

# 博士学位論文

## 「ロバストな三次元表面性状用 高速 $M$ 推定ガウシアンフィルタの研究」

指導教員 沼田 宗敏 教授

中京大学 情報学研究科 情報認知科学専攻

学籍番号 H11402D

氏名 近藤 雄基

# 目 次

## 第 1 章 序 論

1.1 研究の背景 .....	1
1.2 表面粗さの評価方法とローパスフィルタ .....	4
1.3 ガウシアンフィルタの問題点 .....	6
1.4 ISO16610-31 : Gaussian regression filters .....	8
1.5 高速 M 推定法を用いたロバストガウシアンフィルタ ...	10
1.6 研究の目的 .....	13

## 第 2 章 FMGF の概要

2.1 FMGF の処理手順 .....	16
2.2 量子化ガウシアンフィルタ .....	21
2.3 FMGF のガウシアンフィルタ特性一致理論的根拠 .....	25
2.4 FMGF のロバスト性 .....	27

## 第 3 章 振幅伝達特性検証方法の開発

3.1 一般的な振幅伝達特性の求め方 .....	33
3.2 提案手法 .....	35
3.3 モデルデータを用いた実験 .....	36
3.4 実計測データを用いた実験 .....	42
3.5 振幅伝達特性検証方法の開発まとめ .....	45

## 第 4 章 FMGF の三次元表面性状対応

4.1 1 次元 FMGF をそのまま適用した場合 .....	46
4.2 三次元表面性状用 FMGF の提案 .....	52
4.3 三次元表面性状用 FMGF 実験概要 .....	56
4.4 外れ値の含まれる場合（出力ベース） .....	57
4.5 外れ値の含まれる場合（振幅伝達特性ベース） .....	60

4.6	外れ値が含まれない場合（出力ベース） .....	64
4.7	外れ値が含まれない場合（振幅伝達特性ベース） .....	67
4.8	ロバスト性を発揮した際の三次元表面性状用フィルタの 振幅伝達特性の特徴検証概要 .....	70
4.9	外れ値がない場合の ISO 16610-31[GRF]の振幅伝達特性 .....	71
4.10	外れ値がある場合の ISO 16610-31[GRF]の振幅伝達特性 .....	73
4.11	FMGF の三次元表面性状対応まとめ .....	75
 <b>第 5 章 FMGF のロバスト性強化</b>		
5.1	FMGF のロバスト性調整新手法 .....	77
5.2	ロバスト性検証実験概要 .....	80
5.3	FMGF のロバスト性の方が低い場合 .....	82
5.4	FMGF のロバスト性の方が高い場合 .....	89
5.5	ロバスト性改良 FMGF の処理時間検証実験 .....	93
5.6	ロバスト性改良 FMGF まとめ .....	96
 <b>第 6 章 まとめ</b>		
6.1	研究成果のまとめ .....	98
6.2	成果の波及効果，技術分野産業現場への福音 .....	100
6.3	残された課題と将来展望 .....	102
 <b>謝 辞</b> .....		103
 <b>参考文献</b> .....		105
<b>関連文献</b> .....		110
<b>その他の業績</b> .....		113

---

---

# 第 1 章

# 序 論

---

---

## 1.1 研究の背景

表面粗さ測定は製品の品質評価のみならず製造工程管理や製造装置の状態把握，研究開発などにおいて不可欠な測定である[1-3]．工業製品出荷では，この表面粗さの抜き取り検査が必須となっており，非常に重要な測定である．

表面粗さの評価を行なうためには，まず表面粗さ測定機にて被測定面の一断面を測定する．表面粗さ測定機には接触式（図 1.1）[4-9]と非接触式[10-13]がある．接触式は針を測定物に接触させて高さを計測する方式で，高精度だが高速性には難がある．また，触針式で鏡面を計測すると，低測定力の測定機でも目に見える傷がついてしまう問題がある．非接触式は主に光学式となる．高速だが精度は接触式に比べ難がある．

こうして得られた表面粗さの測定データだが，そのままでは粗さの評価は行なうことができない．何故ならば，測定データには粗さ以外の成分が含まれているためである．表面粗さの評価方法は ISO, JIS 規格に定められている．図 1.2 のように，被測定面の一断面を



測定して得られたデジタル形式の曲線・断面曲線を基にデジタルフィルタ処理を行ない平均線を導出する．なお，その際のフィルタ幅は図 1.3 のように  $\lambda_c$  で打ち切って処理を行なう．こうして求められた平均線の成分は，粗さより大きな形状・形体成分となる．そして，断面曲線から平均線を引いて粗さ以外の成分を取り除く．そうして残った粗さ成分のみである粗さ曲線を用いて，統計演算や統計パラメータ化[14]を行ない粗さを評価する．なお，統計パラメータには粗さの平均値をとる算術平均粗さ  $Ra$  等がある．図 1.4 はアルミ板 2 種とその断面曲線， $Ra$  の値の例である．同じアルミ板でも，研磨・仕上がりによって粗さは変わる．なお，本論文は，その際のデジタルフィルタ処理の部分の研究である．

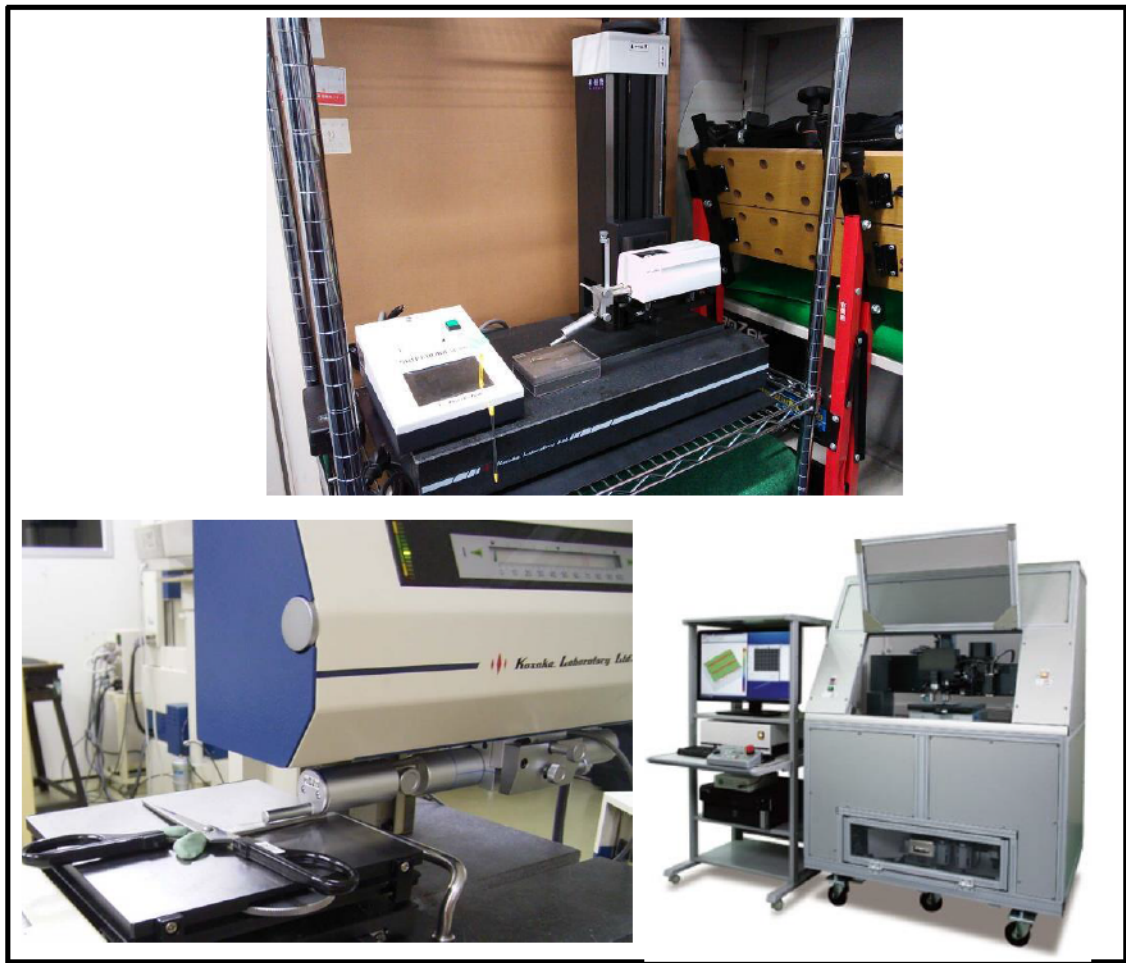


図 1.1 表面粗さ測定機（触針式）

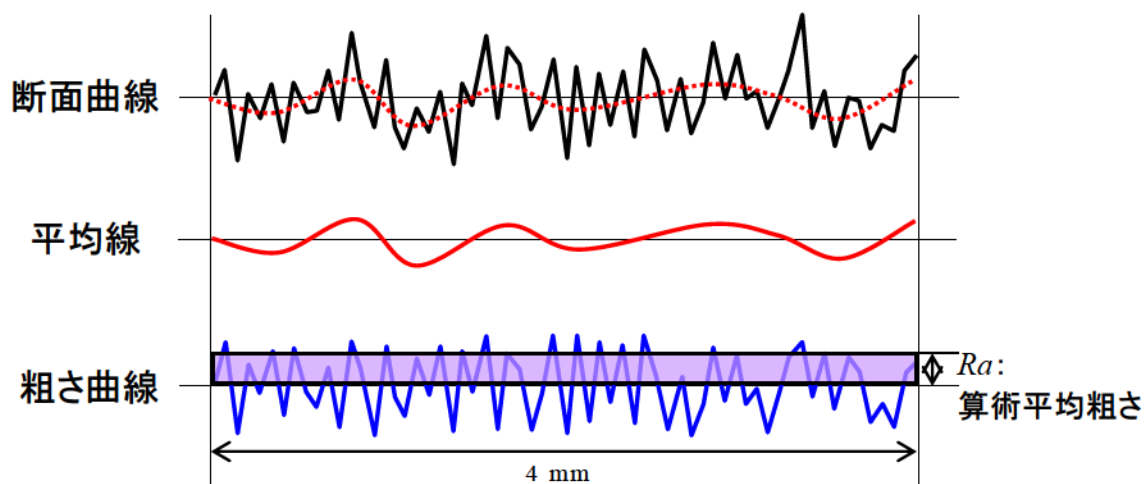


図 1.2 粗さの評価方法概要

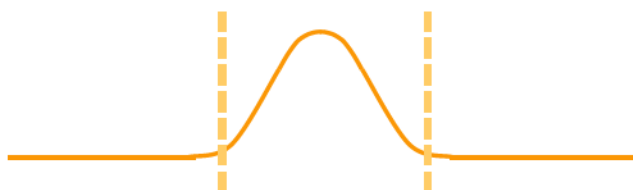


図 1.3 カットオフ波長  $\lambda_c$  打ち切り

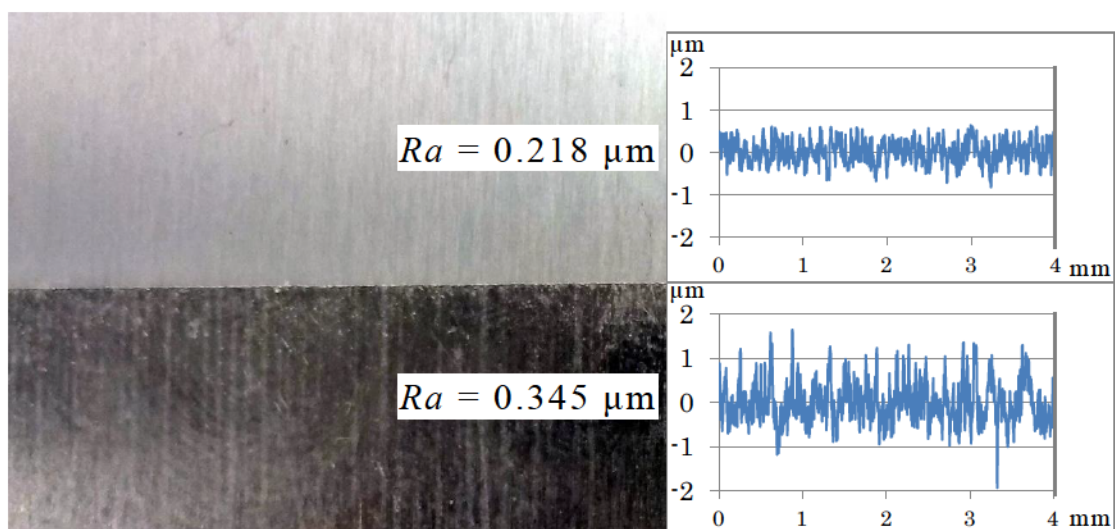


図 1.4 アルミ板 2 種と各断面曲線と  $Ra$

## 1.2 表面粗さの評価方法とローパスフィルタ

表面粗さ分野では，計測データである断面曲線（計測長さは標準で 4 mm）にカットオフ値  $\lambda_c$ （標準は計測長さの 1/5 で 0.8 mm）のローパスフィルタを適用して平均線を求める．平均線は粗さよりも大きな形状・形体成分として扱われ，断面曲線から平均線を除去した粗さ曲線が粗さの指標に用いられる[15-20]．この平均線を求めるデジタルフィルタ・ローパスフィルタは ISO11562 [21]（対応する JIS 規格は JIS B 0632 [22] で現行規格）で定められていたが，現在ではガウシアンフィルタ（Gaussian filter）[23,24]の規格である ISO16610-21 に置き換えられ，平均線はガウシアンフィルタ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するのが標準となっている．

ガウシアンフィルタの他にも，現在ではスプラインフィルタ[25-28]も表面粗さ用ローパスフィルタの規格として存在する（ISO 16610-22 [29]）．ただし，スプラインフィルタのカットオフ値における遮断特性は，図 1.5，図 1.6 のようにガウシアンフィルタと比べて傾きが急であり，ガウシアンフィルタと異なる．よって，スプラインフィルタ出力もガウシアンフィルタと異なり互換性はないことは振幅伝達特性を見ても自明となる．

本研究は，この平均線を求める新たなガウシアンフィルタ互換のローパスフィルタについて研究である．

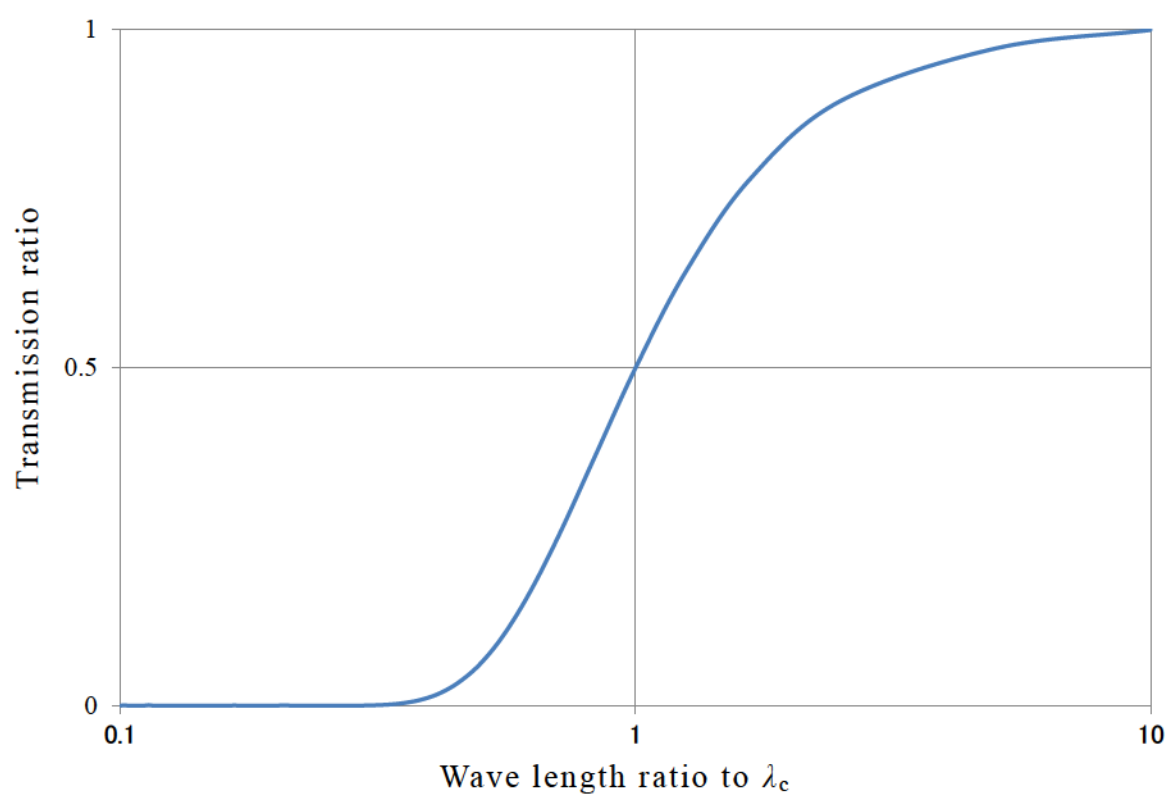


図 1.5 ガウシアンフィルタの振幅伝達特性

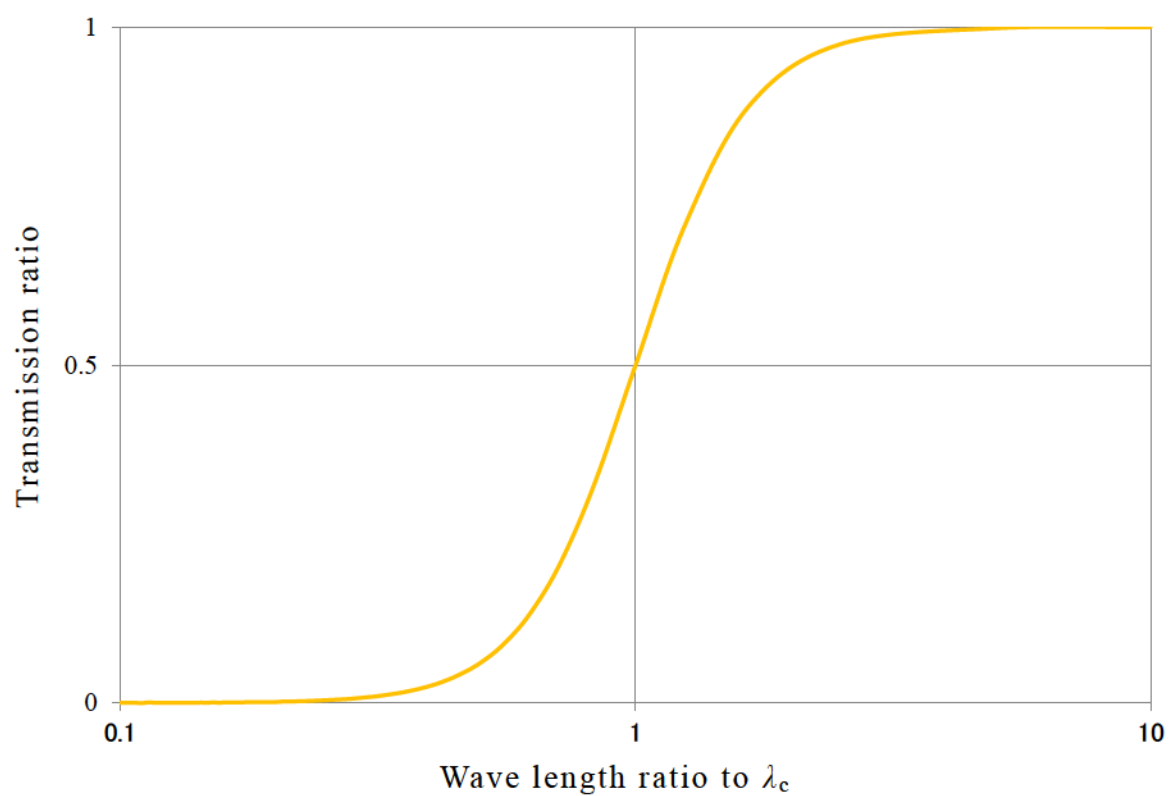


図 1.6 スプラインフィルタの振幅伝達特性

### 1.3 ガウシアンフィルタの問題点

長らく表面粗さ用ローパスフィルタとして用いられてきているガウシアンフィルタだが，そのガウシアンフィルタにも問題はある．

1 つ目はエンド効果である．ガウシアンフィルタを周期性のない計測データである開いた輪郭曲線 [30] に適用すると，図 1.7 のようにデータ端部・フィルタ幅の半分の領域において，フィルタリングする入力データが足りないために，エンド効果と呼ばれる予期せぬ振動やうねりが発生する [31,32]．このエンド効果問題については，現在はエンド効果部分を除去して粗さの評価を行なうことで対処されており，大きな問題とはなっていないが，エンド効果は発生しない方が望ましい．

