスフィルタ (S. Brinkmann 2001, T. Goto 2005) が考案されている。しかし、これらのフィルタの出力がガウシアンフィルタの出力と大幅に異なることが現場で指摘され始めている。ローパスフィルタの最も重要な特性は振幅伝達特性と位相補償特性である。ほとんどのローパスフィルタのこれらの特性は論文や ISO 規格で示されているが、それは理想条件下で達成されるだけであり、実測データに対しどのように振る舞うかはこれまで明らかにされてこなかった。特に 2011 年にガウシアンフィルタ (ISO16610-21: 2011) が国際規格となり、フィルタ特性の詳細が規定されると、にわかにガウシアンフィルタとその他のローパスフィルタのフィルタ特性の違いに注目が集まるようになった。しかし、実測データにガウシアンフィルタを適用し、その出力と入力との比のフーリエ変換から振幅伝達特性を計算すると図 1 のようになり、本来のガウシアンフィルタの振幅伝達特性とは大きく異なる結果が得られる。他のローパスフィルタも同様であるため、実測データに対するローパスフィルタの振幅伝達特性をガウシアンフィルタの振幅伝達特性と比較しようとしてもできなかった。このため、従来型ガウシアンフィルタを長年にわたり使い続けてきた計測現場では大きな混乱が起きている。

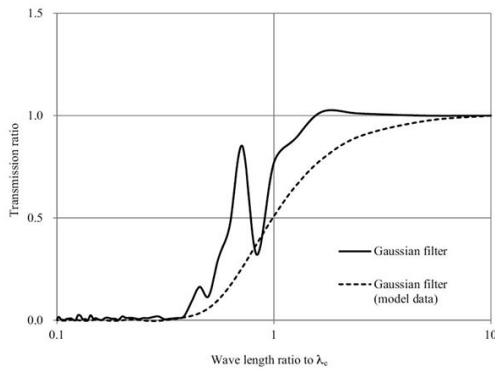


図1 実データから従来方で計算したガウシアンフィルタの振幅伝達特性

これに対し研究代表者は、実測データを点対称に拡張しせん断を行う点対称拡張法を提案し、境界条件を解消した。また、境界条件のない点対称な理想データを作り、この特殊条件下で高速 M 推定型ガウシアンフィルタの振幅伝達特性を計算した。この手法をさらに発展させ、点対称拡張法を適用し境界条件を取り除くことで、実測データから振幅伝

達特性と位相補償特性を計算することができると期待できる。

2. 研究の目的

本研究は特殊条件下における振幅伝達特性計算方法を発展させ、実測データに点対称拡張法を適用することにより、ローパスフィルタのフィルタ特性である振幅伝達特性と位相補償特性の計算方法構築を目指す。研究では以下のことを明らかにする。

- 1) 実測データを用いたガウシアンフィルタのフィルタ特性計算方法
- 2) 実測データを用いた境界条件型ローパスフィルタのフィルタ特性計算方法
- 3) 実測データを用いたロバスト型ローパスフィルタのフィルタ特性計算方法

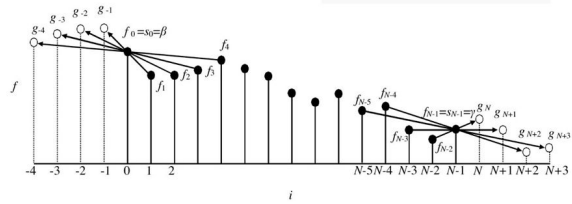


図2 点対称拡張

3. 研究の方法

実測データを用いたローパスフィルタの振幅伝達特性と位相補償特性の計算方法を構築するため、本研究では以下の研究項目を設定する。

- 1) 点対称拡張法を用いて実測データの境界条件を取り除く (図2)。特に、ローパスフィルタの型別に点対称拡張の基準点が異なるので、基準点の計算方法を確立する。
- 2) 実測データとフィルタ出力双方の離散的フーリエ変換から振幅伝達特性を計算する方法を開発する。

