

令和 5 年 6 月 20 日現在

機関番号：33908

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2020～2022

課題番号：20K04202

研究課題名(和文) ロバスト性と上位互換性を両立させたスプラインフィルタの研究

研究課題名(英文) A study on spline filter that achieve both robustness and lower compatibility

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) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：スプラインフィルタは計測対象物の両端まで測定できる画期的な粗さ用ローパスフィルタである。さらに異常値の影響を受けないロバストスプラインフィルタは万能フィルタとしてISOの草案となり、世界各国の表面粗さ測定機に次々と搭載された。しかし異常値のない計測データに適用すると標準のスプラインフィルタと全く異なる出力になることが判明し、フィルタの上位互換性の欠如が明らかになった。

そこで本研究では、代表的ローパスフィルタであるガウシアンフィルタで研究代表者らが初めて実現したロバスト性と上位互換性の両立を、スプラインフィルタへ適用するための新しいアルゴリズムを確立し、計測現場における課題を解決した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は研究代表者らが開発したロバスト推定法である高速M推定法を、同じく研究代表者らが考案した畳み込み演算方式のスプラインフィルタに適用する手法である。これによりロバスト性と上位互換性を備えたスプラインフィルタを実現でき、さらにこのフィルタ演算を周波数領域で行うことで高速化した。本研究の遂行により、学術的には逆行列型を含むあらゆるロバストフィルタで上位互換性の保証を可能にできる手法が提案できた。

研究成果の概要(英文)：A spline filter is an epoch-making low-pass filter for roughness that can measure both ends of a measurement object. Furthermore, a robust spline filter, which is not affected by outliers, was drafted by ISO as a universal filter, and was installed one after another in surface roughness measuring machines around the world. However, when applied to measurement data with no anomalies, it was found that the output was completely different from that of a normal spline filter, and the lack of lower compatibility of the filter became apparent.

In this research, we established a new algorithm to apply the compatibility of robustness and lower compatibility, which was first achieved by the principal investigators in the Gaussian filter, a typical low-pass filter, to spline filters, and solved the problem in the field of measurement.

研究分野：機械計測

キーワード：ロバスト性 上位互換性 スプラインフィルタ 表面性状

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

(1) 近年、IT機器や精密機械部品の小型化に伴い、異常値の影響を受けずに計測対象物の両端まで表面粗さを測定したいという需要が高まっている。測定範囲の両端では粗さ用ローパスフィルタの出力にエンド効果と呼ばれる振動が生じるが、スプラインフィルタはこれを回避できる (M. Krystek, Measurement, 1996)。さらに、異常値に対しても頑健なロバストスプラインフィルタは2002年にISO規格の草案となった (ISO/TS16610-32, 2009)。この時から本フィルタは精密部品の粗さ計測に不可欠な万能ツールとなった。しかし本フィルタの上位互換性欠如がその後明らかになり、アルゴリズムの欠陥が指摘されてISO化が見送られた。上位互換が成立しないと産業界における表面粗さ計測の膨大な蓄積データ・ノウハウデータが使用できなくなる。このようにフィルタの非互換により過去の蓄積データの連続性が断たれることは、産業界にとって大きな痛手である。

このような問題に対し研究代表者らは、ロバスト性と上位互換性を両立させた高速M推定型ガウシアンフィルタを提案した。上位互換性のあるフィルタとしてJIS規格の解説書 (JIS B 0634, 2017)でも引用される。しかし、ガウシアンフィルタと演算方式が全く異なるスプラインフィルタでは高速M推定型フィルタを実現できず、ロバスト性と上位互換性の両立は容易ではない。

(2) 高速M推定を適用するフィルタは、重み関数を直接畳み込む演算方式でなければならない。一方、スプラインフィルタは逆行列で計算するフィルタであるため高速M推定法を適用できない。そこで、逆行列型スプラインフィルタの振幅伝達関数をフーリエ逆変換して重み関数を算出し、畳み込み演算型スプラインフィルタを構築した。これに高速M推定法を適用すると、異常値を含むデータに対するロバスト性は十分であった。一方異常値のないデータに適用すると、やはり通常のスプラインフィルタと比べて誤差が大きかったが、これは畳み込み演算型スプラインフィルタがもつ誤差そのものであることも明らかになった。また、処理速度は著しく遅かった。各フィルタの性能を表1に示す。そこで本研究では「畳み込み演算型スプラインフィルタに高速M推定法を適用して発生するスプラインフィルタとの出力間誤差さえ解消すれば、上位互換性が保証できるのではないか」を学術的な問いとして提起した。