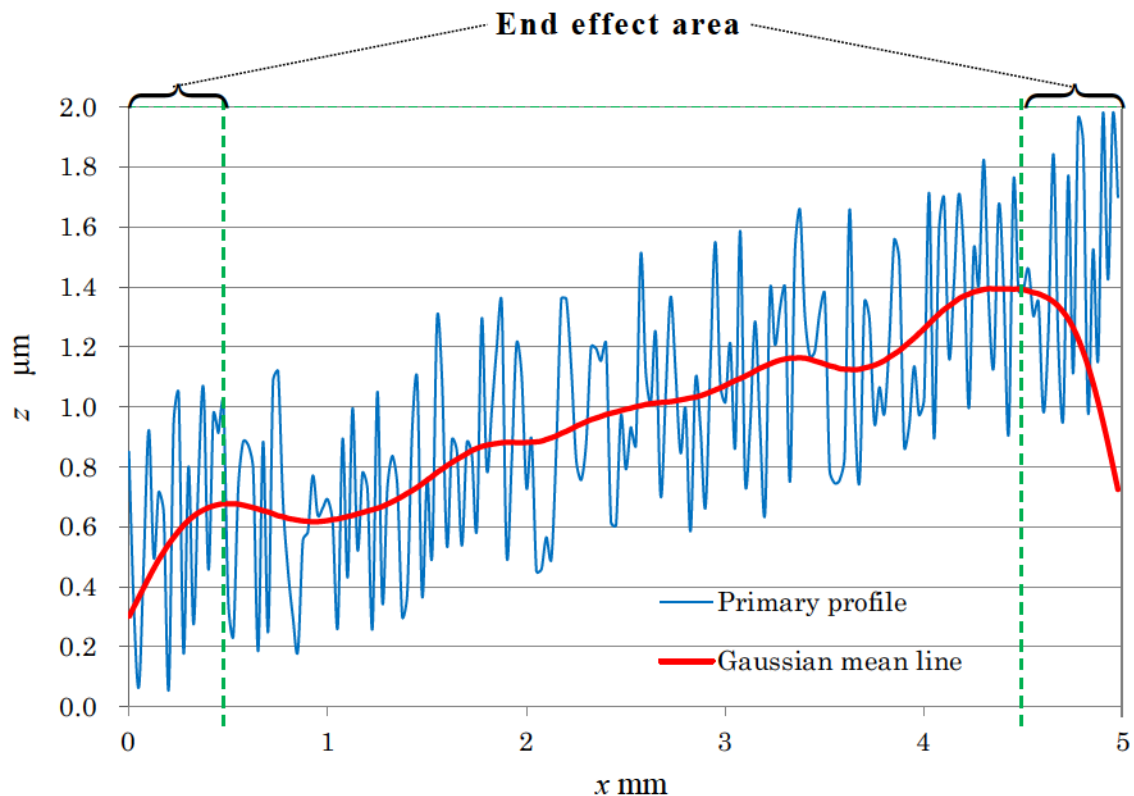


図 1.7 エンド効果概念図

2 つ目は、ガウシアンフィルタにはロバスト性がないことである。これは大きな問題で、ロバスト性がない場合、計測データに計測エラー等の外れ値が含まれると、平均線は外れ値の深刻な影響を受けてしまう。そうすると、平均線の目的である粗さよりも大きな形状・形体成分を抽出できなくなる[33,34]。そうなってしまうと正確に粗さが評価できなくなり、大きな問題となる。そのような状況の中、外れ値に対してのみロバスト性を有したガウシアンフィルタ互換ロバストフィルタの開発が求められている。

## 1.4 ISO16610-31 : Gaussian regression filters

ガウシアンフィルタのロバスト性がない問題を解決するため，S. Brinkmann らはロバストガウシアンフィルタを提案した[35]．このフィルタは ISO 規格化され，ISO16610-31 : Gaussian regression filters (以下 ISO 16610-31 [GRF]とする) となった．

ISO 16610-31 [GRF]は，図 1.8 の ISO 16610-31 [GRF]概念図のように，前回フィルタ入出力結果の乖離をもとに入力データの重みを変えて再演算を繰り返すことでロバスト性を発揮するフィルタである．ISO 16610-31 [GRF]をはじめ，ロバストの名前を関するフィルタ[36]は基本的に前回フィルタ入出力結果の乖離をもとに入力データの重みを変えて再演算を繰り返すフィルタである．しかし，これらロバストフィルタには外れ値がない場合の出力も通常のベースとなったフィルタの出力と異なり，ベースとなったフィルタと互換性

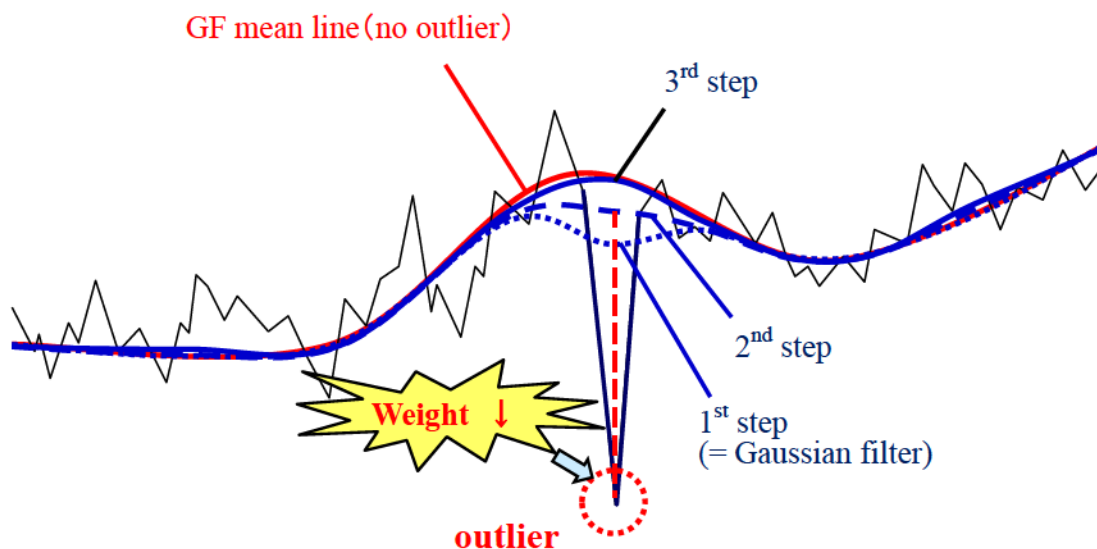


図 1.8 ISO 16610-31 [GRF] 概念図



がない問題がある．また，繰り返し演算を行なうため，ベースとなったフィルタと比べ処理時間も非常に長く要する．

ISO 16610-31 [GRF]には以上のような大きな問題があるため，表面粗さ測定現場では，従来フィルタと互換性がある，かつ高速処理を行なうことができる，新たなロバストガウシアンフィルタが求められていた．



## 1.5 高速 M 推定法を用いたロバストガウシアンフィルタ

1.4 のような状況の中，沼田らにより高速 M 推定法を用いたロバストガウシアンフィルタである FMGF (Fast M-Estimation Gaussian Filter) が提案された[37,38]．FMGF は誤差推定関数に 2 次 B スプライン基底関数を用いるロバストガウシアンフィルタである．図 1.9 は FMGF の出力概念図である．この FMGF は外れ値がなければガウシアンフィルタと特性が一致し，外れ値に対してのみロバストにふるまう，繰り返し演算を行なわない高速なロバストガウシアンフィルタとされていた．しかし，外れ値がない場合はガウシアンフィルタと特性が一致する，即ちガウシアンフィルタと互換性があることを示すためには，いくつかの入出力データが一致するだけでなく，振幅伝達特性と呼ばれる，フィルタが各周波数成分をどの程度減衰

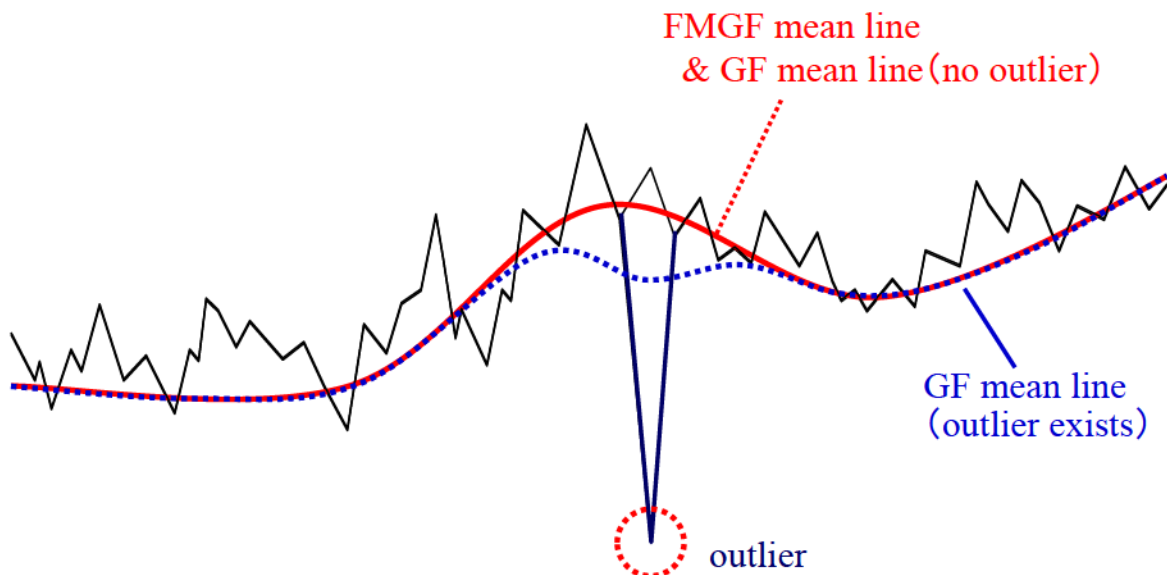


図 1.9 FMGF 出力概念図

させるかを示した重要な特性を示す必要がある．ところが，従来の振幅伝達特性の求め方は，フィルタの重み関数をフーリエ変換して求める方法しかなく，フィルタの重み関数が陽でない・数式で表すことのできないフィルタの振幅伝達特性を求める手段は存在していなかった．ロバストフィルタの重み関数は陽でない．よって，これまでロバストフィルタの振幅伝達特性を証明する事が不可能であった．それは FMGF も例外ではなく，FMGF の重み関数は陽でないため，FMGF とガウシアンフィルタの特性一致は証明することができなかった．

また，表面粗さ分野では，図 1.10 のように，線状の粗さ計測から，面状の三次元表面性状（＊ 1）[39-41]での粗さ計測に移行しようと ISO 規格制定が進められている．なお，まだ三次元表面性状のフィルタリング規格は ISO16610-61[42]が 2015 年 6 月に決まったのみで，基本コンセプトの規格である ISO16610-60[43]すらまだ最終決定には至っていない状態である．

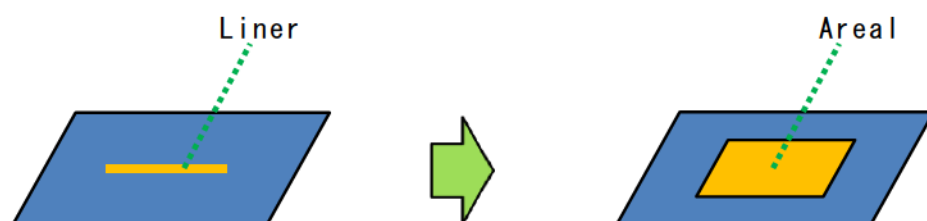


図 1.10 線状の粗さ計測から面状の三次元表面性状への移行

---

（＊ 1 ～ 4）2 次元フィルタと 1 次元フィルタの 2 次元と 1 次元は，two dimensional, one dimensional の日本語訳で，Dimensional の数が異なるバリエーションであるので 2 次元，1 次元と算用数字で表記している．一方，三次元表面性状の三次元と二次元表面性状のと二次元は，それぞれ Areal と Liner の日本語訳であるので，漢数字で三次元，二次元と表記している．

この三次元表面性状には円形の 2 次元フィルタ（＊ 2）を適用することが望ましいが，三次元表面性状の計測はデータ点数が非常に多くなるため，これまでの二次元表面性状（＊ 3）計測に比べ非常に計測時間が長くなる，さらに，2 次元フィルタを用いると更に処理時間を要するため，1 次元フィルタ（＊ 4）を  $x, y$  の 2 方向に適用して代用する方針は固まっている．1 次元フィルタで代用する際に重要なのは，フィルタを適用した方向の順番により最終結果が異なってしまうことである．しかし，ロバストな 1 次元フィルタを 2 方向に適用すると，フィルタを適用した方向の順番により最終結果が異なってしまう方向特性問題が発生する．この問題は外れ値が含まれる場合の FMGF にも当てはまる．よって，この方向特性問題を解決しなければ，FMGF は三次元表面性状に適用することができない．

## 1.6 研究の目的

1.5 で述べたように，FMGF には 2 つの大きな問題がある．1 つ目は，振幅伝達特性を求める事ができずガウシアンフィルタとの特性一致が証明できていない問題である．2 つ目は三次元表面性状に対する方向特性問題である．これは，外れ値が含まれる場合に 1 次元 FMGF を適用する方向の順番によって最終結果が異なり，三次元表面性状に対応できない点である．よって，本論文では FMGF の実用化のため，新たな振幅伝達特性検証方法確立し，外れ値のない場合の FMGF の振幅伝達特性がガウシアンフィルタと一致する事を証明する．そして，FMGF の方向特性問題を解決し三次元表面性状に対応できるようにする．

また，FMGF のロバスト性についても更に強化する．そして，FMGF が「ガウシアンフィルタとの特性一致」，「高速計算性」，「ロバスト性」，三次元表面性状に問題なく適用可能であることを示す「方向特性」という，三次元表面性状用フィルタに求められる四大特性すべてを満たすことができるようにする．そして，この研究が達成された暁には，計測現場が求める，三次元表面性状に適用可能な，ガウシアンフィルタと互換性のある高速なロバストフィルタが誕生する．

なお，この研究の目的は FMGF : ISO16610-21 : ガウシアンフィルタ互換の三次元表面性状に適用できるロバストフィルタを実用化可能にすることである．従って，フィルタを適用する前の計測データの精度や，計測データが真値であるかについては言及しない．

表 1.1 に，これまでの FMGF の四大特性達成状況と，本研究達成後の四大特性達成状況を示す．なお，高速計算性については，ロバストなフィルタは通常のガウシアンフィルタよりは処理時間を要することは避けられない．よって，ガウシアンフィルタよりは

表 1.1 FMGF の四大特性対応の現状と目標

項 目	現状	目標
ガウシアンフィルタとの特性一致	?	◎
高速計算性	○	○
ロバスト性	○	◎
方向特性	×	◎

遅いが，他のロバストフィルタよりは高速であることを目指す意味で◎でなく○にしている．

以下第 2 章では，これら問題を解決する前に，まずは FMGF について説明する．そして，第 3～5 章で FMGF の各問題を順に解決する．第 3 章では新たな振幅伝達特性検証方法を提案し，外れ値がない場合の FMGF の振幅伝達特性がガウシアンフィルタの振幅伝達特性と一致することを示し，ガウシアンフィルタとの特性一致を確かめる（関連文献 原著論文[1]，[3] に対応）．第 4 章では，FMGF を改良し，外れ値が含まれる場合でも方向特性問題が発生しないようにし，FMGF を問題なく三次元表面性状に適用できるようにする（関連文献 原著論文[2] に対応）．第 5 章では，FMGF を改良し，ロバスト性を強める．そして，スパイクの外れ度合いによっては ISO 16610-31 [GRF]のロバスト性よりも劣ることもある問題を解決する（関連文献 原著論文[4] に対応）．そして，第 6 章で研究成果をまとめる．以降の論文の内容の概要・流れを図 1.11 に示す．

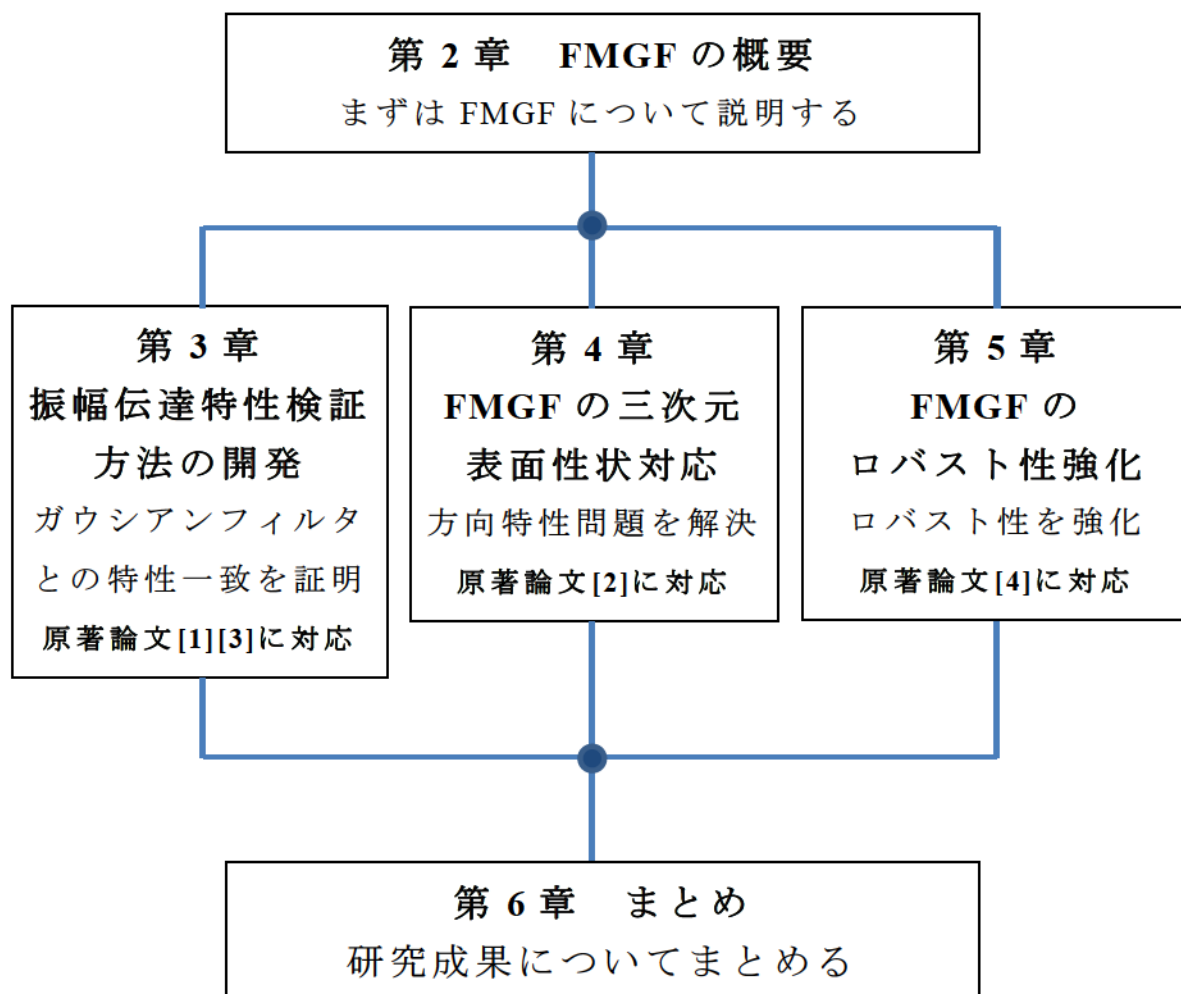


図 1.11 論文の内容の概要・流れ

---

---

## 第 2 章

# FMGF の概要

---

---

新たな振幅伝達特性検証方法の開発と，FMGF の三次元表面性状対応，ロバスト性強化の前に，まずは FMGF について説明する．

### 2.1 FMGF の処理手順

FMGF の処理手順について示す．図 2.1 の太い実線を入力データとすると，まず  $z$  軸を任意の  $\Delta z$  間隔で離散化し，入力データに対応するセルに，計測データ点 1 点につき 1 となるように重みを投票する．しかし，離散化数が計測値の有効桁より少なければ，実数値である計測値と  $z$  方向の格子点の位置は一致せずに離散化誤差が生じる．そこで，図 2.2 のように，その計測値がまたがる 2 つの格子点に，計測データの値に応じて線形に重みを振り分ける線形補間を行なう．線形補間を行なうと，線形補間による重みの振り分けの有



