

新しい信号処理を用いた粗さ曲線の決定法

伊藤俊治^{*1}、水野和康^{*1}、松崎 洋^{*2}

Definition of Surface Roughness Curve by Using New Signal Processing

Shunji ITO, Kazuyasu MIZUNO and Yoh MATSUZAKI

Technical Consulting Division, AITEC^{*1} Owari Regional Office^{*2}

表面粗さとうねりを分離する方法として、従来のガウシアンフィルタ、ドベッシーウェーブレット、リフティングスキーム、ジャンの方法を比較検討した。粗さ試料面としては旋削面、研削面、放電加工面を選択した。その結果、これらの中では、ドベッシーウェーブレットと従来のガウシアンフィルタが有望であることが分かった。また、表面粗さの大きさ、平均波長、複雑さを変数とする関数を構成し、関数値からウェーブレット変換の多重解像度解析におけるレベルを設定する方法を考案した。この方法によれば、従来のガウシアンフィルタ（カットオフ値 $c: 0.8\text{mm}$ ）よりも、推定精度が十数%向上することが分かった。

1. はじめに

粗さ曲線は、JISによればカットオフ値 c の高域フィルタによって、断面曲線から長波長成分を遮断して得るとされ、フィルタとしては位相補償型のガウシアンフィルタを用いると規格化されている。

一方、最近の信号処理の発達は目覚ましく、例えば、ウェーブレット変換によれば、不連続信号の抽出、あるいは除去も可能になった。この手法は、1980年頃にモレーにより提案されたものであるが、第1世代とされるドベッシーウェーブレット¹⁾、1994年スウェルデンにより発表され第2世代に位置づけられるリフティングスキーム²⁾などがある。

一般に、ウェーブレット変換では、第1世代、第2世代とも、変動する信号は任意のレベルまで解像度の低下した系列データと、レベル0から任意のレベルに至るまでのウェーブレット成分の和で表現できる。さらに、信号を1から任意のレベルJまでのJ個の解像度、すなわち多重の解像度で解析することを多重解像度解析と呼び、特定のレベルの解像度信号を全てゼロと設定した後、ウェーブレット逆変換するとフィルタとしても使用できることが知られている。チェン³⁾、ジャン⁴⁾らは表面粗さ測定のうちうねり除去にウェーブレット変換による多重解像度解析の適用を試みている。しかし、レベル設定の方法には言及していない。

本研究では、断面曲線からうねりを除去し、粗さ曲線を導出するフィルタとして、従来のガウシアンフィルタ、

ドベッシーウェーブレット、リフティングスキーム、ジャンの方法を比較検討した。さらに、ウェーブレット変換の多重解像度解析を適用するときのレベル設定の方法、及び表面粗さの大きさ、平均波長、複雑さを基準とする新しいカットオフ値 c の決定方法を提案した。

2. 各種うねりの除去性能の比較

粗さ曲線とうねり曲線は、どちらかが推定されれば、断面曲線からこれを除去することによって他方が求まる関係にある。そこで、断面曲線から、うねり曲線を除去し、粗さ曲線を求める手法として、ガウシアンフィルタ、ドベッシーウェーブレット、リフティングスキーム、ジャンの4方法を比較した。

2.1 段差うねりの除去性能

うねり曲線として、評価長さ2.56mm、サンプリング点数2048で、その中央箇所において、高さ1の段差を持つ離散的なステップ曲線を考えた。また、粗さ曲線として、振幅1、山数25の正弦波を想定し、両者を加算した図1に示すような断面曲線を仮想した。これらの仮想断面曲線に4方法を適用し、うねり除去性能を比較した。

ガウシアンフィルタはローパスフィルタの一種なので、直接、うねり曲線を推定できるが、ウェーブレット変換の場合には、先ず多重解像度解析を用いた方法で粗さ曲線を推定し、これを断面曲線から除去することによって、うねり曲線を求めた。