表1 粗さ用ローパスフィルタの特性

	種類	上位互換	ロバスト性	エンド効果	高速性
1	スプラインフィルタ	-	×		
2	ロバストスプラインフィルタ	×			
3	畳み込み演算型スプラインフィルタ+高速M推定法	×			×

2. 研究の目的

本研究の目的は研究代表者らが提案した高速 M 推定法を畳み込み演算型スプラインフィルタに適用し、ロバスト性と上位互換性を備えたスプラインフィルタを実現することである。

このため畳み込み演算型スプラインフィルタに高速 M 推定法を適用すると発生する、スプラインフィルタとの出力間誤差の解消を目指す。この誤差は予備実験により、収束が極めて遅い重み関数を有限のフィルタサイズで打ち切るため発生することが判明した。これを解消するには重み関数をフーリエ変換して周波数領域で扱えばよい。スプラインフィルタの重み関数のフーリエ変換は振幅伝達関数として理論的にも与えられており、収束が早く計算誤差が無視できるためである。また、畳み込み演算型スプラインフィルタには処理速度の問題があるが、フーリエ変換を用いて計算するとさらに速度が低下するためその対策も必要である。出力間誤差の低減と高速化のため、以下の通り研究を遂行する (図1)。

(1) 入力データをそのままフーリエ変換すると高周波成分が振動するので、これを防ぐ前処理が必要になる。これを「前処理1」とする。

(2) 逆行列型スプラインフィルタは端点に自然境界条件を適用しエンド効果を解消する。この自然境界条件を「前処理2」として前処理に組み込み、エンド効果を解消する。

(3) 高速 M 推定法の計算の一部を周波数領域で行うことにより高速化する。

(4) 周波数領域における2次元フィルタ高速計算法の確立

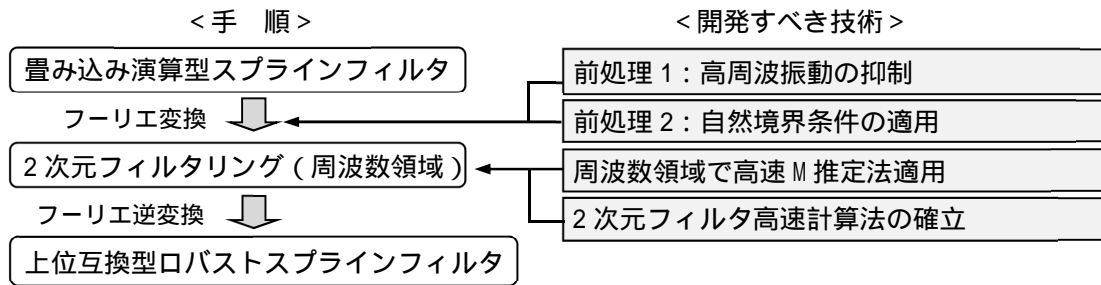


図1 本研究の手順と試行すべき技術

3. 研究の方法

(1) ステップ1 (前処理1: 高周波振動の抑制)

高周波振動を抑制する研究者らが提案した点対称拡張法 (Precision Eng., 2016) をベースに、高周波振動を現在の1%以下に抑える手法を前処理1として構築する。

(2) ステップ2 (前処理2: 自然境界条件の適用)

エンド効果防止のための有効な手法が、データ端でフィルタの重みを可変にする回帰型フィルタである (S.Brinkmann et al., Machine Tools, 2001)。この回帰型フィルタに自然境界条件を適用することで、逆行列型のスプラインフィルタと同じ出力を得る手法を前処理2として適用する。スプラインフィルタの自然境界条件に関する研究業績 (精密工学会誌, 2006) のある研究代表者が担当し、データ端における出力誤差を入力データのPV値に対し0.1%以下に抑える。

(3) ステップ3 (高速M推定法適用: 周波数領域)

高速化を図るため、高速M推定法の損失関数である2次Bスプライン基底関数の畳み込みを周波数領域で行う。この課題をBスプライン基底関数のフーリエ変換に関する研究業績 (精密工学会誌, 2005 など) の豊富な研究代表者が担当する。

(4) ステップ4 (2次元フィルタ高速計算法の確立)