効率が充分であれば、 $z$  方向の離散化数が少なくても高精度に FMGF 処理を行なうことができる。

次に、重みが存在する格子点  $(x_i, z_i)$  を中心に 2 次元フィルタ  $F$  を適用する。この 2 次元フィルタ  $F$  は、 $x$  方向はガウシアンフィルタ、 $z$  方向は誤差推定関数である 2 次 B スプライン基底関数の合成フィルタである。なお、2 次 B スプライン基底関数は、図 2.3 のようにボックスフィルタを 3 回適用する事により、高速に実現することが可能である。なお、ボックスフィルタ計算時は図 2.4 のように、隣・前回の計算結果から差分、ボックスフィルタの範囲から 1 点の減算 1 回と、新たに範囲に加わる 1 点の加算 1 回の計算のみにすることにより、さらなる高速化が可能である。

続いて、 $x$  座標毎に重みの最高点となる  $z$  座標を実数値で求める。この  $z$  座標が FMGF の出力結果となる。図 2.5 は、図 2.1 の  $x_l$  の部分の断面を抽出、かつ各格子点の重みである制御点より 2 次 B スプライン曲線化した図である。なお、この断面はスパイク状の外れ値が存在する位置となる。FMGF では、重みが最大となる座標の  $z$  値（実数）がフィルタ出力結果となる。外れ値がある場合には、 $z_b$  近辺の外れ値の重みの累積値の山よりも  $z_a$  近辺の計測データの重みの累積値の方が大きくなるため、FMGF の出力は外れ値の影響を受けず出力される。この特性により、FMGF はロバストにふるまうことが可能となっている。



$F$  : 2-dimentional filter  
 ( $x$  : Gaussian filter,  $z$  : 2nd-order B-spline basis function)

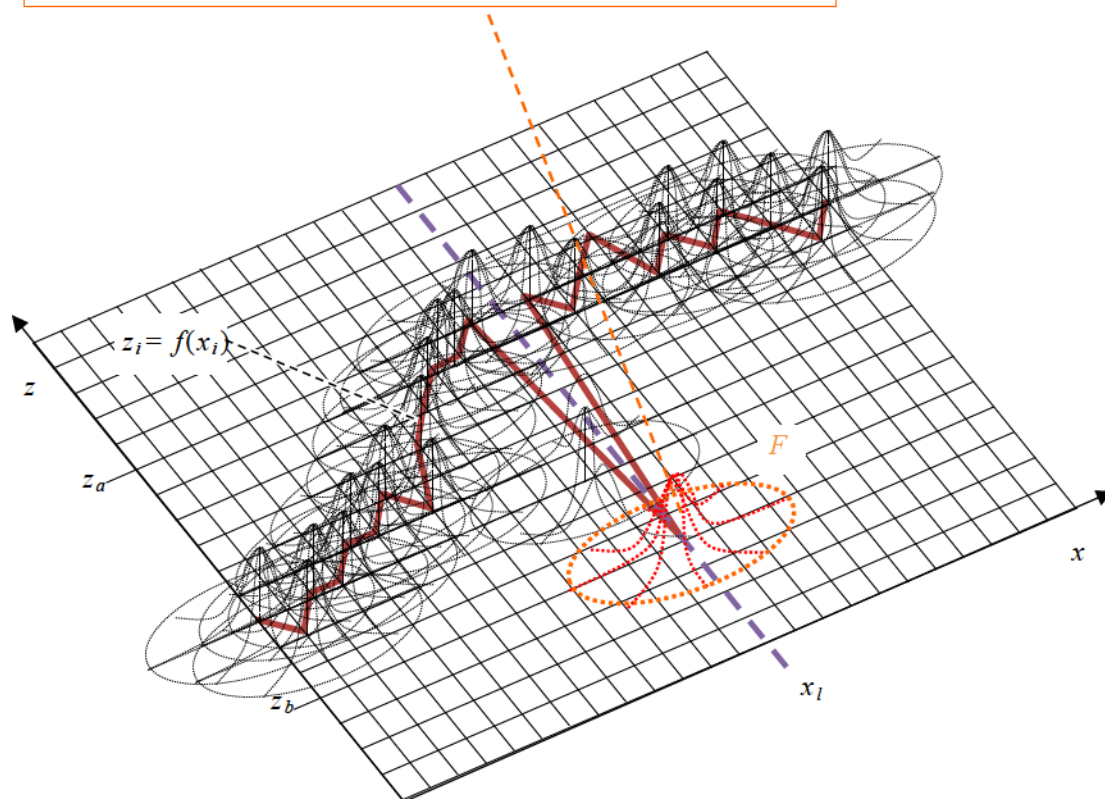


図 2.1 FMGF の処理手順 1

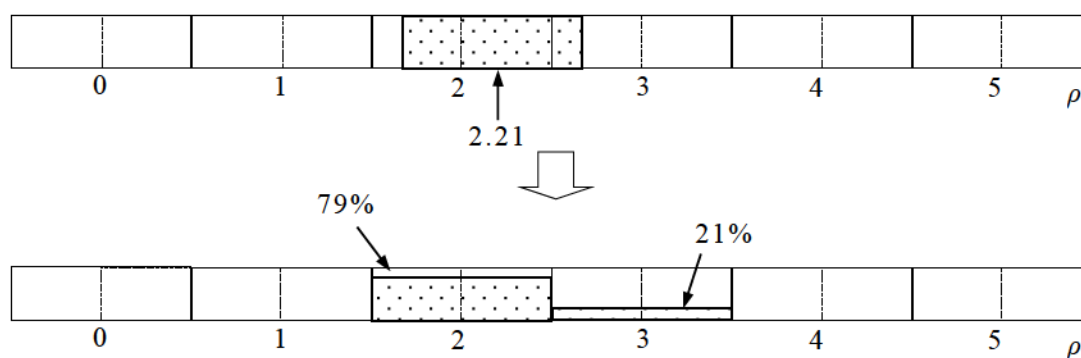


図 2.2 線形補間

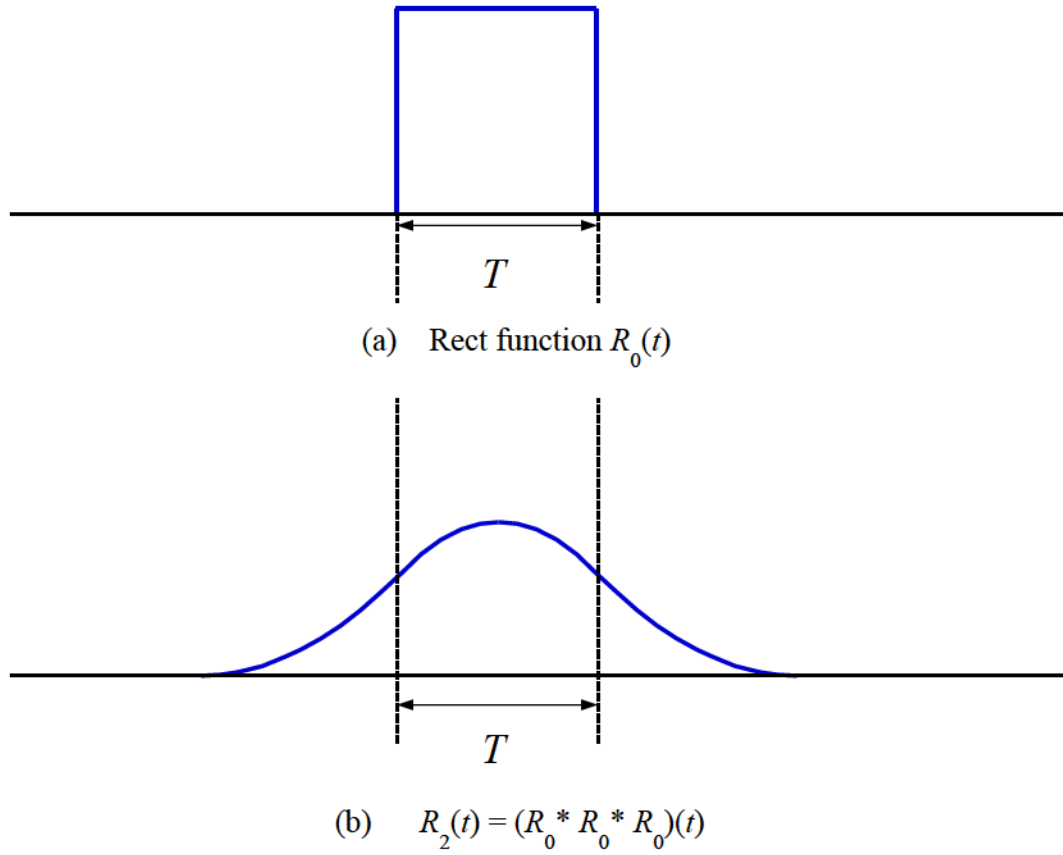


図 2.3 2 次 B スプライン基底関数計算の高速実現法 1

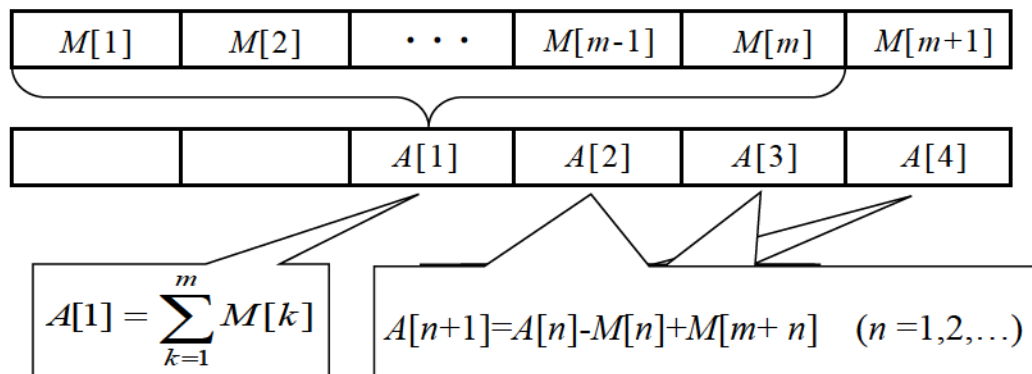


図 2.4 2 次 B スプライン基底関数計算の高速実現法 2

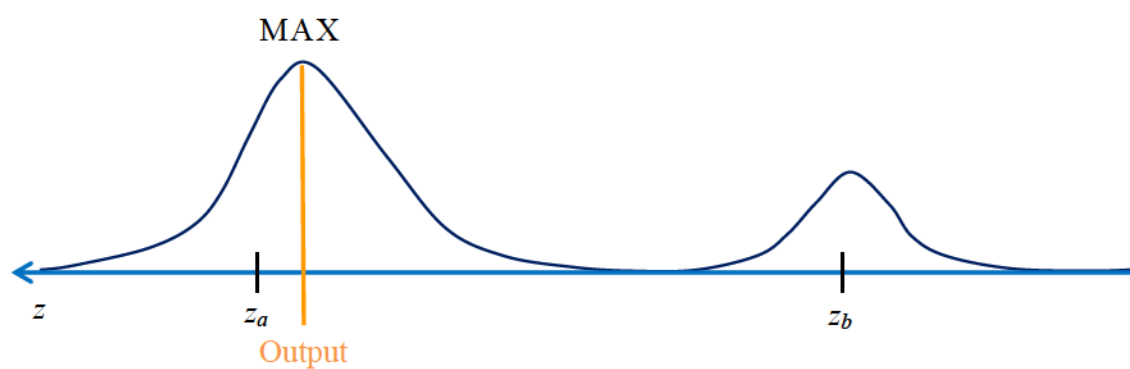


図 2.5 FMGF の処理手順 2 (出力プロセス)

## 2.2 量子化ガウシアンフィルタ

ガウシアンフィルタは通常，以下の式(2.1)のように入力データ  $f(x)$  とガウシアンフィルタの重み関数  $g(x)$  との畳み込み演算で処理が行われる．なお， $i$  はフィルタ中心からの距離である．

$$f \otimes g = \sum g(i - x_k) f(x_k) \quad (2.1)$$

FMGF の場合，2.1 で説明したように  $z$  方向に離散化し重みを入れ，その重みに 2 次元フィルタ  $F$  を適用する方法で出力を求める，なお，この 2 次元フィルタ  $F$  は合成フィルタであるので，1 次元フィルタ ( $x$  方向：ガウシアンフィルタ， $z$  方向：2 次 B スプライン基底関数) をそれぞれ独立に適用しても問題はない．図で説明すると，図 2.6 のように，重みの存在するセル（グレー）に対し  $x$  方向にガウシアンフィルタを適用する．そして，図 2.7 のように， $x$  座標毎に誤差推定関数として 2 次 B スプライン基底関数を畳み込み，重みが最大値となる  $z$  座標を求める．

ところで，図 2.8 のように， $z$  方向のフィルタを 2 次 B スプライン基底関数から 2 次関数に変えてみるとどうなるか確かめる．2 次関数に変えても，基本幅内のフィルタ形状は FMGF と全く同じとなる．この場合，2 次元フィルタ  $F$  の処理は， $x$  方向にガウシアンフィルタ， $z$  方向へ上に凸の 2 次関数を畳み込むこととなる．そしてその後，重みが最大値となる  $z$  座標を実数値で求め出力する．このことは  $z$  方向へ下に凸の 2 次関数を畳み込んで最小値を求めことに等しいので，これは最小 2 乗法を適用して  $z$  方向の出力値を推定す

ることに他ならない．よって各  $x$  座標の出力結果は， $z$  方向の座標値の重みの加重平均となる．そして，その値は式(2.1)のガウシアンフィルタ出力と一致する．ただし，離散化誤差を防ぐため，重みを入れる際に線形補間を行なう必要がある．このガウシアンフィルタと等価なフィルタを量子化ガウシアンフィルタ（Quantization Gaussian filter）と呼ぶことにする．この量子化ガウシアンフィルタの誤差推定関数は 2 次関数となる．

改めて量子化ガウシアンフィルタの処理手順を示す．まず，図 2.6 のステップまでは FMGF と全く同じ処理を行なう．続いて，図 2.7 のように， $x$  座標毎に  $z$  方向にフィルタを適用し出力処理を行なうのは同じだが，その処理内容は異なる．量子化ガウシアンフィルタの場合は， $x$  座標毎に重みが存在するセルの  $z$  座標と重みをかけた加重平均を求める．図 2.7 中で示すと， $x_i$  部分にある枠の範囲毎に順に求めていくことになる．この範囲の平均値となる  $z$  座標が推定値となる．

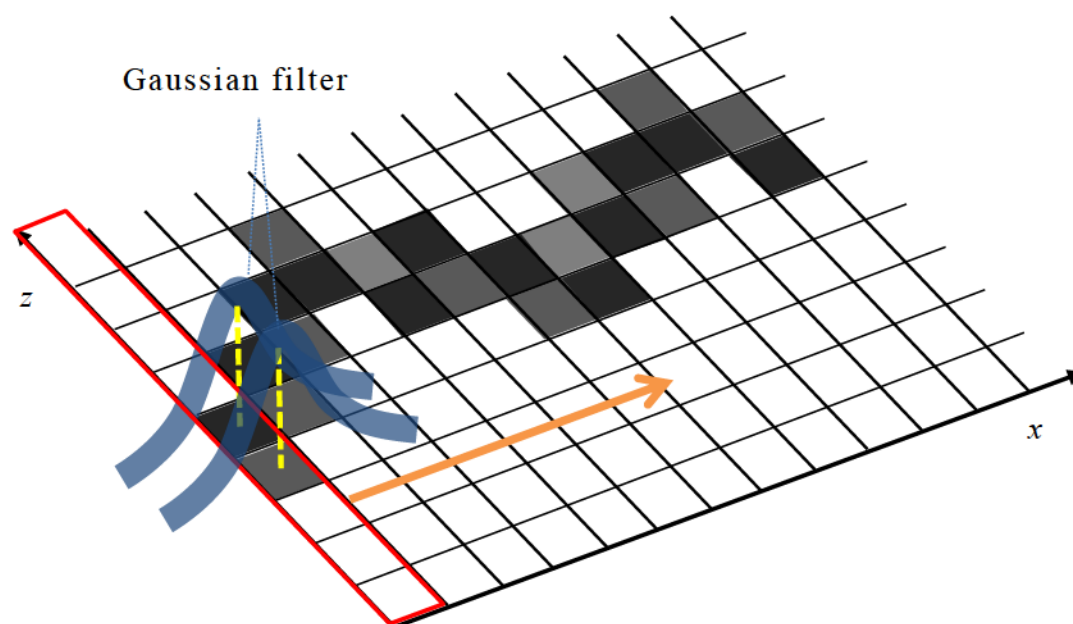


図 2.6 FMGF と量子化ガウシアンフィルタの共通プロセス

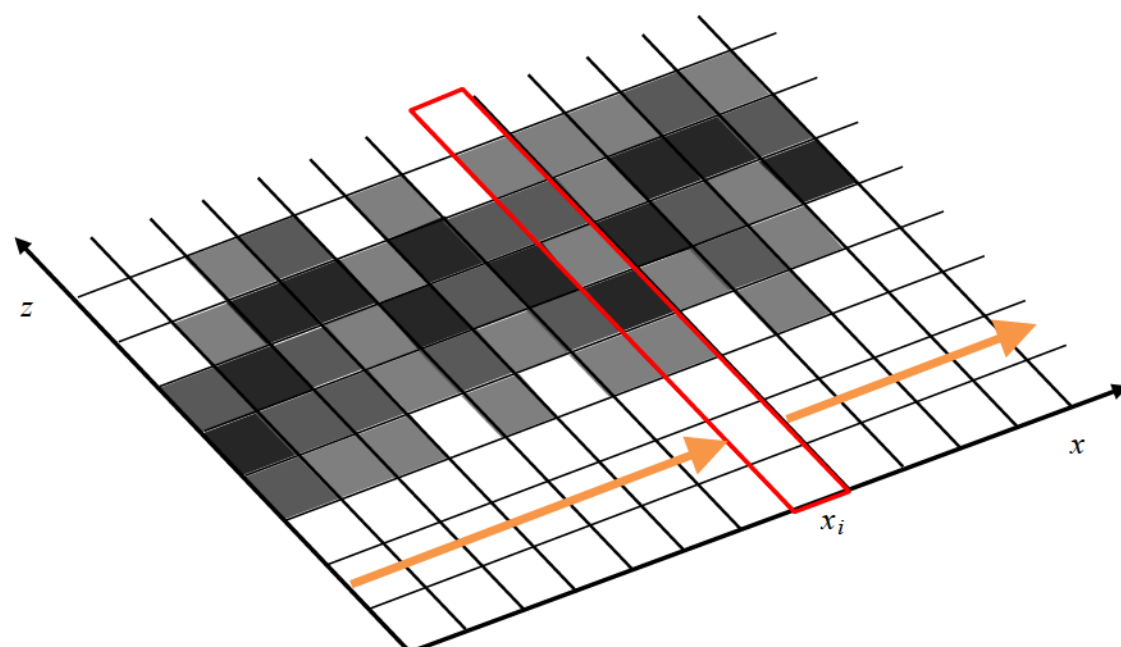


図 2.7 FMGF と量子化ガウシアンフィルタの出力プロセス

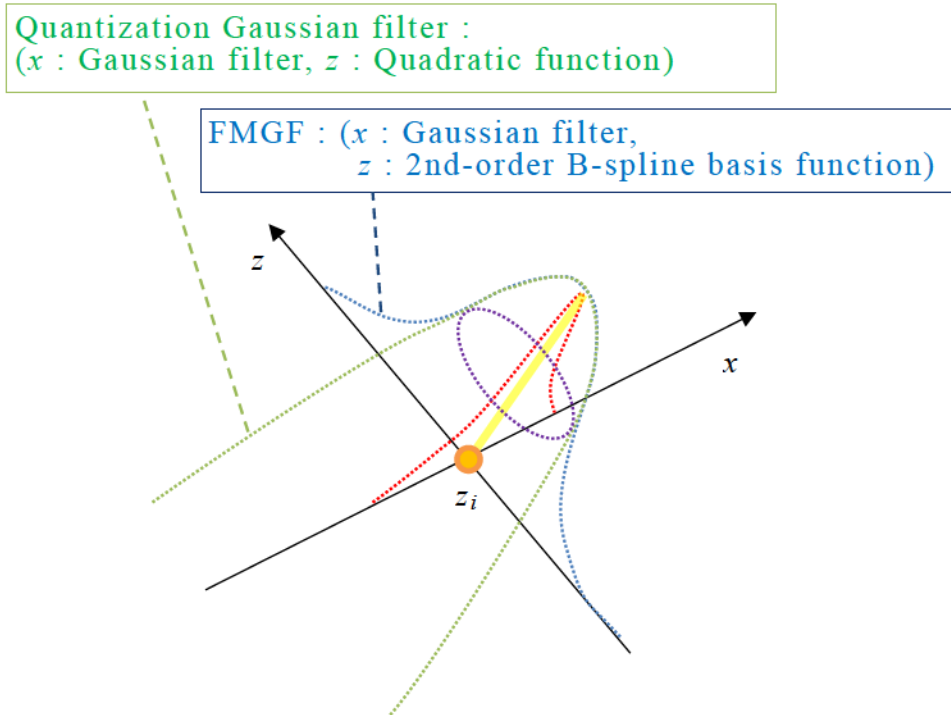


図 2.8 FMGF と量子化ガウシアンフィルタの  
2次元フィルタ  $F$

### 2.3 FMGF のガウシアンフィルタ特性一致理論的根拠

外れ値がない場合の出力がガウシアンフィルタと一致しながら、外れ値に対してはロバストにふるまう FMGF 特性の理論的根拠を示す。

FMGF の誤差推定関数である 2 次 B スプライン基底関数の形状・比率は、図 2.9 のように中心部の基本幅  $m$  の範囲では、ガウシアンフィルタと等価である量子化ガウシアンフィルタの誤差推定関数である 2 次関数と同じである。しかし、基本幅より外の範囲の重みは 0 に収束する。従って外れ値は基本幅より外に、それ以外の正常なデータは基本幅の中に来るように基本幅を調整すると、外れ値に対してのみロバスト性を発揮し、正常なデータに対してはガウシアンフィルタと同じ出力結果を示す。