各種手法で求めた推定うねり曲線を図2に表す。(a)は $c=0.8\text{mm}$ のガウシアンフィルタの結果である。本

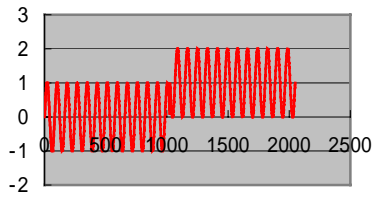


図1 仮想した断面曲線

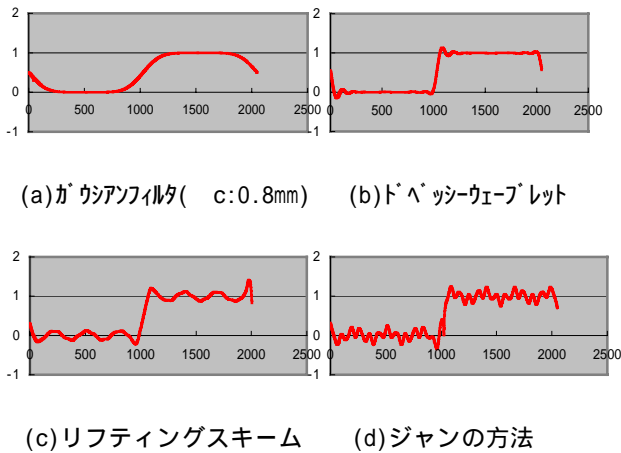
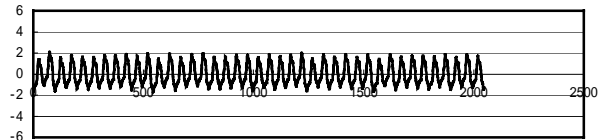


図2 推定うねり曲線

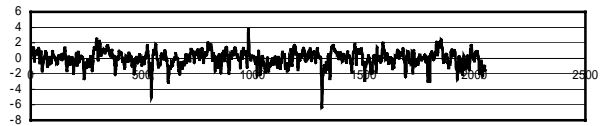
来の段差箇所がなだらかな傾斜に変化している。これは、短波長成分が遮断されることから、当然である。(b)はレベル6の解像度信号を全てゼロと設定した後、逆変換したドベッシーウェーブレットの結果である。シャープな段差を示し、ハンチングも少ない。(c)はレベル6のリフティングスキームの結果であり、リップルが認められる。(d)はレベル6のジャンの方法の結果であり、波長の短いリップルがある。この結果からドベッシーウェーブレットが段差などの不連続成分を抽出する性能において優れていることが分かる。

2.2 旋削、研削、放電加工面の粗さ曲線に対するうねり除去性能

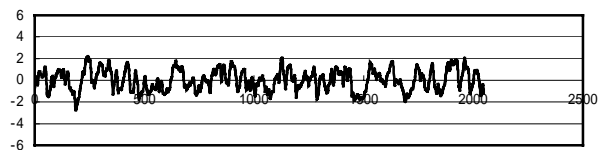
実加工試料面として、旋削面、研削面、放電加工面を選択し、触針式の粗さ計によって、ガウシアンフィルタの $c: 0.8\text{mm}$ の条件で、粗さ曲線を測定した。使用した粗さ計は、サンプリング間隔を任意に設定できないので、ここではサンプリング間隔を $1.25\ \mu\text{m}$ 、評価長さを 2.56mm とした。粗さ曲線のサンプリングデータを定数倍することによって rms を 1 に調整したものを、正規化曲線と呼ぶ。各種試料の正規化曲線を図3に示す。そして、ステップ高さ $0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ の4種の段差、及び振幅が $0.25, 0.5$ で波長が $0.64, 1.28, 2.56, 5.12\text{mm}$ の8種の正弦波からなる合計12種の曲線をうねり曲線として、正規化曲線のそれぞれに加え、36本の加算曲線



(a) 旋削面



(b) 研削面



(c) 放電加工面

図3 正規化曲線(横軸はサンプリング番号)