① 理論データを用いた振幅伝達特性の計算方法

② 実測データを用いた振幅伝達特性の計算方法

3) 上記離散的フーリエ変換から位相補償特性の計算方法を開発する。

4. 研究成果

1) 点対称拡張法を用いて、実測データの境界条件を取り除く。特に、ローパスフィルタの型別に点対称拡張の基準点が異なるので、これらの基準点  $(\beta, \gamma)$  を正しく計算できる計算式の導出に成功した。

$$\beta = \frac{-\sum_{i=0}^r \left\{ \left( \phi_i + 2 \sum_{k=i+1}^r \phi_k \right) \left( \sum_{k=1}^{r+i} \phi_{k-i} f_k - \sum_{k=1}^{r-i} \phi_{k+i} f_k - f_i \right) + \frac{\mu}{\Delta x^3} T_1 \right\}}{\sum_{i=0}^r \left\{ \left( \phi_i + 2 \sum_{k=i+1}^r \phi_k \right)^2 + \frac{\mu}{\Delta x^3} T_2 \right\}}$$

$$\gamma = \frac{-\sum_{i=0}^r \left\{ \left( \phi_i + 2 \sum_{k=i+1}^r \phi_k \right) \left( \sum_{k=1}^{i+r} \phi_{k-i} f_{N-1-k} - \sum_{k=1}^{r-i} \phi_{i+k} f_{N-1-k} - f_{N-1-i} \right) + \frac{\mu}{\Delta x^3} T_1 \right\}}{\sum_{i=0}^r \left\{ \left( \phi_i + 2 \sum_{k=i+1}^r \phi_k \right)^2 + \frac{\mu}{\Delta x^3} T_2 \right\}}$$

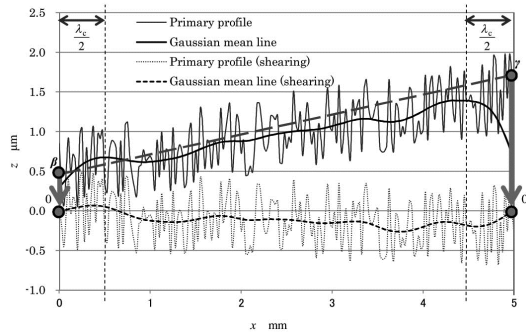


図3 せん断の有無によるガウシアンフィルタの結果の違い

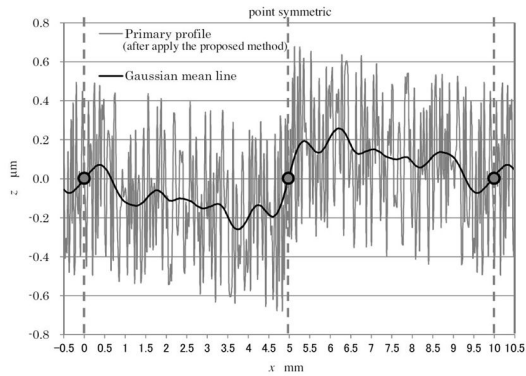


図4 実データに点対称拡張・せん断・周期的伸張を施したガウシアンフィルタ適用結果

① 点対称拡張法を用いた実測データの境界条件の除去法確立：

点対称拡張法は基準点を中心にデータの点対称拡張を行った後、両端の高さが等しくなるようにせん断処理を行う（図3）。ガウシアンフィルタ、スプラインフィルタなどの境界条件型ローパスフィルタ、ロバストフィルタの3種類で、最適の点対称基準の理論値を求め実験で効果を確かめた。

② 振幅伝達特性の高精度計算を妨げている第2の要因の解明：

フィルタ結果にデータ端外側のデータが影響を与えていることを明らかにした。開いた輪郭曲線の出力データには入力データの外側のデータのフィルタリング結果も含まれるため、入力データと出力データとのスペクトルの比から振幅伝達特性を計算すると計算精度が落ちる。このため、入力データを周期的に伸張した上でローパスフィルタを適用しないと、正しく振幅伝達特性を計算できないことが判明した。本研究ではこの有効性を実験で確かめた（図4）。