なお、ISO 16610-31 [GRF]の重み関数である Beaton 関数は、基本幅内の形状も量子化ガウシアンフィルタの重み関数である 2 次関数と異なるため、ガウシアンフィルタ出力と一致しないことは理論的にも自明となる。



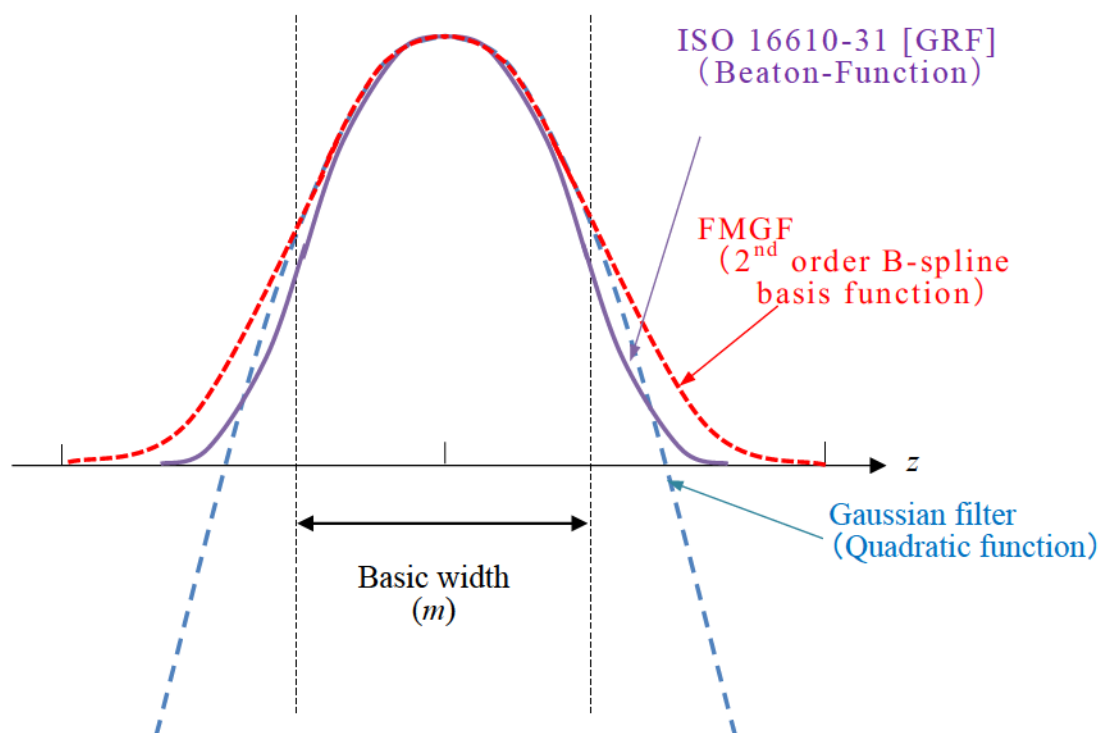


図 2.9 各フィルタの誤差推定関数

## 2.4 FMGF のロバスト性

ロバストフィルタの基本方針規格である ISO 16610-30 [44]では、ロバスト性が必要な例としてスパイク、ステップ（段差）、スロープの 3 つが挙げられている。なお、ロバスト性がないガウシアンフィルタでは、これら 3 つの例のようなデータでは、形状・形体成分を抽出することができず、粗さの正確な評価を行なうことができない。

この 2.4 では、各フィルタのロバスト性を確かめるため、スパイク、ステップ（段差）、スロープの 3 つに、ガウシアンフィルタや ISO 16610-31 [GRF], FMGF を適用した場合、どのような出力となるかを順に示していく。

まずはスパイクの場合を確認する。スパイクは触針式では針が跳ねたり、光学式でもうまく計測できずに発生することしばしば見られる、頻度の高い最も問題となる外れ値である。基本的にロバストフィルタはこのスパイクの影響を受けにくくなることを目的に作られている。図 2.10 はスパイクの場合の各フィルタ出力結果である。計測時のガウシアンフィルタ出力はスパイクに引っ張られ、形状線分がうまく検出できていないが、ISO 16610-31 [GRF]では少しスパイクに引っ張られている箇所があるが、ガウシアンフィルタと比べるとロバスト性が確認できる。このデータの場合、FMGF では ISO 16610-31 [GRF]よりもさらにスパイクの影響が小さいことが見てとることができる。なお、データ両端部を見ると、FMGF のみエンド効果も発生していないことが確認できる。

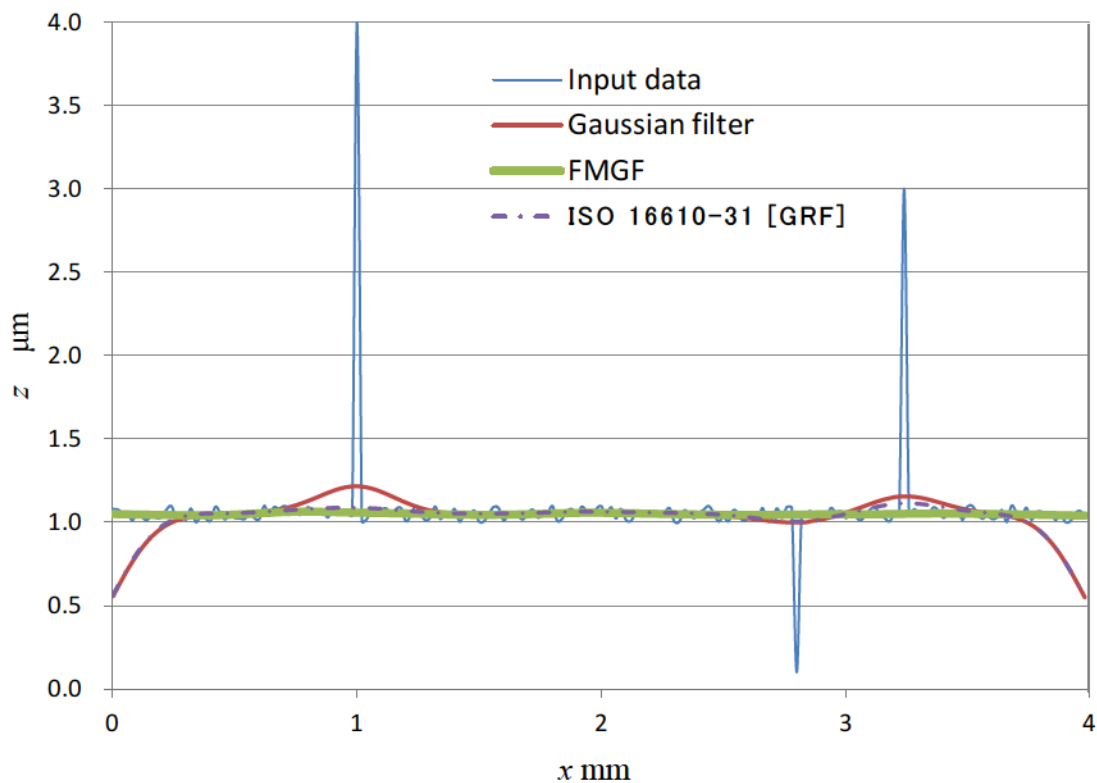


図 2.10 スパイク

引き続き，ステップの場合を検証する．図 2.11 はステップの場合の各フィルタ出力結果である．ISO 16610-31 [GRF]は，ロバストフィルタでありながらガウシアンフィルタと同様にステップ部分がなまってしまっている．しかし，FMGF だけはきれいにステップを抽出できている．これは，図 2.12 のように重みの山がきれいに 2 つに分かれ，FMGF の出力は上面なら上面のみの計測データから，下面なら下面のみの計測データから出力されるためである．

データ両端部を見ると，スパイクに引き続き FMGF のみエンド効果問題も発生していないことが確認できる．このエンド効果が発生していない理由は，エンド効果範囲では他のフィルタは存在しない

データに出力結果が影響を受けてしまうが、FMGF は存在するデータの重みのみから出力処理を行なうことができるため、端が平坦に近いデータであれば、エンド効果問題にも対処することができるからである。

なお、ISO 16610-31 [GRF]に限らず、このステップに対応することができるロバストフィルタは、現在は FMGF の他には確認されていない。

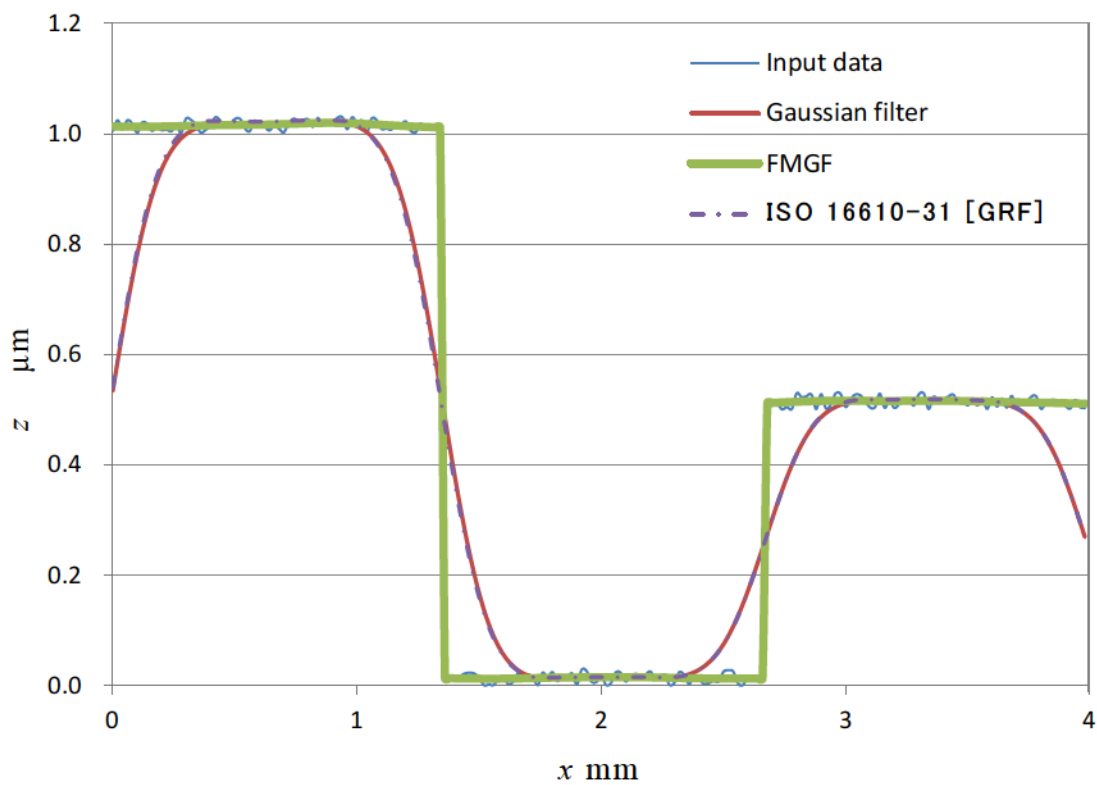


図 2.11 ステップ

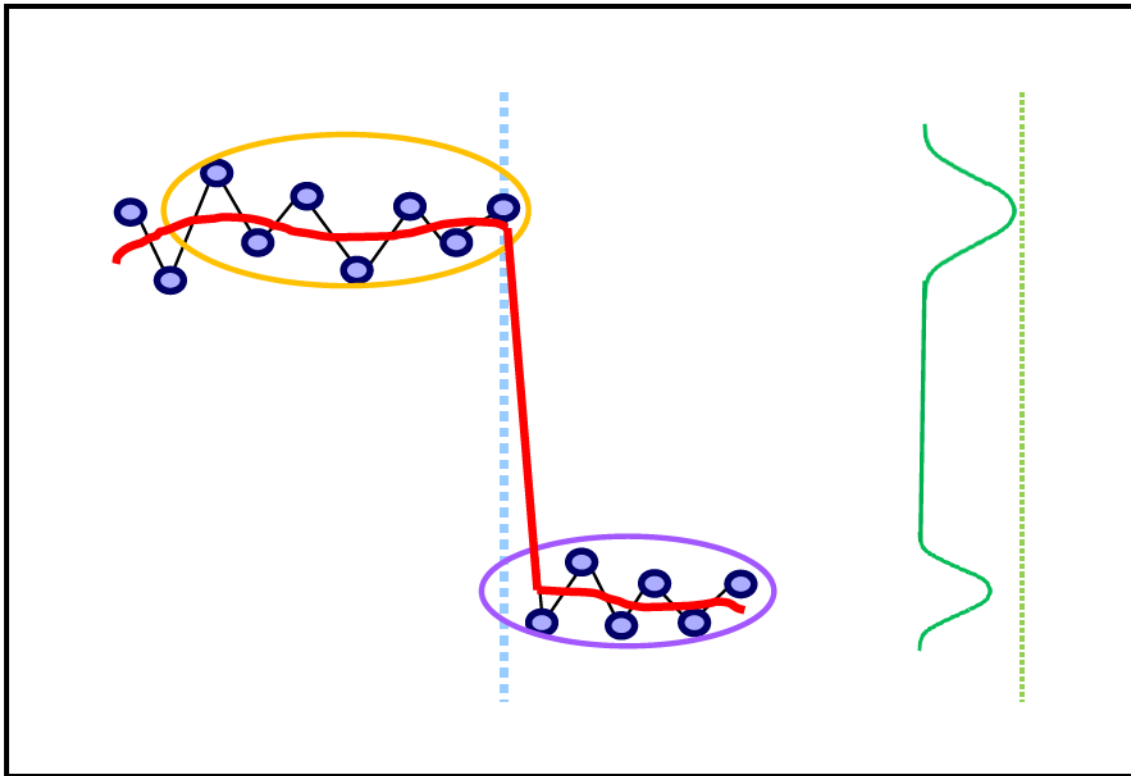


図 2.12 ステップの場合の FMGF の重みの累和

引き続き，スロープの場合を検証する．図 2.13 はスロープの場合の各フィルタ出力結果である．スロープの場合は，ISO 16610-31 [GRF]も FMGF も，ガウシアンフィルタ出力とほぼ一緒にロバスト性が確認されなかった．これは，FMGF もスロープに対しては，なだらかな変化で重みの山が分裂しないため，他のロバストフィルタと同様にスロープにはロバスト性を発揮することができないからである．なお，このスロープに対応できるロバストフィルタは現在確認されていない．

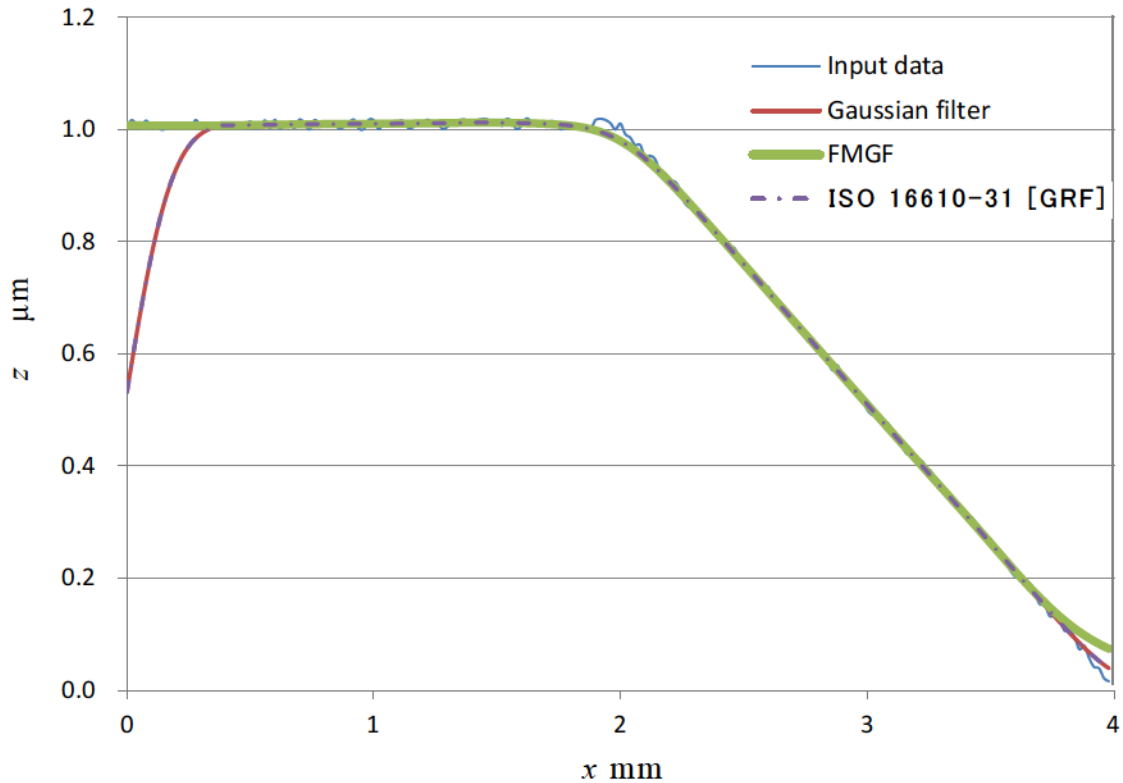


図 2.13 スロープ

引き続き，エンド効果について考察する．データ左端の方では，スパイクやステップの時と同様に，FMGF ではエンド効果が発生していない．しかし，データ右端の方を見ると，FMGF でもエンド効果が発生している．これは，FMGF は存在するデータの重みのみから出力処理を行なうため，エンド効果範囲では線対称に拡張を行なったのと似たような処理となるからである．図 2.14 はスロープの場合のエンド効果範囲の概念図である．左半分の黒いギザギザの線が計測データであり，右半分の緑のギザギザの線が線対称拡張された計測データである．このような状態でフィルタリング処理を行なうと，フィルタ出力結果は赤い太線のようになってしまう．よって，FMGF はデータ端が平坦に近ければエンド効果を防ぐことがで

きるが，スロープのように傾斜があるとエンド効果が発生してしまう．よって，FMGF はエンド効果に対して効果はあるが，その効果は状況により部分的にとどまることとなる．

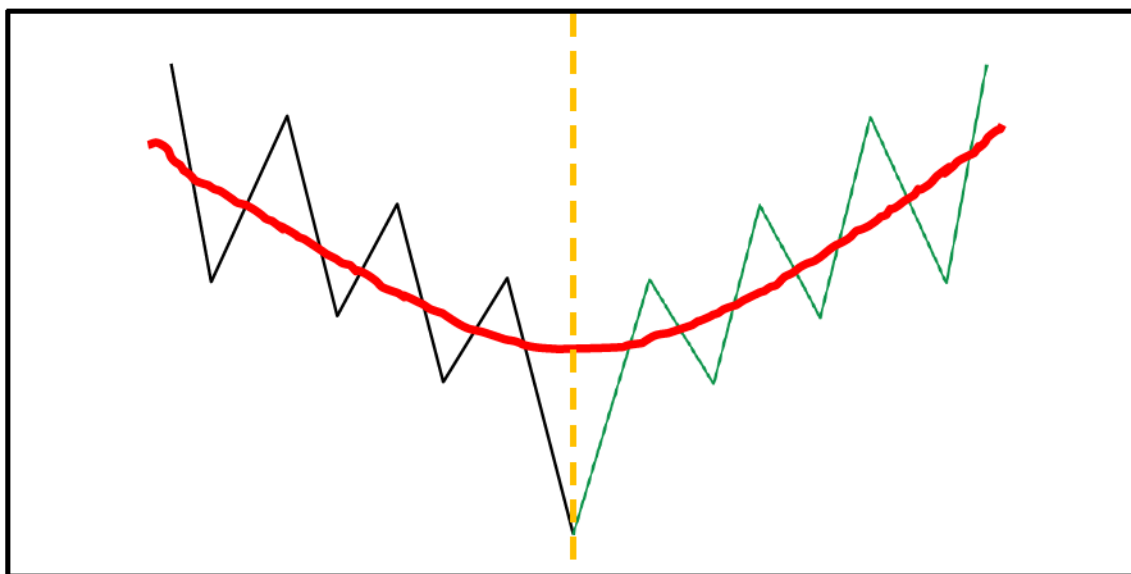


図 2.14 スロープの場合の FMGF のエンド効果

---

---

## 第 3 章

# 振幅伝達特性検証方法の開発

---

---

### 3.1 一般的な振幅伝達特性の求め方

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．FMGF 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．