を作成した。

これらの加算曲線群に4方法を適用し、うねりの除去性能を比較検討した。

ウェーブレット変換により、前述したように加算曲線を特定のレベルまで多重解像度解析し、スケーリング係数をゼロに設定した後、逆変換することで、うねりを除去し³⁾⁴⁾、正規化曲線を推定した。そして、この推定曲線と図3の正規化曲線との合致度を下式から求め、合致度を合計した。

$$\text{合致度} = \{ (E_i - G_i)^2 / N \}^{0.5}$$

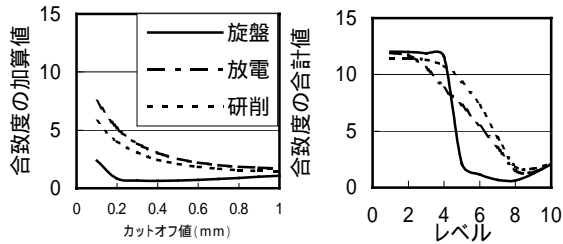
i : サンプリング番号 N : サンプリング点数

E_i, G_i : 推定曲線、正規化曲線のサンプリング値

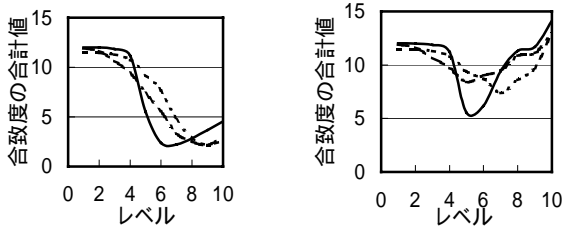
その結果を図4に示す。図4(a)では、横軸を c とし、ガウシアンフィルタを適用したときの合致度の合計値を縦軸に示す。図4(b)(c)(d)は、横軸を多重解像度解析のレベルとし、ドベッシーウェーブレット、リフティングスキーム、ジャンの方法を適用したときの合致度の合計値を表す。図中、実線、破線、一点鎖線は、それぞれ旋削面、研削面、放電加工面をベースとした加算曲線群への適用結果を示す。合致度の合計値が小さいほど推定精度がよいと言えるから、同図からガウシアンフィルタとドベッシーウェーブレットが有望である。

3. 多重解像度解析のレベル設定方法

ウェーブレット変換を用いたうねり除去³⁾⁴⁾では、多重解像度解析のレベルを決定するプラットフォームが確立さ



(a) ガウシアンフィルタ (b) ドベッシーウェーブレット



(c) リフトオフスキーム (d) ジャンの方法

図4 合致度の合計値

表1 測定試料

旋削加工面1	研削加工面1	α-βエンドミル加工面1	普通紙	発書表紙1	コートキップ
旋削加工面2	研削加工面2	α-βエンドミル加工面2	光沢紙	発書表紙2	刃物側面
旋削加工面3	研削加工面3	エンドミル側面加工面	ガムテープ	発書表紙3	
旋削加工面4	研削加工面4	皮革1	段ボール紙	発書表紙4	
旋削加工面5	研削加工面5	皮革2	本の表紙	発書表紙5	
旋削加工面6	フライス加工面1	フロッピーディスク	名刺	メジャーケース	
放電加工面1	フライス加工面2	圧延板1	かた加工の木面1	葉1	
放電加工面2	フライス加工面3	圧延板2	かた加工の木面2	葉2	
放電加工面3	フライス加工面4	鋳物表面	かた加工の木面3	葉3	
放電加工面4	エンドミル正面加工面2	鋳鉄表面	細加工の木面4	葉4	
放電加工面5	エンドミル正面加工面3	リソグラフ	細加工の木面5	スラング	
エンドミル正面加工面1	エンドミル正面加工面4	側面	木箱の木面	塗装面	

れていない。そこで、このレベル設定の方法を検討した。

まず、表1に示す各種加工法で創製された材料の62種の表面を、触針式粗さ計によって前述と同じ条件で測定した。ただし、評価長さは2.56、5.12mmの2種類とした。そして、得られた粗さ曲線から正規化曲線を作成した後、12種のうねり曲線を加えて、744×2本の加算曲線を作った。ドベッシーウェーブレットによるうねり除去では、多重解像度解析の全レベルを選択し、それぞれにおける推定曲線と正規化曲線との合致度を、正規化曲線ごとに合計した。ここでは、この合計値を最小とするレベルを最適レベルと定義する。