高速M推定法では計測データ $z = s(x)$ を z 軸方向に離散化し、2次元配列 $f(x, z)$ を生成する。また適用する2次元重み関数は、 x 軸方向にスプラインフィルタの重み関数、 z 軸方向に高速M推定法の損失関数である2次Bスプライン基底関数を用いる。従ってフーリエ変換は計算量の大きな2次元フーリエ変換となる。3次元表面粗さ用2次元フィルタの高速計算に関する研究業績 (精密工学会誌, 2015) のある研究代表者らが、高速フーリエ変換 (FFT) をベースにした高速計算法を確立する。(3)と(4)により、従来のロバストスプラインフィルタ (ISO/TS16610-32, 2009) (T. Goto et al., Precis Eng., 2005) と同等の計算速度を目指す。

(5) ステップ5 (上位互換性など4特性の検証: ベンチマークテスト・論文発表)

上位互換性・ロバスト性・エンド効果・高速性の4特性を従来法と比較検証する。上位互換性は従来のスプラインフィルタの出力と比べ、入力データのPV値に対し0.1%以下の偏差を目標とする。そして、研究成果を論文発表する。

4. 研究成果

(1) ステップ1 (前処理1: 高周波振動の抑制)

研究代表者らは高周波振動を抑制する手法として点対称拡張法を提案していたが (Precision Engineering, 2016)、これを前処理1に適用し高周波振動問題を従来の1%以下に抑えた。

(2) ステップ2 (前処理2: 自然境界条件の適用)

エンド効果防止のための有効な手法が、データ端でフィルタの重みを可変にする回帰型フィルタである。この回帰型フィルタに自然境界条件を適用することで、逆行列型のスプラインフィルタと同じ出力を得る手法を前処理2として確立し、FMSF法 (Fast M-estimation spline filter) と命名した。データ端における出力誤差を入力データのPV値に対し0.1%以下に抑えることができた。ステップ2までの理論・実験結果は英文論文に掲載された (Nanomanufacturing and Metrology, 2021年1月)。

(3) ステップ3 (高速M推定法適用: 周波数領域)

高速M推定法の損失関数である2次Bスプライン基底関数の畳み込みを周波数領域で行った。高速化を図るため、この課題をBスプライン基底関数のフーリエ変換に関する研究業績 (精密工学会誌, 2005 など) の豊富な研究代表者が担当した。

(4) ステップ 4 (2次元フィルタ高速計算法の確立)

高速 M 推定法では計測データ $z = s(x)$ を z 軸方向に離散化し、2次元配列 $f(x, z)$ を生成する。また適用する2次元重み関数は、 x 軸方向にスプラインフィルタの重み関数、 z 軸方向に高速 M 推定法の損失関数である2次Bスプライン基底関数を用いる。従ってフーリエ変換は計算量の大きな2次元フーリエ変換となる。3次元表面粗さ用ローパスフィルタの研究で2次元フィルタの高速計算に関する研究業績(精密工学会誌, 2015)のある研究代表者と研究分担者が協力して、高速フーリエ変換(FFT)をベースにした高速計算法を確立した。周波数領域における高速 M 推定適用(ステップ3およびステップ4)を実現し、2020年度の研究成果である FMSF 法(畳み込み演算型&高速 M 推定型ロバストスプラインフィルタ: Nanomanufacturing and Metrology, 2021)と比較して、同等のロバスト性および上位互換性を達成した。