しかし，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，計測データは有限かつ数式で表すことができないため，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 (Discrete Fourier transform : DFT) で代用しなければならない．離散的フーリエ変換は周期的に繰り返すことを前提に，有限のデータで定義域が無限大のフーリエ変換と同等の処理を行なう．ということは，通常のフィルタ入出力結果からは求める事ができない．よって，周期拡張や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[45]への対応が不可欠となり，計算方法の確立が必要である．

## 3.2 提案手法

3.1 で述べたように，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で代用するには，周期性やデータ端におけるリングなど離散的フーリエ変換特有の問題への対応が不可欠である． $N$  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．

$$h(x_i) = \sum f(x_k)l(x_i - x_k) = (f \otimes l)(x_i) \quad (3.1)$$

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．

$$\tilde{H}(u_k) = \tilde{F}(u_k)\tilde{L}(u_k) \quad (3.2)$$

これより，ローパスフィルタの振幅伝達関数は次式で与えられる．

$$\tilde{L}(u_k) = \frac{\tilde{H}(u_k)}{\tilde{F}(u_k)} \quad (3.3)$$

### 3.3 モデルデータを用いた実験

3.1 で述べたように，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で代用するためには，周期性や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への対応が不可欠である．そこで，まずは離散的フーリエ変換に適したモデルデータを用いて，提案手法で振幅伝達特性を求めることができるか確認する．

#### 3.3.1 モデルデータ条件

モデルデータは離散的フーリエ変換の性質を考慮し，データ両端の値の差がない，かつ滑らかにつながるベース曲線に，粗さ成分として細かなランダムデータを加えたデータを用いる．おおまかにはこのベース曲線を平均線，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(3.4)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． $x$  が 0 の左端は  $x = L$  の値に滑らかにつながり， $L$  の右端は  $x = 0$  に滑らかにつながり，周期的に拡張された状態で後のフィルタリング処理を行なう．

$$z = \begin{cases} -C\left(x - \frac{1}{4}L\right)^2 + \frac{CL^2}{16} & (0 \leq x \leq \frac{L}{2}) \\ C\left(x - \frac{3}{4}L\right)^2 - \frac{CL^2}{16} & (\frac{L}{2} < x \leq L) \end{cases} \quad (3.4)$$

図 3.1 は，上記条件を満たすモデルデータである．なお，評価長さ  $L$  はベース曲線 1 周期分で，長さにして 4 mm，ベース曲線の振幅は 25  $\mu\text{m}$  である．このベース曲線に最大 1  $\mu\text{m}$  のランダムデータを加えた．データ数は  $N = 200$  点で，ガウシアンフィルタの幅とカットオフ値はともに  $\lambda_c = 0.8$  mm である．このモデルデータを用いて振幅伝達特性検証実験を行なう．なお，2 次 B スプライン基底関数の基本幅は， $x$  方向にガウシアンフィルタ適用後の，各  $x$  座標に重みが存在するセル数の平均と分散をとり， $m = \mu + 2\sigma$  で算出された値を奇数に繰り上げて実験を行なう．

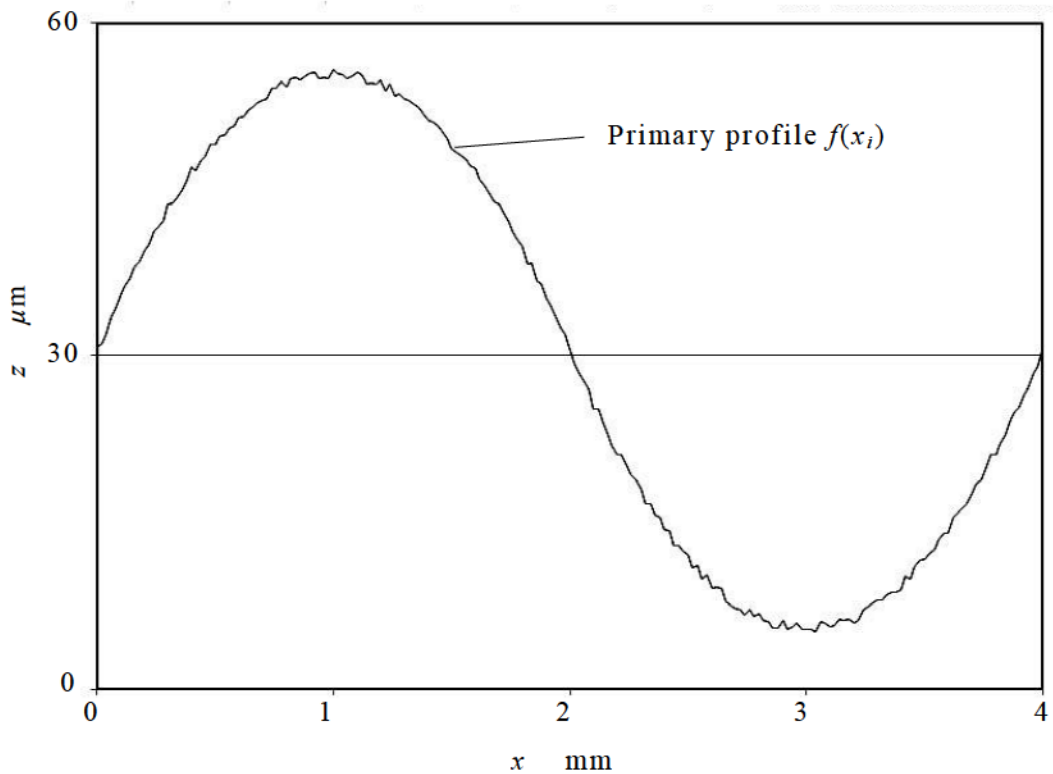


図 3.1 モデルデータ

### 3.3.2 モデルデータを用いた振幅伝達特性検証実験

図 3.2 は，図 3.1 のモデルデータと提案手法を用いて得られた FMGF の振幅伝達特性である．FMGF の振幅伝達特性の概形はガウシアンフィルタの振幅伝達特性理論値と概ね一致している．しかし，低波長域でわずかな波打ちが見られ，完全一致とまでは至っていない．

図 3.3 は，図 3.2 の FMGF の振幅伝達特性とガウシアンフィルタの振幅伝達特性理論値との偏差と，図 3.2 の FMGF の振幅伝達特性と提案手法を用いて求められた実際に用いられるフィルタ幅  $\lambda_c$  のガウシアンフィルタの振幅伝達特性との偏差である．FMGF の振幅伝達特性とフィルタ幅  $\infty$  のガウシアンフィルタの振幅伝達特性理論値との偏差は最大  $10^{-2}$  程度であった．しかし，FMGF の振幅伝達特性と，同じフィルタ幅  $\lambda_c$  のガウシアンフィルタの振幅伝達特性との偏差は最大でも  $10^{-5}$  未満と高精度に一致することが確認された．よって，図 3.2 で見られた振幅伝達特性の波打ち等の理論値と異なる点は，フィルタ幅の違い故に生じるものであり，フィルタ幅条件が同じ・実際に現場で用いられるフィルタ幅  $\lambda_c$  のガウシアンフィルタの振幅伝達特性と FMGF の振幅伝達特性は高精度に一致することが判明した．

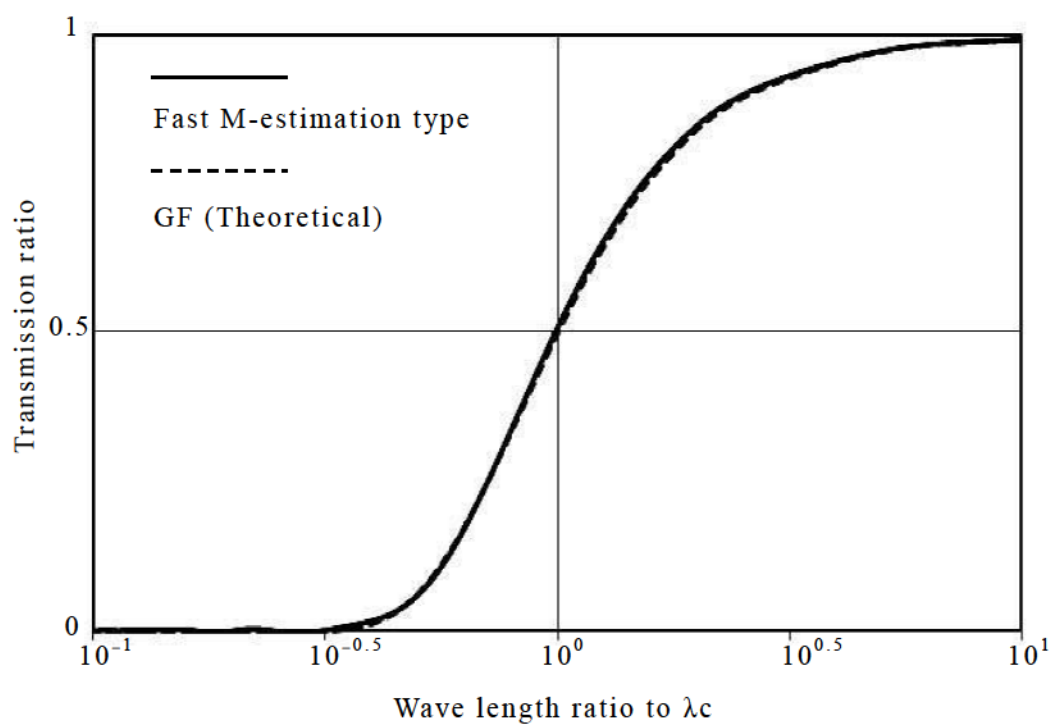


図 3.2 提案手法で得られた FMGF の振幅伝達特性

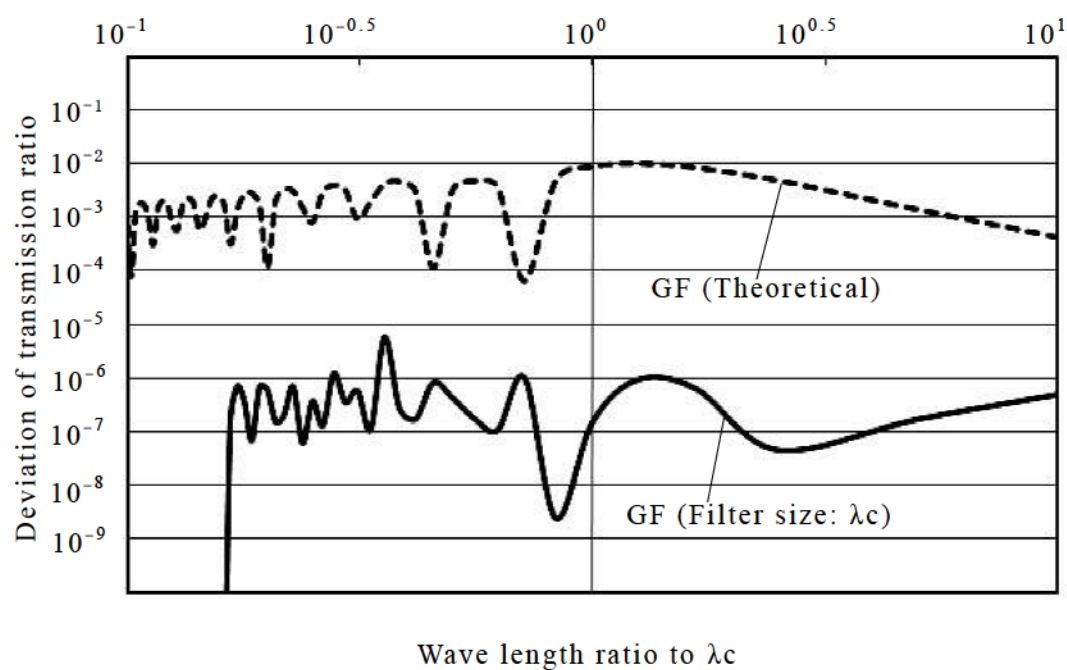


図 3.3 提案手法で得られた FMGF の振幅伝達特性と理論値との偏差

2 次 B スプライン基底関数の基本幅  $m$  の値を下げた場合，振幅伝達特性がどうなるかについても検証を行なう．フィルタ出力結果ベースで見ると，FMGF の出力結果は， $m$  の値が一定以上小さくなると，小さくなるにつれガウシアンフィルタ出力との一致は崩れていく傾向が存在する．なお，先程の実験で  $m = \mu + 2\sigma$  で算出された値を奇数に繰り上げた値は 11 であったので，ここでは  $m = 9$  と  $m = 7$  の場合で検証を行なう．

図 3.4 は  $m = 9$  の場合の FMGF の振幅伝達特性の結果である．先程の  $m = 11$  の時と比べ，短波長域での波打ちが大きくなっていることが確認できる．図 3.5 は  $m = 7$  の場合の FMGF の振幅伝達特性の結果である．短波長域での波打ちはさらに大きく，波打っている範囲も広がっていることが確認できる．以上のことより，FMGF は  $m$  の値が小さいと，主に短波長域でガウシアンフィルタとの一致性が崩れやすいことが判明した．

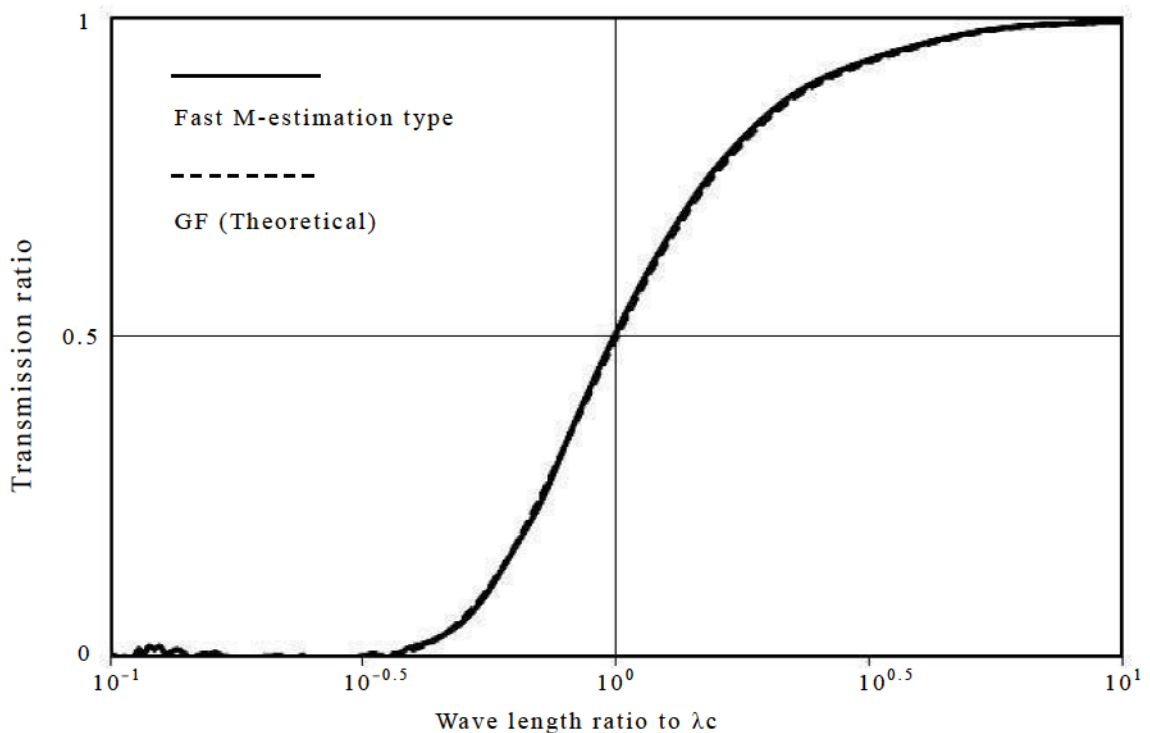


図 3.4  $m$  の値が小さかった場合の FMGF の振幅伝達特性 ( $m = 9$ )

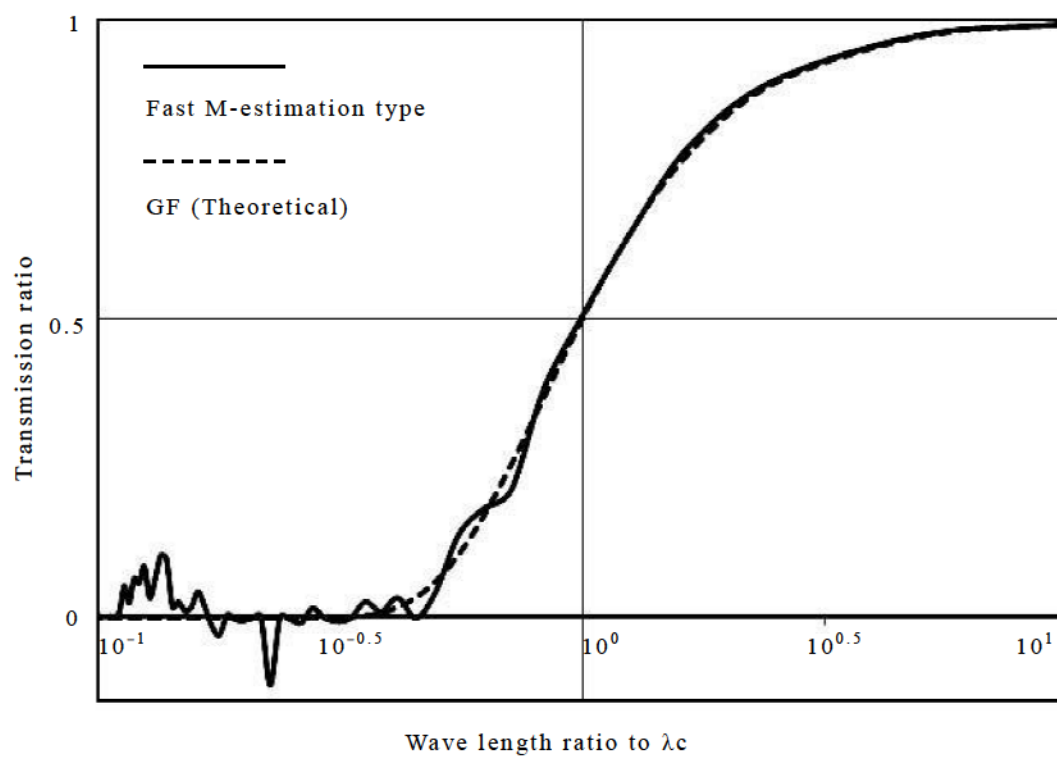


図 3.5  $m$  の値が小さかった場合の FMGF の振幅伝達特性 ( $m = 7$ )



### 3.4 実計測データを用いた実験

3.3 にて，離散的フーリエ変換に最適化したモデルデータを用い，提案手法がフィルタの振幅伝達特性を求められることが確認された．引き続き，実計測データのフィルタ入出力結果より検証を行ない，振幅伝達特性を求めるための必要最低条件を明らかにする．

単に実データの入出力結果からでは提案手法を用いても振幅伝達特性を正しく求めることはできない．離散的フーリエ変換には周期性があるためである．モデルデータは，大きく見ると周期性とデータ両端が滑らかに接続されるという 2 つの条件を満たしていた．離散的フーリエ変換の特性から周期性は欠かすことはできないが，データ端が滑らかに接続されていなくても振幅伝達特性を求めることができるか確かめる．検証実験は，図 3.6 のように，モデルデータと異なりデータ端の値の差が大きい，周期拡張しても滑らかに接続されない実計測データに周期拡張を適用しフィルタ処理を行ない，元の計測範囲 ( $n = 0$ ) のフィルタ入出力結果から振幅伝達特性を求める実験を行なう．

