

# ロバストガウシアン回帰フィルタの高速化と有効性の検討

## Speed-up and Effectiveness of Robust Gaussian Regression Filters

岩手大・院（学）\*千葉 大輔

岩手大・学（非）大久保 美咲

岩手大・理工（正）内館 道正

Daisuke Chiba, Misaki Okubo, Michimasa Uchidate

Iwate University

### 1. 諸言

表面粗さは製品の品質や機械効率、寿命を左右する重要な要素であり、評価にはフィルタ処理が不可欠である。ISO 16610 シリーズでは、標準的なガウシアンフィルタや異常値に強いロバストガウシアン回帰フィルタ（Robust Gaussian Regression Filter : RGRF）が規定されている。特に二層構造表面では RGRF の有効性が指摘されているが、処理時間の長さや従来のダブルガウシアンフィルタ（Double Gaussian Filter : DGF）との出力差が課題である。そこで本研究では、計算方法の改良による RGRF の高速化を図るとともに、DGF との出力結果およびパラメータの比較を通じて、その有効性を検証する。

### 2. 理論

ガウシアンフィルタ（Gaussian Filter : GF）は線形フィルタであり、以下の畳み込み積分により定義される<sup>1)</sup>。

$$w(x) = \int_{-\infty}^{\infty} s(x - \mu)z(\mu)d\mu = (z * s)(x) \quad (1)$$

ここで、 $w(x)$ は出力されるうねり曲線、 $z(x)$ は元の表面形状測定データ、 $s(x)$ はガウス重み関数である。

GF の形状追従性の弱さを補うために導入されたのがガウシアン回帰フィルタ（Gaussian Regression Filter : GRF）であり、多項式回帰により測定データにより適合した近似を行う点に特徴がある。GRF は以下の最小化問題として定義される。

$$E(k) = \sum_{p=0}^{n-1} \{(z(p) - w(k))^2 S_{MOD}(k, p) \Delta_x\} \rightarrow Min. \quad (2)$$

ここで、 $z(p)$ は $p$ 番目の測定値、 $w(k)$ は長波長成分、 $S_{MOD}(k, p)$ は位置 $k$ に対して定義されるガウス重み関数、 $\Delta_x$ はサンプリング間隔である。2 次の GRF の  $w(k)$ は 2 次の多項式 $A(k)[x(k, p)]^2 + B(k)x(k, p) + C(k)$ と置く。ここで、 $A(k)$ 、 $B(k)$ 、 $C(k)$ は位置 $k$ によって決まる定数である。

RGRF は GRF を拡張し、M 推定法を導入することで外れ値の影響を抑制するロバスト性を備えたフィルタである。RGRF は以下のように定式化される<sup>2)</sup>。

$$E(k) = \sum_{p=0}^{n-1} \{(z(p) - w(k))^2 \delta(p, k) S_{MOD}(k, p) \Delta_x\} \rightarrow Min \quad (3)$$

ここで、 $\delta(p, k)$ は重み因子であり、外れ値に対する影響を抑制する役割を持つ。重み因子は、出力 $w(k)$ と入力 $z(p)$ との乖離が大きい点に小さな値を与えることで、その点が回帰式に与える影響を抑えるよう設計されている。

RGRF の計算は反復的な最適化で構成される。Figure.1 に RGRF の概略図を示す。(1)注目するデータ点とその近傍にガウス重み関数 $S_{MOD}$ を適用。(2)初期の重み因子を一律に設定した上でデータ点に適用。(3)2 次回帰曲線による近似を行い、最小 2 乗誤差の最適化を実施し、これらをすべての点で行う。(4)得られた出力と元の入力との誤差に基づき重み因子 $\delta(p, k)$ を更新する。この処理を繰り返し、収束条件を満たすまで更新を続けることで、外れ値の影響を抑えることができる。