2) 実測データとフィルタ出力双方の離散的フーリエ変換から振幅伝達特性の計算方法を開発

① 離散的フーリエ変換を用いた振幅伝達特性の計算方法開発：

境界条件のないデータとそのフィルタ出力から各々の離散的フーリエ変換を求め、そのスペクトルの比から振幅伝達特性を計算する。まずは、境界条件のない点対称な理論データをそのまま用いて、各型のローパスフ

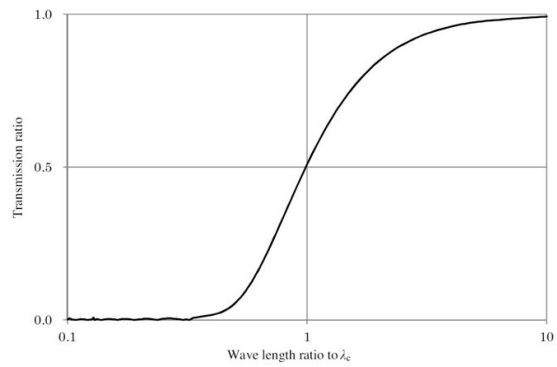


図5 実データから計算したガウシアンフィルタの振幅伝達特性

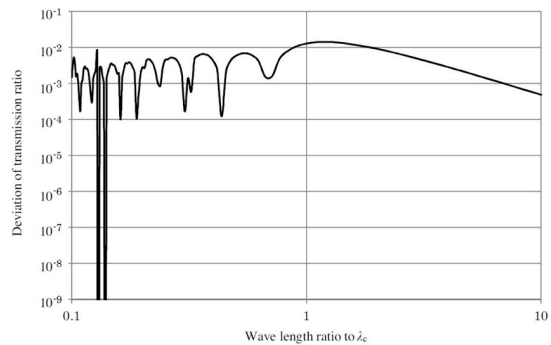


図6 実データで計算したガウシアンフィルタの振幅伝達特性と理論値の差

ィルタの振幅伝達特性を計算した。ガウシアンフィルタでは理論的振幅伝達特性に一致することが確かめられ、境界条件型フィルタの振幅伝達特性およびロバストフィルタの振幅伝達特性では理論的振幅伝達特性に一致しないことが確かめられた。

② 離散的フーリエ変換を用いた振幅伝達特性の計算方法開発／実測データを用いた振幅伝達特性の計算：

点対称拡張法・周期的伸張を用いて境界条件を除去した実測データ（小坂研究所製計測機による）を用いて、各ローパスフィルタの振幅伝達特性を計算した。境界条件型のローパスフィルタ（S. Brinkmann 2001 のガウシアン型 GR0 フィルタ）の振幅伝達特性は理論値と異なるものの、実測データから計算した2つのローパスフィルタ（ガウシアンフィルタ、スプラインフィルタ）の振幅伝達特性は理論値に一致した（図5,6）。なお、境界条件型のスプラインフィルタ（M. Kristek 1996 の非周期スプライン）では点対称拡張処理・周期的伸張処理を施すことで、スプラインフィルタの振幅伝達特性に一致した（図7,8）。この一致により、実測データを用いて振幅伝達特性を計算する本研究の有効性が確かめられた。一方、ロバスト型の2つのローパスフィルタの場合は、理論的振幅伝達特性と一致しなかった（図9）。ロバストフィルタのロバスト性はデータの外れ度合いに応じて変化するためである。これらを実験で検証した。