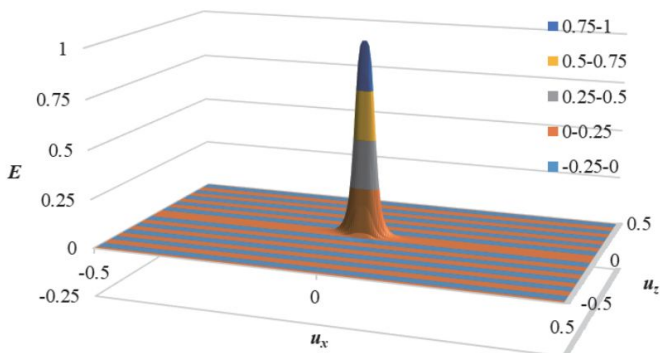


図2 周波数領域型2次元フィルタ

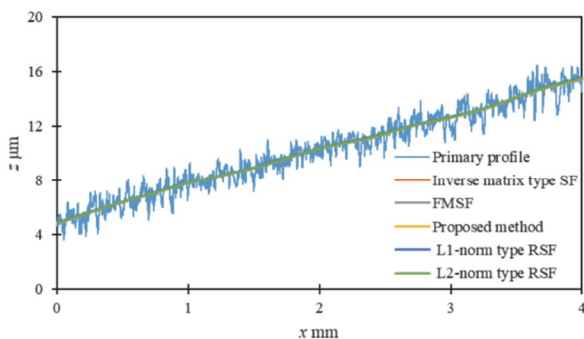


図3 断面曲線(外れ値なし)と各フィルタ出力

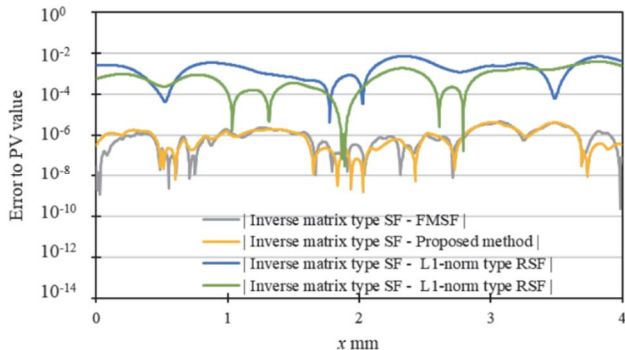


図4 上位互換性検証(図3の誤差/PV値)

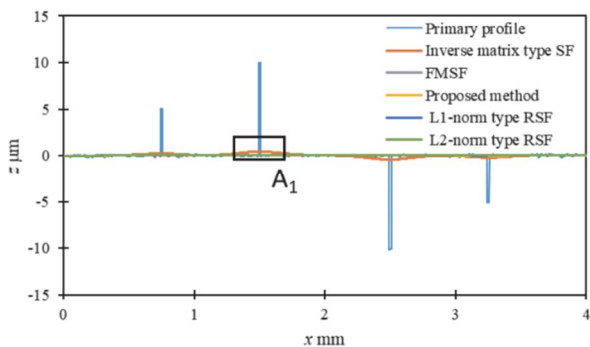


図5 断面曲線(外れ値あり)と各フィルタ出力

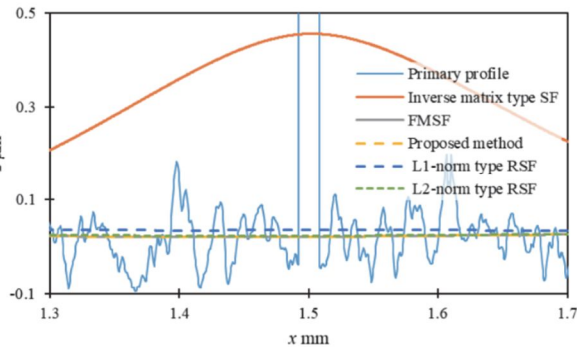


図6 ロバスト性検証(図5のA1部分拡大)

(5) ステップ 5 (上位互換性など4特性の検証: ベンチマークテスト・論文発表)

外れ値のないデータを用いた上位互換性の検証では、従来の逆行列型スプラインフィルタの出力と提案手法の出力間の誤差はPV値に対しわずか1/1000000であることが確かめられた。提案手法の上位互換性に関する誤差は従来のロバストスプラインフィルタと比較しておよそ1/100と小さい(図3-4)。なお外れ値のないデータに対し提案手法の出力は、エンド効果のない従来の逆行列型スプラインフィルタの出力とほぼ一致することから、提案手法にエンド効果が発生しないことも確認できた(図5-6)。高速性については、一般的な計測点数である $N=8000$ 以上では、提案手法が従来のロバストスプラインフィルタに対し20倍以上高速であること、高速化前のFMSF法と比べても6倍以上高速であることが確かめられた。以上の研究により、提案手法がロバスト性と上位互換性を両立させたスプラインフィルタであることが確認できた。ステップ5および全体のまとめは、国内学会誌(精密工学会誌, 2023年2月)に掲載された。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 7件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 3件）