### 3. RGRF の高速化

本研究では、「Computational Surface and Roundness Metrology」<sup>2)</sup>に記載された手法を参考にして、RGRF を実装した。この手法では、重み付けの際に演算対象が全領域に及ぶうえ、各データ点ごとに行列計算を行って 2 次回帰の係数 $A(k)$ 、 $B(k)$ 、 $C(k)$ を逐次導出するため、計算コストが高く、処理時間を要するという課題がある。

RGRF の高速化の一環として、重み関数に打ち切り定数 $L_c$ を導入し、計算範囲を必要最小限に限定した。これにより、重みが一定と

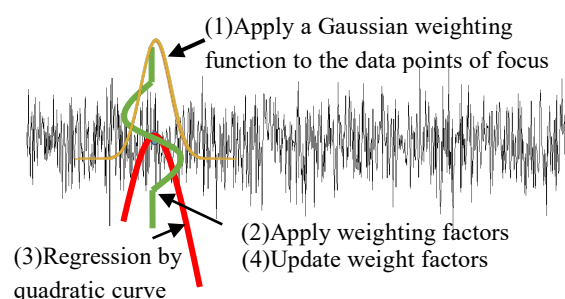


Fig. 1 Schematic diagram of RGRF.

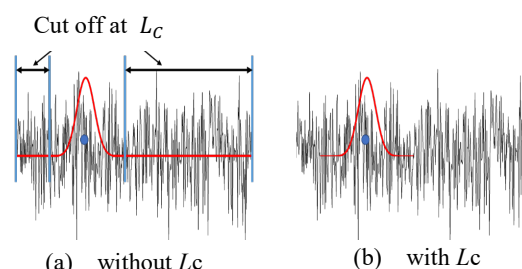


Fig.2 Comparison of profiles with and without

なる領域の不要な演算を省き、処理効率を向上させた。Figure.2 に、打ち切り定数による重み関数の変化を示す。

さらに、ガウス重みが位置によらず一定である中央部の領域に限り、ベクトル化により中央部の行列計算を一括処理可能な形に再構築した。

#### 4. 比較方法

RGRF と DGF の出力差を比較するために、粗さ曲線の視覚的比較に加え、二層構造表面から得られるパラメータに着目して評価を行う。対象とする表面は、浅いプラトー領域と深い谷部から構成されるものであり、このような表面に対しては、Figure.3 に示すような、プラトーおよび谷部の特性を個別に評価できるパラメータが有効である。そこで、プラトー領域の傾きを示す  $R_{pq}$ 、谷部の傾きである  $R_{vq}$ 、およびプラトー部と谷部の境界の指標となる  $R_{mq}$  を採用し、RGRF および DGF の粗さ曲線から算出を行い、両者を数値的に比較した。

本研究ではポリッシング加工表面(Rubert 社製標準片)を使用した。処理速度の評価も同じ表面を使用し、条件はデータ点 17,000、サンプリング間隔  $0.1\ \mu\text{m}$ 、カットオフ波長  $2.5\ \text{mm}$  とした。計算には、1th Gen Intel(R) Core(TM) i5-11400 CPU 2.60GHz、メモリ 16GB の PC を使用し、Python で自作したプログラミングを用いてそれぞれ 10 回の平均をとった。

#### 5. 結果

##### 5.1 処理速度

打ち切り定数  $L_c$  を設定しない場合の処理時間は約 241 s であったのに対し、打ち切り定数を設定した場合には約 42.5 s となり、中央部に対する行列演算のベクトル化により、約 16.1 s となった。処理時間はおよそ 1/15 にまで短縮された。

##### 5.2 粗さ曲線

RGRF と DGF の出力の比較を Figure.4 に示す。RGRF は DGF に比べて谷部の影響が抑えられているため、元の断面曲線の特徴がよく残っていた。一方、DGF は谷部の影響を受けているため、プラトー部分の盛り上がりが見られた。