3) 上記離散的フーリエ変換から位相補償特

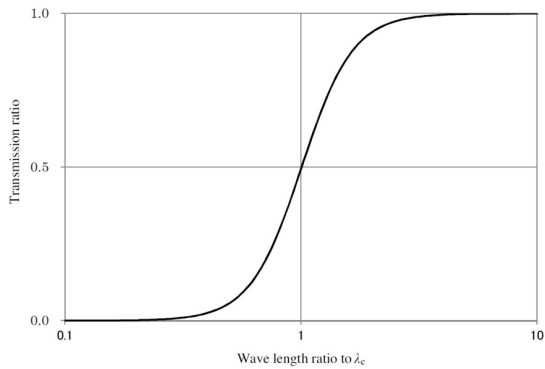


図7 実データで計算のスプラインフィルタ (境界条件型) の振幅伝達特性

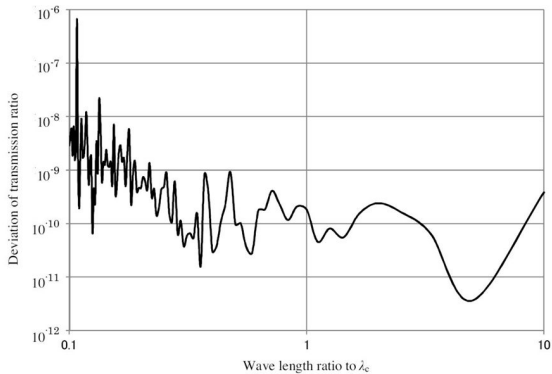


図8 実データから計算したスプラインフィルタ (境界条件型) の振幅伝達特性と理論値の差

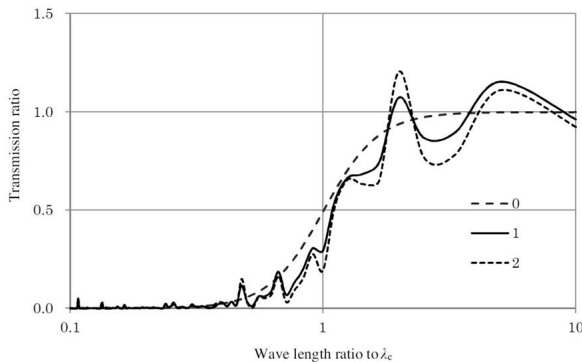


図9 実データから計算したロバストスプラインフィルタ (境界条件型) の振幅伝達特性 (0は理論特性、1,2はロバスト性の違いによる)

性の計算方法を開発した。

① 離散的フーリエ変換を用いた位相補償特性の計算方法開発：

離散的フーリエ変換の実数部と虚数部を用いて位相補償特性を計算する手法を導出し、シミュレーションで有効性を確かめた。

② 離散的フーリエ変換を用いた位相補償特性の計算方法開発における実測データを用いた検証：

小坂研究所製計測機を用いて 10 サンプルの計測データを取得した。これらのデータに対し、ガウシアンフィルタとスプラインフィルタを  $10^\circ$  ずつ遅らせながら適用し、フィルタ出力と実測データの離散的フーリエ変換の基本波および高調波の実数部と虚数部を用いて、位相遅れが正しく検出できるか確かめた。この計算方法によって  $\pm 90^\circ$  の位相遅

れまでは正しく計算できることが確かめられたが、それを超える角度の位相ズレでは離散的フーリエ変換の3倍以上の高調波の実数部と虚数部で、位相遅れが正しく計算できないことが判明した。このため位相計算に用いる逆正接関数の有効範囲を拡張する対策を施し、離散的フーリエ変換の任意の高調波の実数部と虚数部を用いて、任意の位相ズレを検出できることを確認した。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 5 件)

- ① 近藤雄基, 吉田一朗, 沼田宗敏, 奥水大和 : プラトーホーグ面などの機能性表面に有効なロバストフィルタの動向と事例, 砥粒加工学会誌, 査読無, Vol. 61, No. 11, pp. 590-593, (2017. 11).
- ② Yuki Kondo, Munetoshi Numada, Hiroyasu Koshimizu, Kasuhide Kamiya, Ichiro Yoshida, Low-pass filter without the end effect for estimating transmission characteristics -Simultaneous attaining of the end effect problem and guarantee of the transmission characteristics, Precision Engineering, 査読有, Vol. 48, pp. 243-253 (Apr. 2017).
- ③ Yuki Kondo, Munetoshi Numada, Hiroyasu Koshimizu, Kazuhide Kamiya, Ichiro Yoshida, The Filtering Method to Calculate the Transmission Characteristics of the Low-pass Filters Using Actual Measurement Data, 査読有, Precision Engineering, Vol. 44, pp. 55-61, (Apr. 2016).
- ④ 近藤雄基, 沼田宗敏, 奥水大和, 神谷和秀, 吉田一朗 : ロバスト性調整可能な高速 M 推定ガウシアンフィルタ, 精密工学会誌, 査読有, Vol. 82, No. 3 272-277 (2016. 03).
- ⑤ 近藤雄基, 吉田一朗, 沼田宗敏, 奥水大和 : 表面粗さ及び (ロバスト) フィルタの動向, 非破壊検査, 査読無, Vol. 65, No. 6, pp. 243-249, (2016. 06).