1. 著者名 Yuki Kondo, Ichiro Yoshida, Dan Nakaya, Munetoshi Numada, and Hiroyasu Koshimizu	4. 巻 4
2. 論文標題 Verification of Characteristics of Gaussian Filter Series for Surface Roughness in ISO and Proposal of Filter Selection Guidelines	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomanufacturing and Metrology	6. 最初と最後の頁 97,108
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41871-021-00096-5	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Kondo, Munetoshi Numada, Ichiro Yoshida, Yudai Yamaguchi, Hirokazu Machida, Hiroyasu Koshimizu	4. 巻 181
2. 論文標題 L1-norm Gaussian filter satisfying all three robust examples in ISO16610-30	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Measurement	6. 最初と最後の頁 1,13
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.measurement.2021.109622	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Kondo, Munetoshi Numada, Keiya Takahashi, Ichiro Yoshida, Hiroyasu Koshimizu	4. 巻 4
2. 論文標題 A Proposal of a Spline Filter that Achieves Both Robustness and Lower Compatibility	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Nanomanufacturing and Metrology	6. 最初と最後の頁 77,85
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1007/s41871-020-00092-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 近藤雄基, 吉田一朗, 沼田宗敏, 興水大和	4. 巻 86
2. 論文標題 高速M推定ガウシアンフィルタM推定型ガウシアンフィルタとガウシアンフィルタの特性を応用した外れ値の検出・除去と粗さ評価	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 778,783
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.2493/jjspe.86.778	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Kondo, Munetoshi Numada, Ichiro Yoshida, Yudai Yamaguchi, Hirokazu Machida and Hiroyasu Koshimizu	4. 巻 76
2. 論文標題 Robust filter compatible with Gaussian Filter using L2-Norm	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Precision Engineering	6. 最初と最後の頁 124,132
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.precisioneng.2022.03.012	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 外山正道, 近藤雄基, 吉田一朗, 沼田宗敏, 神谷和秀, 興水大和	4. 巻 89
2. 論文標題 周波数領域法による高速ロバストスプラインフィルタの開発	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 精密工学会誌	6. 最初と最後の頁 207,212
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.2493/jjspe.89.207	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuki Kondo, Ichiro Yoshida, Munetoshi Numada, Hiroyasu Koshimizu, Ryo Saito and Kaito Fujiyoshi	4. 巻 13
2. 論文標題 Verification of Characteristics of Spline Filter Series Robust Filters for Surface Roughness and Proposal of Filter Selection Guidelines	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Sciences	6. 最初と最後の頁 1,12
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.3390/app13063390	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 沼田宗敏, 近藤雄基	4. 巻 67
2. 論文標題 表面性状評価用スプラインフィルタの最新動向	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 トライボロジスト	6. 最初と最後の頁 751,757
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.18914/tribologist.67.11_751	査読の有無 無
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計7件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 外山正道, 近藤雄基, 椿浩也, 沼田宗敏, 奥水大和
2. 発表標題 ロバースプラインフィルタ周波数型2次元フィルタ高速計算法開発 (第2報)
3. 学会等名 精密工学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 鷲見昇太郎, 沼田宗敏, 近藤雄基
2. 発表標題 L1ノルムを用いた外れ値に対応可能なロバースプラインフィルタの提案
3. 学会等名 精密工学会秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 外山正道, 近藤雄基, 椿浩也, 沼田宗敏, 奥水大和
2. 発表標題 ロバースプラインフィルタ周波数型2次元フィルタ高速計算法開発 (第3報)
3. 学会等名 精密工学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 鷲見昇太郎, 近藤雄基, 吉田一郎, 沼田宗敏, 神谷和秀, 奥水大和
2. 発表標題 L1ノルムを用いた外れ値に対応可能なロバースプラインフィルタの高精度化
3. 学会等名 精密工学会秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 椿浩也, 沼田宗敏, 近藤雄基, 吉田一朗, 奥水大和
2. 発表標題 ロバーストスプラインフィルタの周波数型2次元フィルタ高速計算法開発
3. 学会等名 精密工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 近藤雄基, 山口雄大, 吉田一朗, 沼田宗敏, 椿浩也, 奥水大和
2. 発表標題 離散型L2ノルムロバーストフィルタのカット幅の検証
3. 学会等名 精密工学会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 高橋溪也, 沼田宗敏, 近藤雄基, 吉田一朗, 奥水大和
2. 発表標題 高速M推定を用いたロバーストスプラインフィルタの考察 第2報
3. 学会等名 精密工学会
4. 発表年 2020年

〔図書〕 計1件

1. 著者名 近藤雄基, 沼田宗敏, 吉田一朗	4. 発行年 2023年
2. 出版社 リフレ出版 / 東京図書出版	5. 総ページ数 150
3. 書名 表面性状用ローパスフィルタの数理	

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分 担 者	近藤 雄基 (Kondo Yuki) (90835878)	第一工科大学・工学部・専任講師 (37702)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関