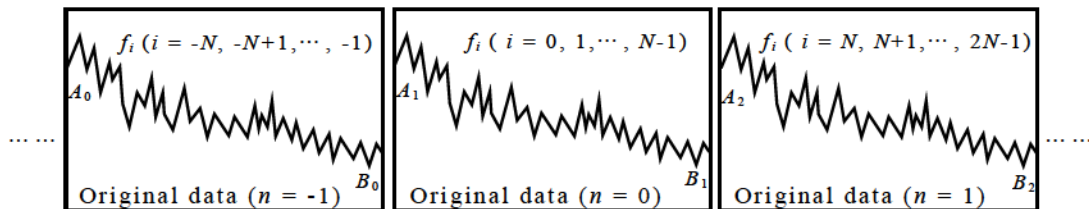


図 3.6 周期拡張概念図

図 3.7 は、粗さ用標準片 [46,47] の実計測データに周期拡張のみを施し、提案手法で求めた振幅伝達特性である。なお、理論値との一致性を高めるため、フィルタ幅は通常の  $\lambda_c$  から、理論値の  $\infty$  に近づけ  $2\lambda_c$  とした。図 3.8 はガウシアンフィルタの振幅伝達特性理論値との偏差である。偏差は最大でも  $10^{-7}$  程度と高精度に理論値と一致した。以上の事より、周期拡張さえ適用すれば、フィルタの入出力結果からフィルタの振幅伝達特性を求められることが判明した。

なお、フィルタリング処理は Visual Studio 2008 を用い、C++ で記述したプログラムを用いて行なっている。フィルタ出力は CSV ファイルに出力しているが、この CSV ファイルへの出力は、小数点以下 6 桁までしか出力されない問題が判明した。しかし、これはあくまで小数点以下の有効桁であり、小数点以上の桁が大きい場合でも小数点以下は変わらず 6 桁まで出力されていた。そこで、CSV ファイルへの出力を一旦  $10^6$  倍して出力する事により、実質の有効桁を上げ、理論値との偏差をより減少させることに成功した。

以上のことより、外れ値がない場合の FMGF の振幅伝達特性は、ガウシアンフィルタと一致することが判明し、外れ値がない場合の FMGF のガウシアンフィルタとの特性一致が証明され、実用化に向けて妨げる問題が 1 つ解決された。

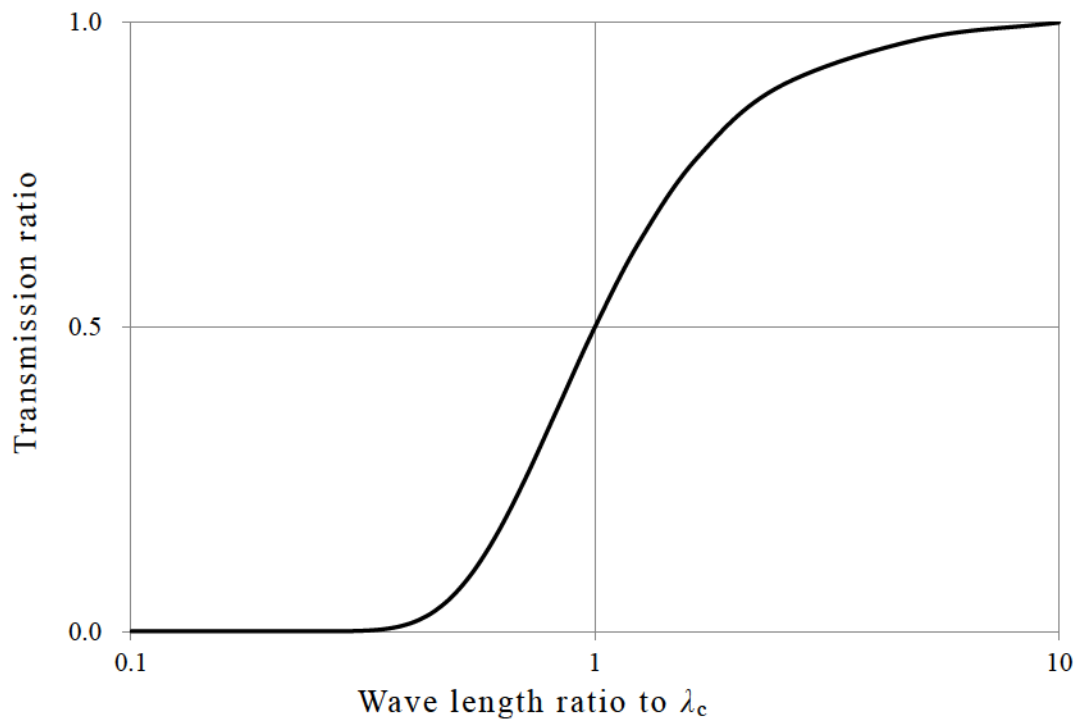


図 3.7 提案手法を用い実計測データから得られた  
振幅伝達特性

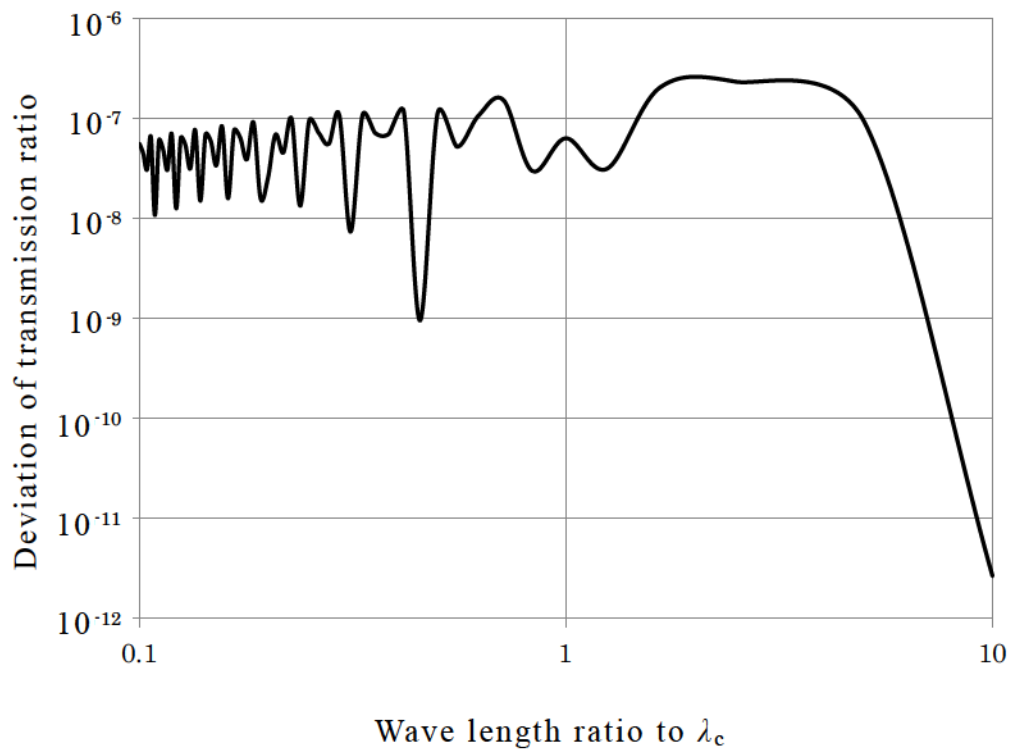


図 3.8 図 3.7 と理論値との偏差

### 3.5 振幅伝達特性検証方法の開発まとめ

離散フーリエ変換の特性を活用し，周期拡張を適用したフィルタ入出力結果から，フィルタの振幅伝達特性を求める方法を新たに開発した．従来はフィルタの重み関数が陽なフィルタの振幅伝達特性しか求めることができなかったが，この方法の開発により，ロバストフィルタ等の，フィルタの重み関数が陽でないフィルタの振幅伝達特性を求めることが可能となった．

そして，この方法を用いて FMGF の振幅伝達特性を確認した．その結果，外れ値がない場合の FMGF の振幅伝達特性は，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が確認された．これにより，これまで証明する事ができなかった FMGF とガウシアンフィルタとの特性一致が証明され，FMGF の実用化を妨げる問題点が 1 つ解決した．

---

---

## 第 4 章

# FMGF の三次元表面性状対応

---

---

### 4.1 1 次元 FMGF をそのまま適用した場合

図 4.1 のように，外れ値が含まれない入力データの場合，FMGF もガウシアンフィルタと同様に方向特性はない．しかし，1 点でも外れ値が含まれる場合，1 次元 FMGF を  $x, y$  方向の順番に適用した場合と， $y, x$  方向の順番に適用した場合は出力である平均面が異なる．図 4.2 はスパイク状の外れ値が含まれるデータである．図 4.3 は図 4.2 のデータに 1 次元 FMGF を  $x, y$  方向の順番に適用した結果である．図 4.4 は図 4.2 のデータに 1 次元 FMGF を  $y, x$  方向の順番に適用した結果である．図 4.5 は 1 次元 FMGF を適用する方向により出力結果の差分である．図 4.3 と図 4.4 のレンジで目視しただけでは差はわからないが，図 4.5 のように偏差を取ると 1 次元 FMGF を適用する方向の順番によって最終的な出力結果が異なっていることがわかる．なお，面状の三次元表面性状計測では，線状の二次元表面性状計測に比べ，非常に計測データ点数が増えるため，外れ値が含まれる事態が発生する可能性も高くなる．

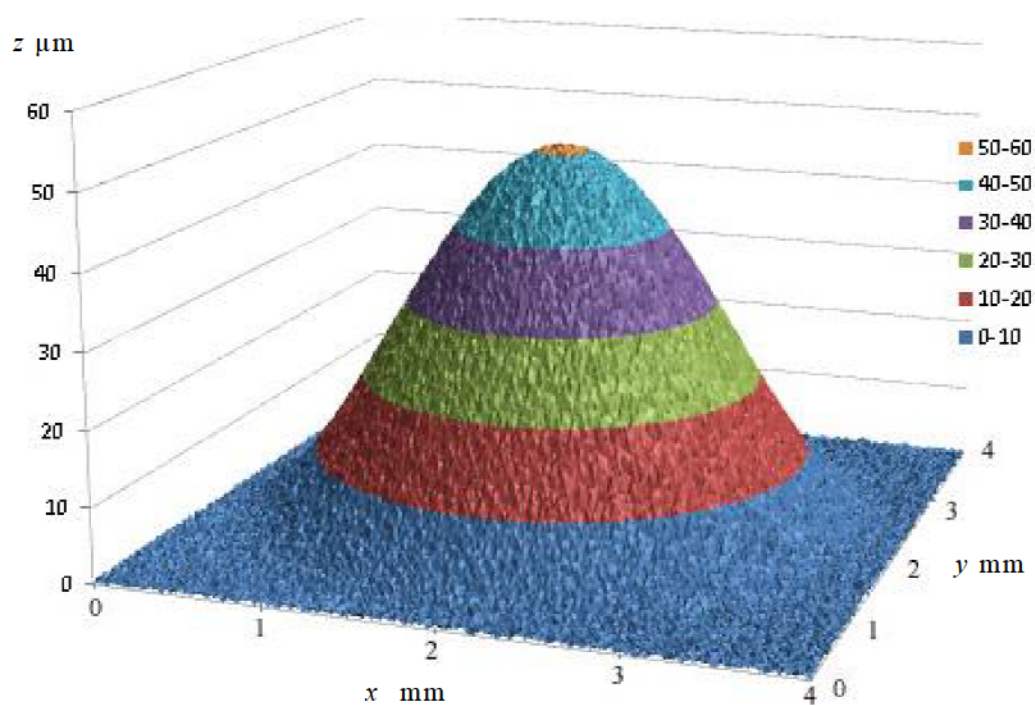


図 4.1 三次元表面性状モデルデータ

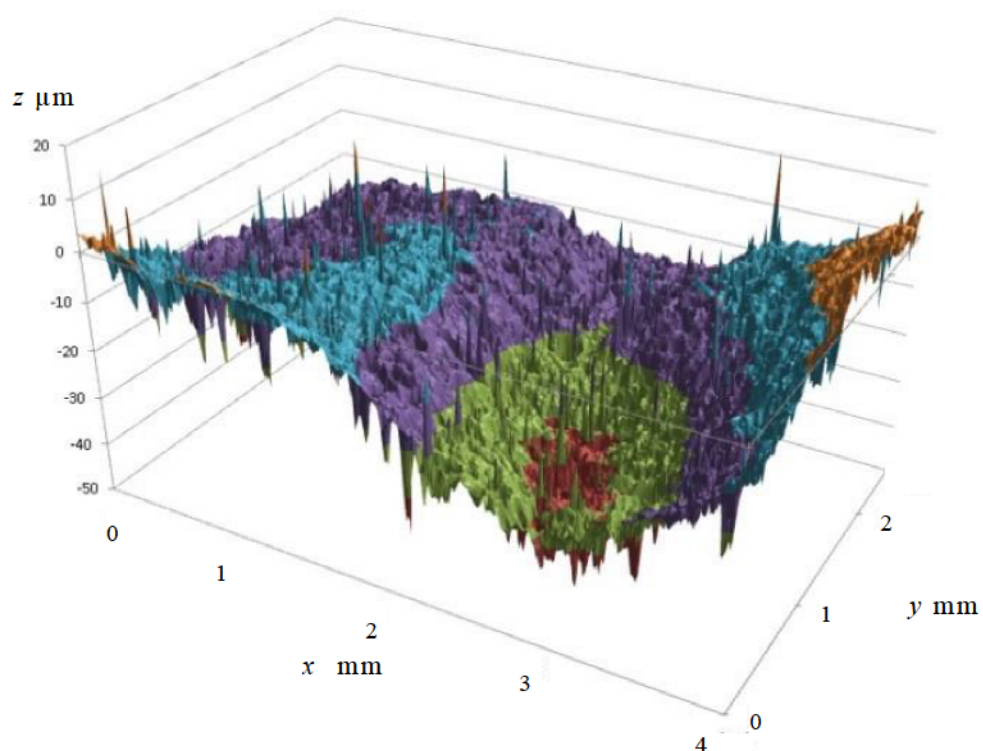


図 4.2 外れ値が含まれる三次元表面性状実計測データ



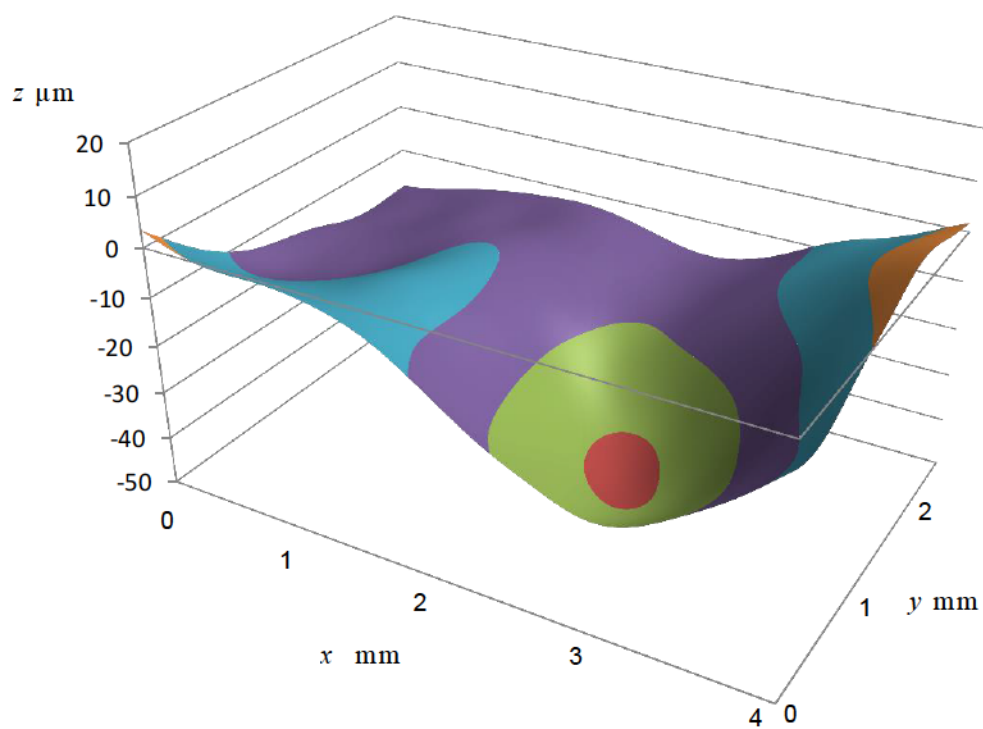


図 4.3 外れ値が含まれる場合の 1D-FMGF 出力結果  
( $x \rightarrow y$  方向)

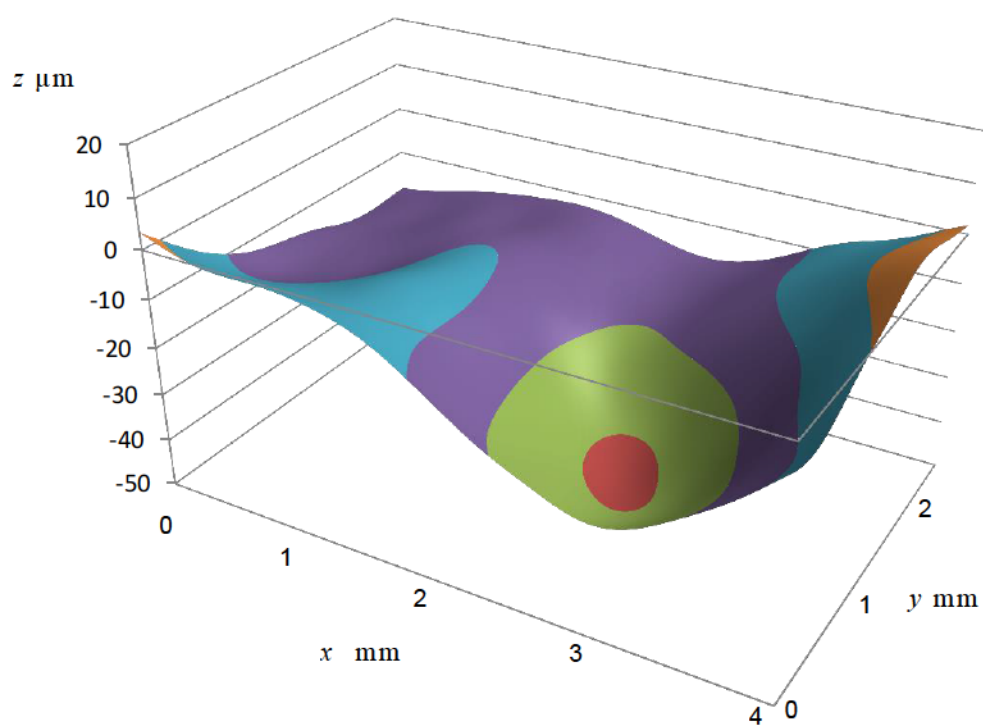


図 4.4 外れ値が含まれる場合の 1D-FMGF 出力結果  
( $y \rightarrow x$  方向)

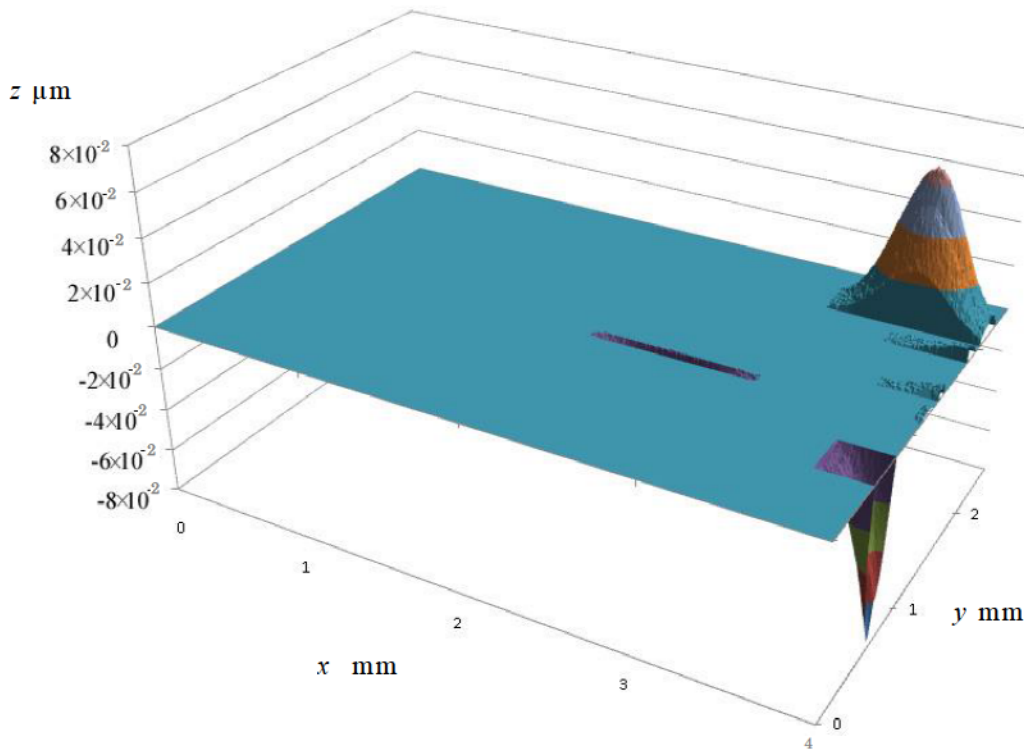


図 4.5 外れ値が含まれる場合の 1D-FMGF 出力の差  
( $x \rightarrow y$  方向と  $y \rightarrow x$  方向)