また、表面粗さを特徴づけるものは、大きさ、平均波長、複雑さであるとの新しい観点から多重解像度解析のレベルを設定した。ここでは、ターケンスの埋め込み理論により、曲線から相関次元⁵(埋め込み次元10とした。)を計算し、複雑さを表す数値とした。

まず、正規化曲線のRa(算術平均粗さ)、Sm(平均波長)、So(相関次元)を予め計算した。そして、これら3変数から構成される下式の関数f(Ra, Sm, So)から、多重解像度解析のレベルを決めた。

表2 ドベッシーウェーブレット用パラメータ値

測定長さ	A1	A2	B1	B2	C1	C2	D
2.56mm	34.0845	-0.0528	27.25	0.0195	4.41E-06	6.16993	-55.462
5.12mm	28.3961	-0.0792	6.5453	0.0743	3.01E-06	6.63166	-29.32

$$f(Ra, Sm, So) = A_1 Ra^{A_2} + B_1 Sm^{B_2} + C_1 So^{C_2} + D \quad (1)$$

関数のパラメータA₁、A₂、B₁、B₂、C₁、C₂、Dは最適レベルと関数値との差の2乗和を最小にするように準ニュートン法で求めた。(1)式から算出される値の小数点以下第1位を四捨五入して、準最適なレベルを得た。評価長さ2.56、5.12mmの場合、パラメータ値は表2のとおりであった。また、最適レベルと準最適レベルとの相関係数を算出したところ、約0.7~0.8であった。

前述した62種類の正規化曲線(評価長さ2.56、5.12mm)のRa、Sm、Soを予め求め、これらの値を(1)式に代入して準最適レベルを求め、加算曲線群に対してドベッシーウェーブレットの多重解像度解析を行った。そして、スケリング係数をゼロ設定した後、逆変換することで正規化曲線を推定した。その結果、この方式による合致度の合計値は、従来のガウシアンフィルタ(c:0.8mm)を使用した場合よりも、平均で約17~20%低減することが分かった。

また、表1と同じ試料の異なった場所を測定し、新規62種類の粗さ曲線(評価長さ2.56、5.12mm)を得た後、表2と同じパラメータ値で、(1)式から準最適レベルを求めた。そして、前述と同じ方法でうねりを除去したところ、正規化曲線と推定曲線との合致度の合計値は、平均で約12~17%低減した。これらの低減率を図5に示す。同図から、粗さ曲線とうねりを分離する方法として、ドベッシーウェーブレットが有効であることが分かった。

4. ガウシアンフィルタのカットオフ値

従来、粗さ用フィルタ(ガウシアンフィルタ)のcは、表面粗さの大きさに応じて、0.08、0.25、0.8、2.5mmと段階的に決定されている。本稿では、粗さ曲線の特徴づけるものは、大きさ、平均波長、複雑さに分類できるとの観点から、新たなcの決定方法について検討した。

3章と同じ744×2本の加算曲線に対して、ガウシアンフィルタを適用した。cは0.1~3.0まで0.1とびに設定し、全てのcにおける推定曲線と正規化曲線との合致度を、正規化曲線ごとに合計した。ここでも、この合計値を最小とするcを最適cと定義する。