##### 5.3 表面性状パラメータ

負荷曲線を Figure.5 に、パラメータを Table 1 に示す。粗さ曲線同様、あまり差は見られないが、RGRF の負荷曲線は谷部で急激に立ち上がり、微細な凹凸を反映した材料率の変化が確認できた。一方、DGF の負荷曲線はより滑らかで、谷部や突起が平均化されていた。

DGF と比較して、RGRF では  $R_{pq}$  が約 6.6% 増加し、プラトー領域の傾きがわずかに急であることが示された。また、 $R_{vq}$  は約 19% 増加し、谷部の勾配がより顕著である。 $R_{mq}$  は 3.0% 増加し、全体として負荷長さ率がやや大きい傾向を示す。

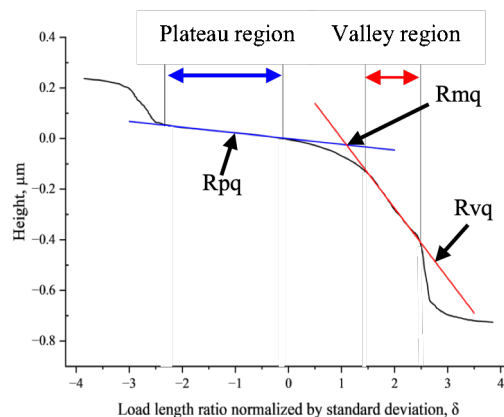


Fig. 3 Material probability curve and surface texture parameters.

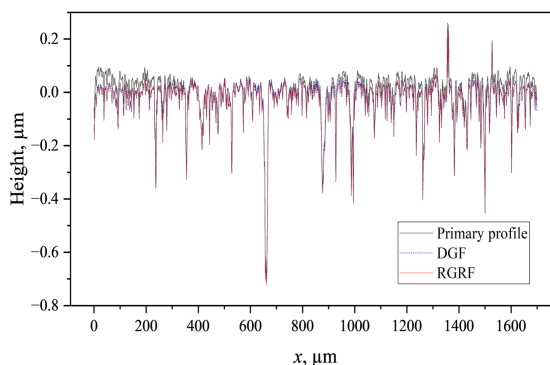


Fig. 4 RGRF and DGF roughness profiles

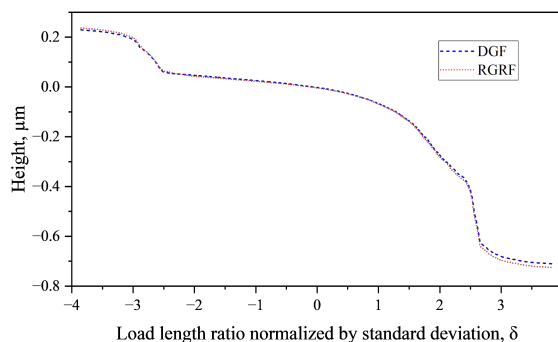


Fig. 5 RGRF and DGF Material probability curve

Table1 Surface texture parameters using DGF and RGRF.

	$R_{pq} [\mu\text{m}]$	$R_{vq} [\mu\text{m}]$	$R_{mq} [\%]$
DGF	0.0212	0.231	83.7
RGRF	0.0226	0.276	86.3

#### 6. 考察

RGRF は粗さ曲線において微細な凹凸を保持し、負荷曲線でも谷部の急峻な立ち上がりが確認された。また、パラメータ比較においても  $R_{pq}$ 、 $R_{vq}$ 、 $R_{mq}$  すべてで DGF を上回っている。これらの結果から、RGRF は DGF に比べて加工面の実態を忠実に捉え、摩擦・摩耗などの機能的評価に有用であると考えられる。一方、DGF は全体の傾向を滑らかに示し、計算アルゴリズムが簡便で高速処理が可能である為、簡易評価に適している。

#### 文献

- 1) M. Krystek, A fast Gauss filtering algorithm for roughness measurements, Precision Engineering, 19, 2-3 (1996) 198-200.
- 2) B. Muralikrishnan and J. Raja, Computational Surface and Roundness Metrology, Springer (2009) 90.