[学会発表] (計 11 件)

- ① 近藤雄基, 沼田宗敏, 長谷川英樹, 吉田一朗, 奥水大和 : 回帰型ロバストフィルタと異常値に関する一考察 第 2 報, 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, C02, p. 123-124, 中央大学 (2018. 03).
- ② 長谷川英樹, 近藤雄基, 沼田宗敏, 吉田一朗, 奥水大和 : 振幅伝達特性保持型ロバストスプラインフィルタの提案 (第 2 報), 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, C34, p. 155-156, 中央大学 (2018. 03).

- ③ 長谷川英樹, 近藤雄基, 沼田宗敏, 吉田一朗, 神谷和秀, 奥水大和: 位相補償特性の計算方法 (第 2 報), 2018 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, F65, p. 385-386, 中央大学 (2018. 03).
- ④ 沼田宗敏, 近藤雄基, 長谷川英樹, 吉田一朗, 奥水大和: 回帰型ロバストフィルタと異常値に関する一考察, 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, C21, p. 185-186, 大阪大学 (2017. 09).
- ⑤ 長谷川英樹, 近藤雄基, 沼田宗敏, 吉田一朗, 奥水大和: 振幅伝達特性保持型ロバストスプラインフィルタの提案, 2017 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, C36, p. 199-200, 大阪大学 (2017. 09).
- ⑥ 近藤雄基, 長谷川英樹, 沼田宗敏, 吉田一朗, 神谷和秀, 奥水大和: 位相補償特性の計算方法, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, G37, pp. 505-506, 慶応大学 (2017. 03).
- ⑦ 近藤雄基, 長谷川英樹, 沼田宗敏, 奥水大和, 神谷和秀, 吉田一朗: 振幅伝達特性検証の為にエンド効果のないローパスフィルタ処理の提案—第 3 報: ロバストフィルタに適用した場合—, 2017 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, D16, pp. 259-260, 慶応大学 (2017. 03).
- ⑧ 近藤雄基, 長谷川英樹, 沼田宗敏, 奥水大和, 神谷和秀, 吉田一朗: 振幅伝達特性検証の為にエンド効果のない周期スプラインフィルタの提案, 2016 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, H38, p437-438, 茨城大学 (2016. 09).
- ⑨ 近藤雄基, 長谷川英樹, 沼田宗敏, 奥水大和, 神谷和秀, 吉田一朗: 振幅伝達特性検証の為にエンド効果のないガウシアンフィルタの提案, 2016 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集, A20, pp. 29-30, 東京理科大学 (2016. 03).
- ⑩ Yuki Kondo, Munetoshi Numada, Hiroyasu Koshimizu, Kazuhide Kamiya, Ichiro Yoshida: A Study on The Fast M-estimation Based Gaussian Filter Controllable in Robustness, proc. of the Asia International Symposium on Mechatronics AISM 2015, pp. 258-263, Guilin, China (Oct. 2015).
- ⑪ 近藤雄基, 沼田宗敏, 奥水大和, 神谷和秀, 吉田一朗: 実測データを用いたローパスフィルタの振幅伝達特性 (第 2 報, スプラインフィルタ), 2015 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集, B19, pp. 99-100, 東北大学 (2015. 09).

[その他]  
該当なし

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

沼田宗敏 (NUMADA, Munetoshi)  
中京大学・工学部・教授  
研究者番号: 00554924

- (2) 研究分担者  
該当なし
- (3) 連携研究者  
該当なし
- (4) 研究協力者  
該当なし