正規化曲線のRa(算術平均粗さ)、Sm(平均波長)、So(相関次元)を予め計算し、次式の関数g(Ra, Sm, So)からc'を決定した。

$$c' = g(Ra, Sm, So) = E_1 Ra^{E_2} + F_1 Sm^{F_2} + G_1 So^{G_2} \quad (2)$$

関数のパラメータE₁、E₂、F₁、F₂、G₁、G₂は最適cと関数値c'との差の2乗和を最小にするように準ニュ

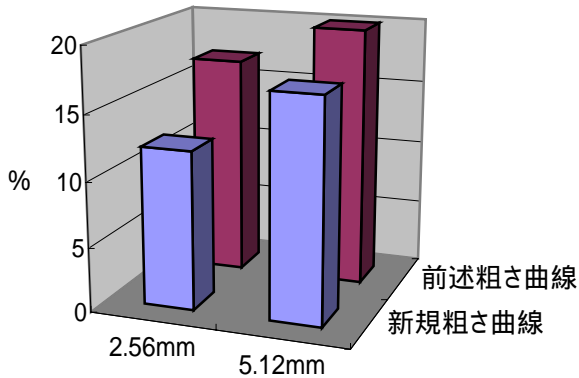


図5 ドベッシーウェーブレットによる低減率

表3 ガウシアンフィルタ用パラメータ値

測定長さ	E1	E2	F1	F2	G1	G2
2.56mm	30.947	-0.0785	0.64467	0.25228	-32.45	-0.0025
5.12mm	18.034	-0.1007	0.51231	0.28198	-19.47	-0.0143

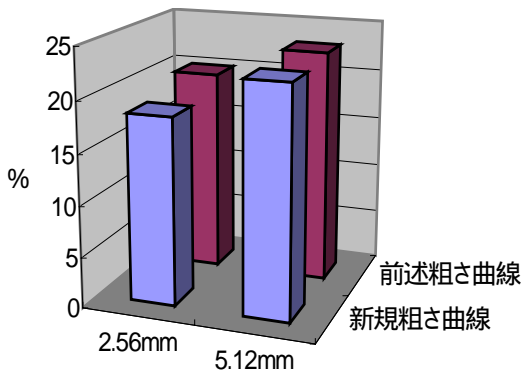


図6 関数値 c による低減率

ートン法で求めたので、関数値 c' は準最適 c と言える。評価長さ 2.56、5.12mm について、得られたパラメータ値を表3に示す。最適 c と準最適 c との相関係数は約 0.7~0.8 であった。

前述した 62 種類の正規化曲線(評価長さ 2.56、5.12mm) の Ra、Sm、So の値を(2)式に代入して準最適 c を求

め、加算曲線群に対してガウシアンフィルタを適用した。その結果、合致度の合計値は、 $c=0.8\text{mm}$ の場合よりも平均で 20~23%低減した。

また、別途の新規 62 種類の粗さ曲線(評価長さ 2.56、5.12mm) に対して、表3と同じパラメータ値で(2)式から、準最適 c を求めた。この条件でガウシアンフィルタを適用したところ、正規化曲線と推定曲線との合致度の合計値は、 $c=0.8\text{mm}$ の場合よりも平均で 18~23%低減した。これらの低減率を図6に示す。同図から、大きさ、平均波長、複雑さで構成される関数値から c を決定する方法が、従来の c の設定方法よりも、推定精度において優れていると言える。

5. 結び

粗さ曲線の検出にウェーブレット変換の多重解像度解析を適用する場合におけるレベル設定の方法、及び、ガウシアンフィルタのカットオフ値の新たな決定方法を提案した。実測断面曲線に基づいたシミュレーションにおいて、これらの推定精度は、従来法より十数%以上向上した。

離散的ウェーブレット変換では、サンプリング点数が $2^n (n=1,2,3,\dots)$ に限られること、及び、使用した触針式粗さ計では、サンプリング間隔を任意に設定できないことから、サンプリング間隔と評価長さの検討は、十分でなかった。しかし、マルチレート信号処理⁶⁾によれば、サンプリング点数の制約と所望の評価長さの獲得を両立させることは可能であると思われる。鏡面粗さへの適用と合わせて今後の検討課題である。

文献

- 1) 中野宏毅：ウェーブレットによる信号処理と画像処理,(1999)共立出版
- 2) W.Sweldens：Technical report, Univercity of South Carolina(1994)
- 3) Q.Chen：Precision Engineering, 23, 209(1999)
- 4) X.Q.Jiang：Precision Engineering, 25, 83(2001)
- 5) 長谷川ほか：精密工学会誌, 60(10), 1460(1994)
- 6) P.Vaidyanathan：マルチレート信号処理とフィルタバンク, (2002)科学技術出版