図 4.6 は，1 次元 FMGF を  $x, y$  方向の順番に適用した場合と， $y, x$  方向に順番に適用した場合の振幅伝達特性の偏差である．振幅伝達特性ベースで見ても，フィルタ出力ベースで見た時と同様に，偏差が発生し一致していない．

フィルタを適用する順番によって平均面が異なると，最終的な粗さも変わってしまう．そのようなフィルタは三次元表面性状に用いる事ができないため，FMGF を三次元表面性状に対応できるように改善する必要がある．なお，三次元表面性状に適用する場合のガウシアンフィルタの振幅伝達特性は図 4.7 のようにきれいな円状の等高線を描く．また，図 4.8 は外れ値がない場合の FMGF の振幅伝達特性であるが，こちらも線状の二次元表面性状の時と同様にガウシアンフィルタと同等となる．



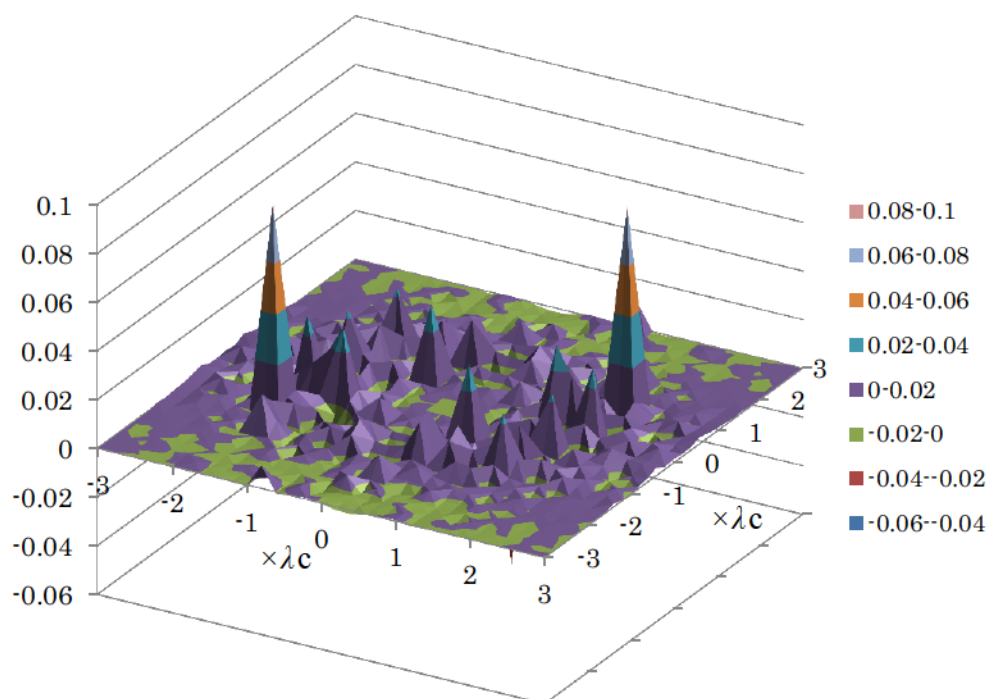


図 4.6 1D-FMGF の方向特性（振幅伝達特性ベース）

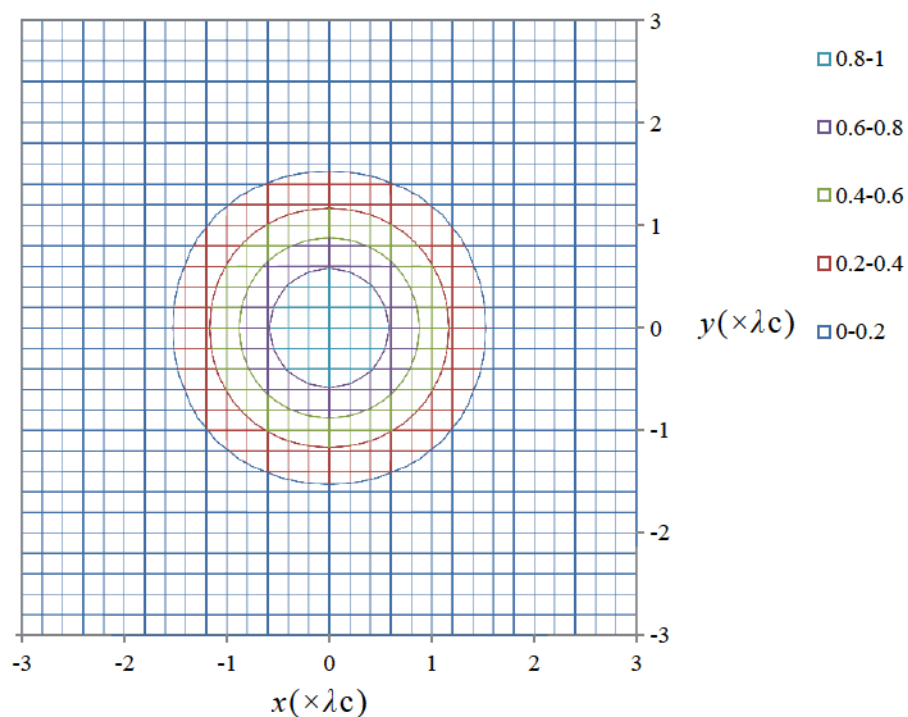


図 4.7 三次元表面性状に適用する場合の  
ガウシアンフィルタの振幅伝達特性

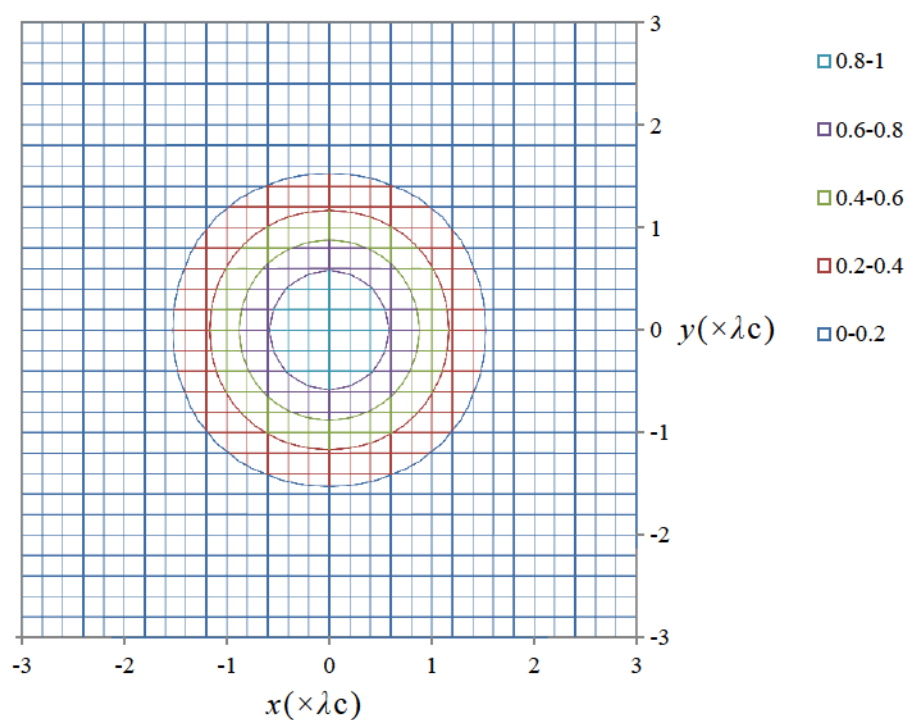


図 4.8 三次元表面性状に 1D-FMGF を適用した場合の  
振幅伝達特性（外れ値なし）

## 4.2 三次元表面性状用 FMGF の提案

一般的に，三次元表面性状計測データにフィルタを適用するとなると，二次元表面性状用の 1 次元フィルタを  $x$ ,  $y$  両方向に繰り返し適用する方法（図 4.9）や，円形の 2 次元フィルタを適用する方法が考えられる．

FMGF の場合，1 次元フィルタを  $x$ ,  $y$  両方向に繰り返し適用する方法では，図 4.2 のように，外れ値がある場合はフィルタを適用する方向の順番により振幅伝達特性も異なってしまう．これは，FMGF ではある点のデータが外れ値とみなされるかどうかはフィルタを適用する範囲内に含まれるデータの分布に依存する．外れ値でなければガウシアンフィルタと同じ重みになるが，外れ値の重みはその外れ度合いによって異なる．1 次元フィルタを繰り返し適用する場合，その範囲は  $x$  座標， $y$  座標毎の範囲となる．よって，外れ値が含まれる場合，フィルタを適用する方向の順番が異なると，フィルタをかける段階・範囲での外れ値の外れ度合いが微妙に異なってしまうために差が生じてしまい，方向特性を満たすことができない．

円形の 2 次元フィルタを適用する方法では，方向特性問題は起きない．しかし，「高速計算性」に問題があり，三次元表面性状用 2 次元フィルタの四大特性全てを満たすことができないため，根本的解決にはならない．

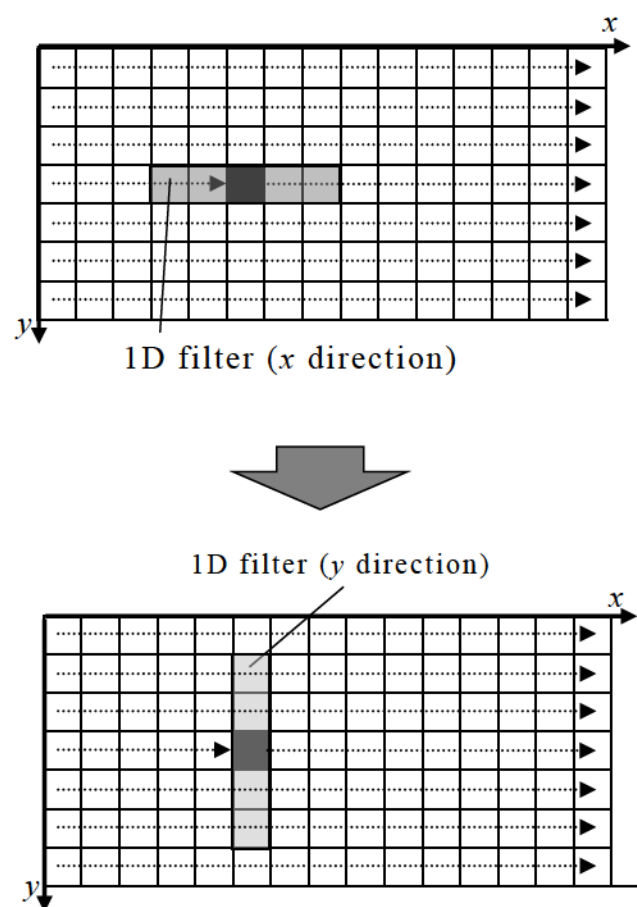


図 4.9 1次元フィルタの2方向適用

ところで、FMGF の処理手順は、離散化してセルに重みを配置した後、その重みに対し測定方向にガウシアンフィルタを適用する。その後、 $z$  方向に、基本幅内の誤差推定関数がガウシアンフィルタと同じでありながら基本幅の外では誤差推定関数の値が小さくなる 2 次 B スプライン基底関数を適用する。そして、最後に最大点となる  $z$  座標を求め出力する。

4.1 の実験では、 $x$  座標、 $y$  座標毎に FMGF 出力まで行なってから次の  $x$  座標、 $y$  座標毎に移っていたが、このガウシアンフィルタを適用するステップを変更する。具体的には、図 4.10 のように面全ての重みに対し  $x, y$  の 2 方向に 1 次元ガウシアンフィルタを適用し終えた後、最後に  $z$  方向に 2 次 B スプライン基底関数を適用して出力を得るようにする。 $x, y$  方向に適用するのは 1 次元ガウシアンフィルタであり、1 次元ガウシアンフィルタを直交する 2 方向に適用した出力は、フィルタを適用する方向の順番によらず出力は一致する。そのため、この方法なら 2 次 B スプライン基底関数を適用する段階において、各  $(x, y)$  座標に含まれる重みの分布も 1 次元ガウシアンフィルタをかける方向の順番によらない。このため、フィルタを適用する方向の順番により振幅伝達特性が異なる方向特性問題の解決が期待できる。

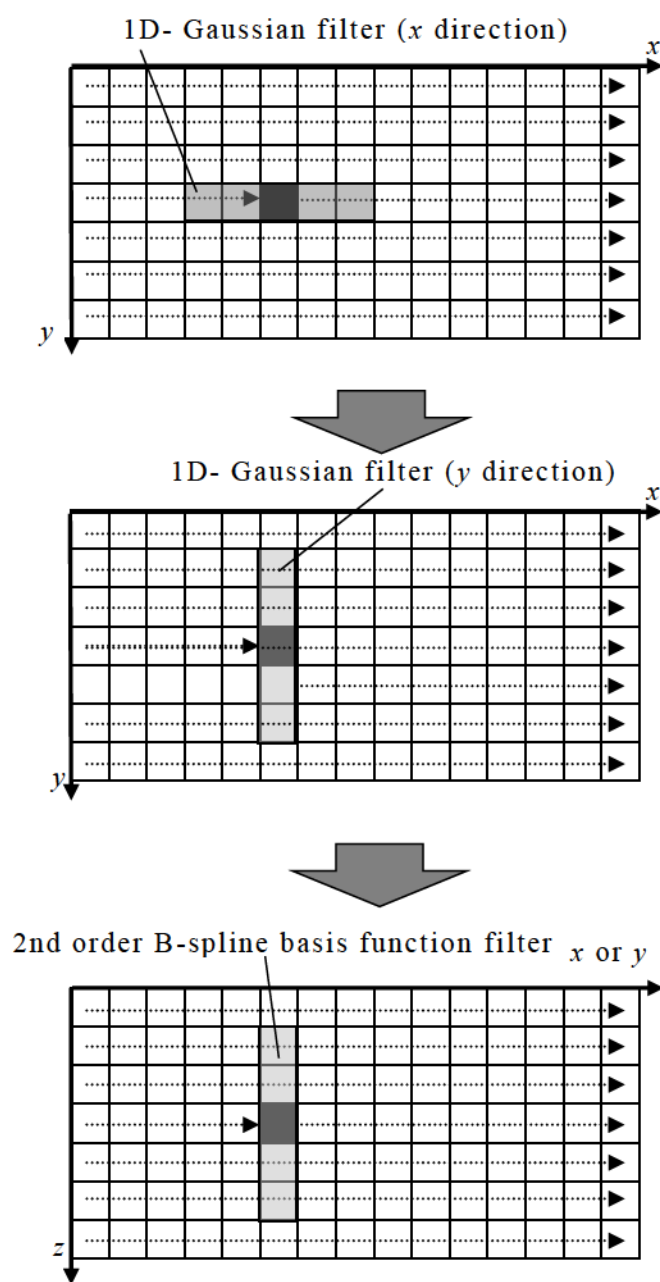


図 4.10 三次元表面性状用 FMGF の処理手順

### 4.3 三次元表面性状用 FMGF 実験概要

4.2 で提案した，新しい三次元表面性状用 FMGF の検証実験を行なう．

4.4 と 4.5 では，従来の FMGF の問題であった外れ値が含まれる場合の方向特性問題が解決したか確認する．4.4 では出力ベースでの検証を行なう．4.5 では新しい三次元表面性状用 FMGF の振幅伝達特性を確認し，方向特性問題が解決したか確認する．

4.6 と 4.7 では外れ値が含まれない場合の検証を行ない，ガウシアンフィルタとの特性一致が崩れていないか確認する．4.6 では出力ベースでの検証を行なう．また，4.7 では振幅伝達特性ベースで検証を行ない，新しい三次元表面性状用 FMGF が三次元表面性状に適用して問題がないか確認する．

#### 4.4 外れ値の含まれる場合（出力ベース）

図 4.11 と図 4.12 は，図 4.2 のスパイク状の外れ値が含まれるデータを入力データとした，新しい三次元表面性状用 FMGF の出力結果である，図 4.11 は 1 次元ガウシアンフィルタを適用する方向の順番が  $x$  から  $y$  の場合である．また，図 4.12 は 1 次元ガウシアンフィルタを適用する方向の順番が  $y$  から  $x$  の場合である．図 4.11 や図 4.12 を比べても，目視では差は認識できない．図 4.13 は，図 4.11 と図 4.12 の偏差・1 次元ガウシアンフィルタを適用する方向の順番が  $x$  から  $y$  と  $y$  から  $x$  の場合の偏差である．図 4.11 と図 4.12 のレンジだけでなく，図 4.13 のように偏差を取り，非常に細かいレンジで確かめても，1 次元ガウシアンフィルタを適用する方向の順番による出力値の差は全く確認されなかった．

以上のことより，新しい三次元表面性状用 FMGF は，出力値ベースで FMGF の方向特性問題が解決したことが確認された．



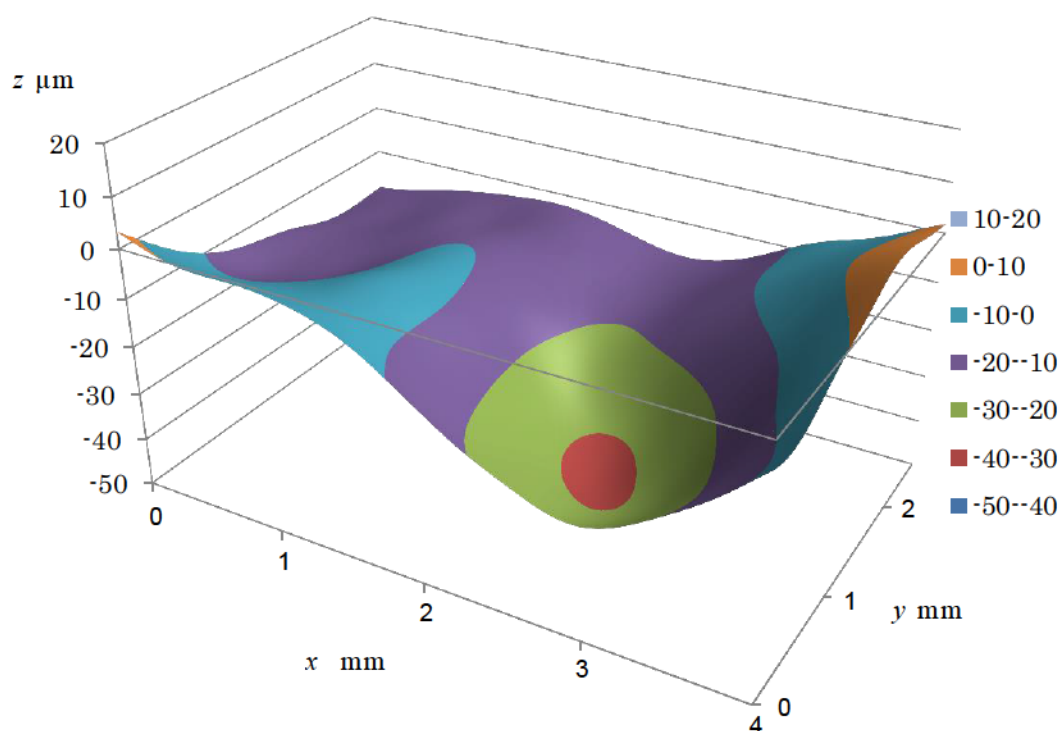


図 4.11 外れ値が含まれる場合の三次元表面性状用 FMGF 出力結果 ( $x \rightarrow y$  方向)

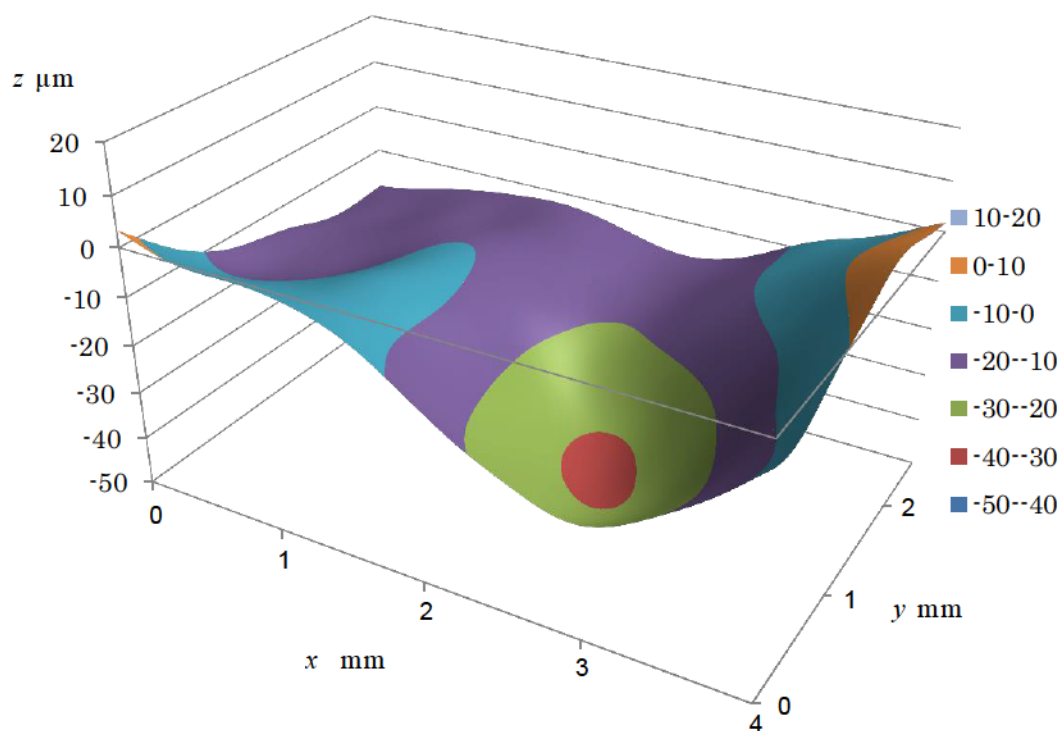


図 4.12 外れ値が含まれる場合の三次元表面性状用 FMGF 出力結果 ( $y \rightarrow x$  方向)

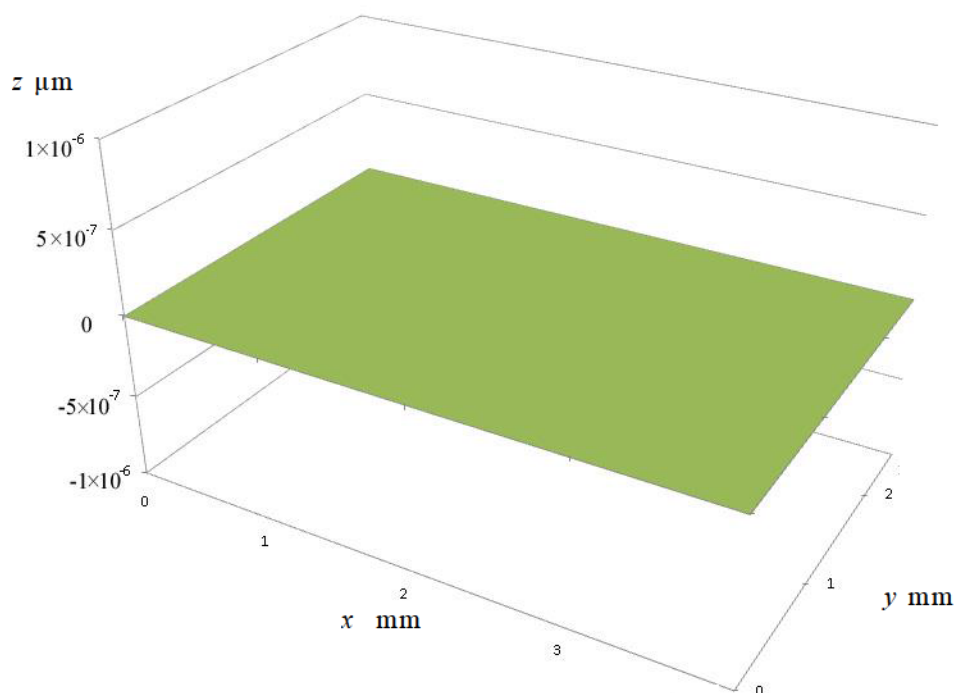
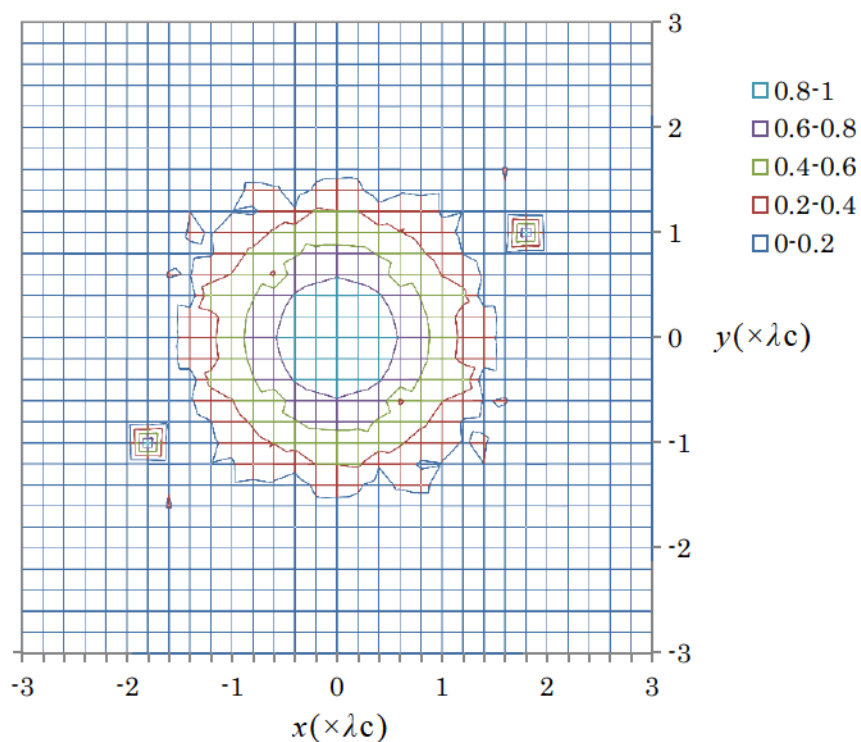


図 4.13 外れ値が含まれる場合の三次元表面性状用  
FMGF 出力結果の差  
(1次元ガウシアンフィルタの適用方向順：  
 $x \rightarrow y$ 方向と  $y \rightarrow x$ 方向)

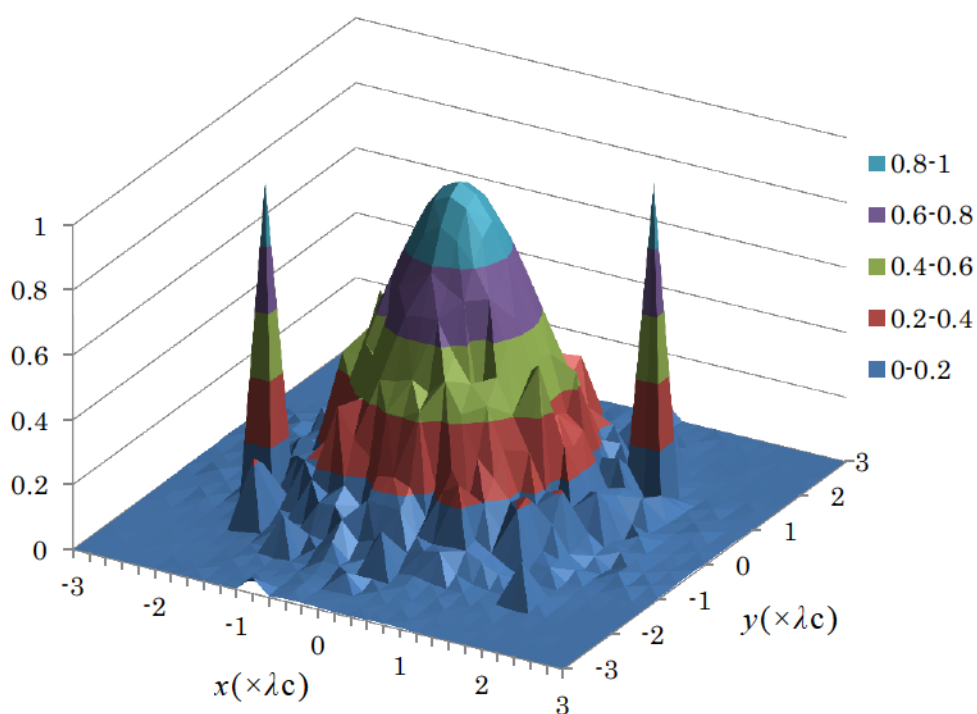
#### 4.5 外れ値の含まれる場合（振幅伝達特性ベース）

図 4.14, 図 4.15 は, 新しい三次元表面性状用 FMGF を用いて求めた, 外れ値が含まれる場合の振幅伝達特性である. なお, 入力データは図 4.1 のデータにスパイク状の外れ値を 1 点印加した入力データを用いている. 図 4.14 は 1 次元ガウシアンフィルタを適用する方向の順番が  $x$  から  $y$  の場合であり, 図 4.15 は 1 次元ガウシアンフィルタを適用する方向の順番が  $y$  から  $x$  の場合である. なお, 図 4.14 と図 4.15 のそれぞれ (a) は等高線図, (b) は鳥瞰図である.

図 4.16 は, 新しい三次元表面性状用 FMGF を適用する順番を  $x, y$  方向の順番にした場合と,  $y, x$  方向の順番にした場合の振幅伝達特性の偏差である. 1 次元 FMGF を繰り返し適用した際と異なり, FMGF のガウシアンフィルタを適用するステップの  $x$  方向  $y$  方向の順番を変えても, 外れ値が含まれない場合と同様に完全一致した. よって外れ値がある場合にもフィルタを適用する方向の順番に依らず出力・振幅伝達特性は一致しており, 1 次元 FMGF を繰り返し適用した際に生じていた方向特性問題は解決された.

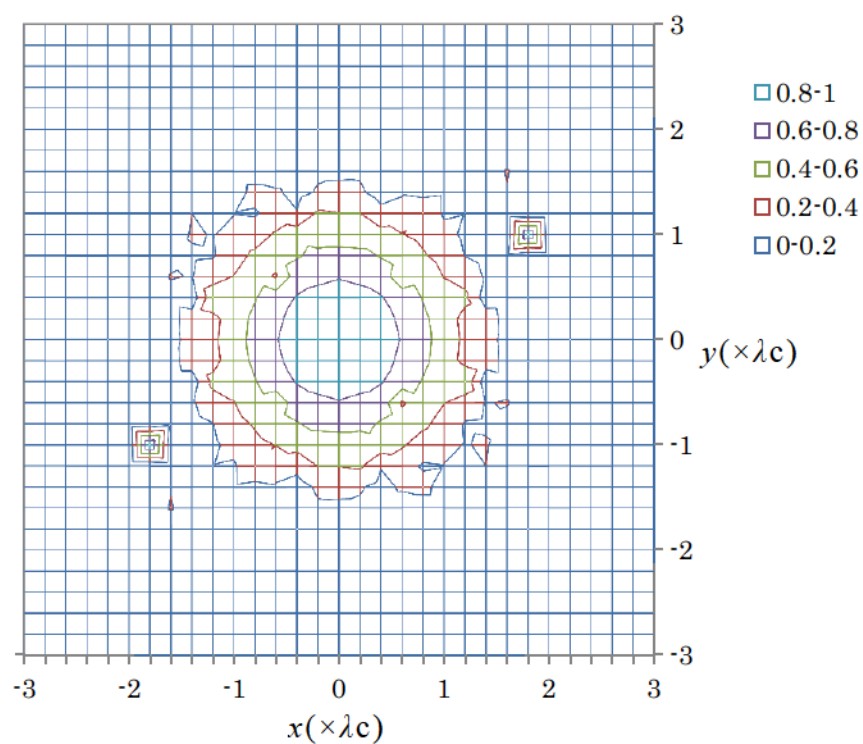


(a) 等高線図

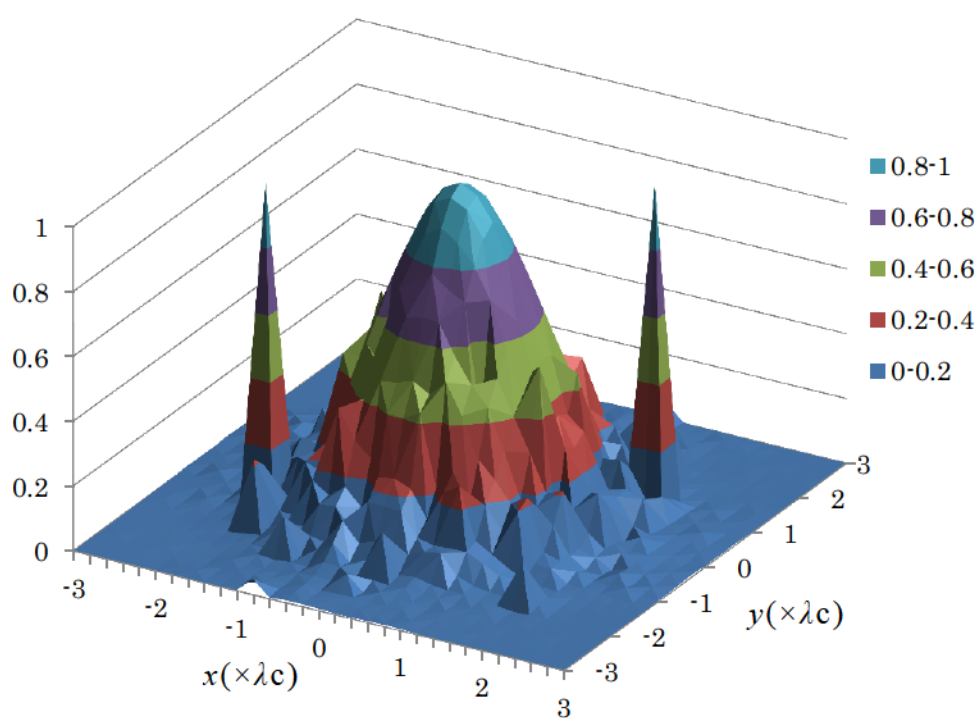


(b) 鳥瞰図

図 4.14 外れ値が含まれる場合の三次元表面性状用 FMGF の振幅伝達特性  
(1次元ガウシアンフィルタの適用方向順： $x \rightarrow y$ 方向)



(a) 等高線図



(b) 鳥瞰図

図 4.15 外れ値が含まれる場合の三次元表面性状用 FMGF の振幅伝達特性  
(1次元ガウシアンフィルタの適用方向順： $y \rightarrow x$ 方向)

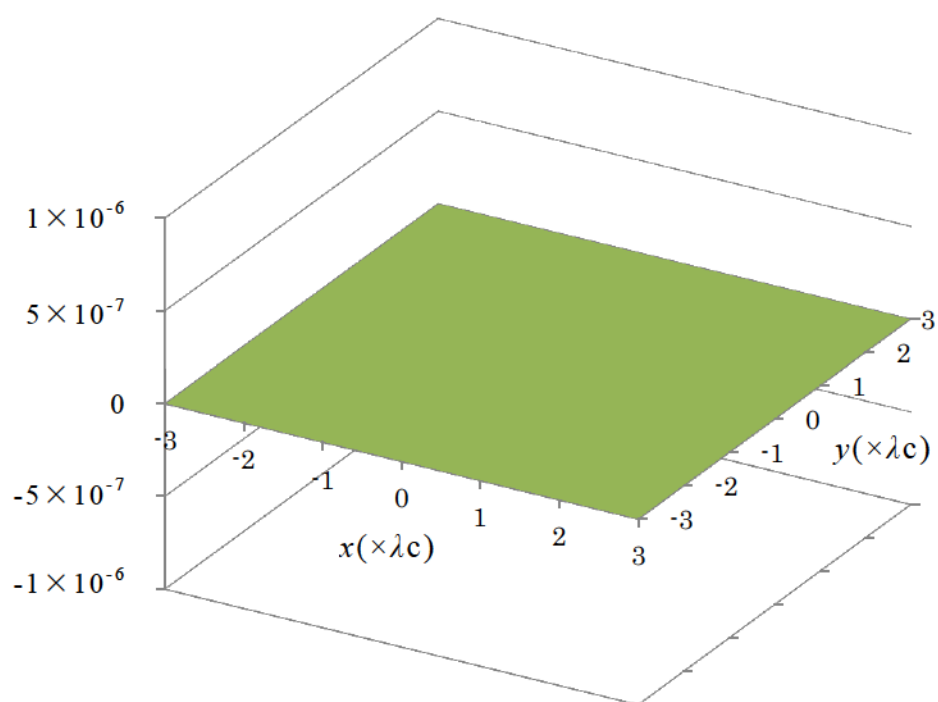


図 4.16 外れ値が含まれる場合の三次元表面性状用 FMGF の振幅伝達特性のフィルタ適用方向による偏差

#### 4.6 外れ値が含まれない場合（出力ベース）

新しい三次元表面性状用 FMGF が，外れ値がない場合でも方向特性問題が発生しないか検証する．また，新しい三次元表面性状用 FMGF がガウシアンフィルタとの特性一致が崩れていないか，外れ値がない場合の三次元表面性状用 FMGF の出力とガウシアンフィルタの出力を比較する．

図 4.17 と図 4.18 は，図 4.1 の外れ値が含まれないデータを入力データとした，新しい三次元表面性状用 FMGF の出力結果である．図 4.17 は 1 次元ガウシアンフィルタを適用する方向の順番が  $x$  から  $y$  の場合である．また，図 4.18 は 1 次元ガウシアンフィルタを適用する方向の順番が  $y$  から  $x$  の場合である．図 4.19 は，図 4.17 と図 4.18 の偏差である．図 4.17 と図 4.18 のレンジだけでなく，図 4.19 のように偏差を取っても，1 次元ガウシアンフィルタを適用する方向の順番による出力値の差は全くなく，出力値ベースで FMGF の方向特性問題を解決したことが確認できた．

図 4.20 は，図 4.1 の外れ値が含まれないデータを入力データとした，新しい三次元表面性状用 FMGF の出力結果とガウシアンフィルタ出力結果との偏差である．差は全くなく，新しい三次元表面性状用 FMGF は，出力ベースでガウシアンフィルタとの特性一致は崩れていないことが確認できた．

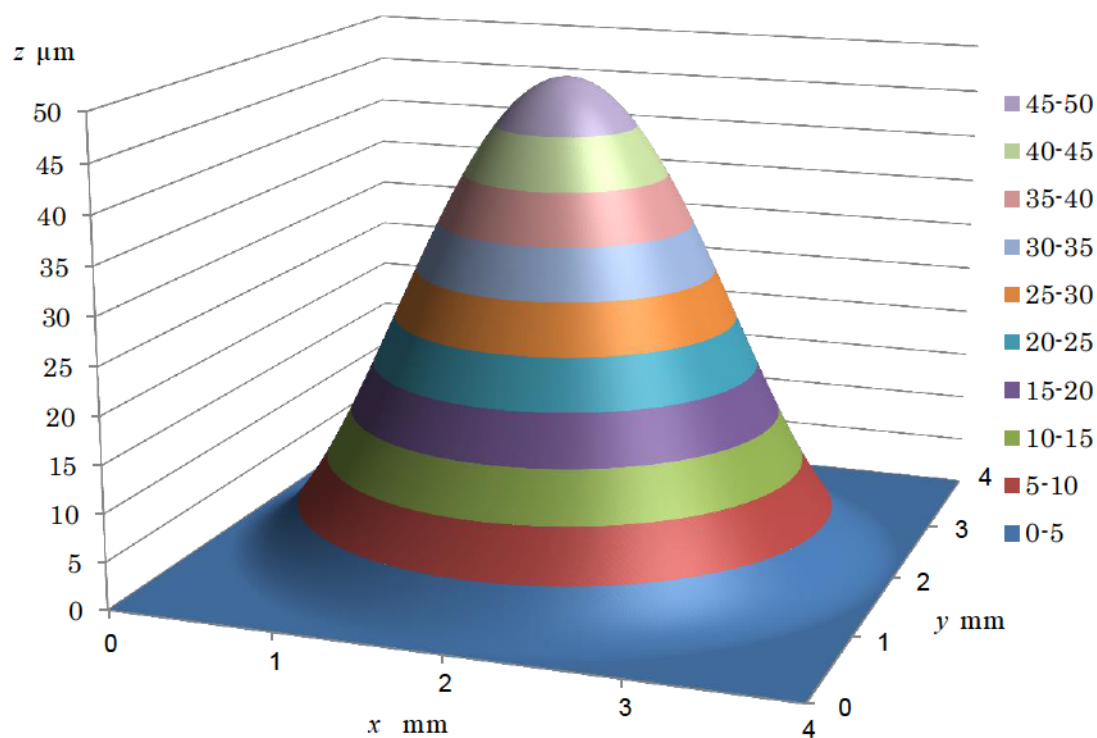


図 4.17 外れ値が含まれない場合の三次元表面性状用 FMGF 出力結果 ( $x \rightarrow y$  方向)

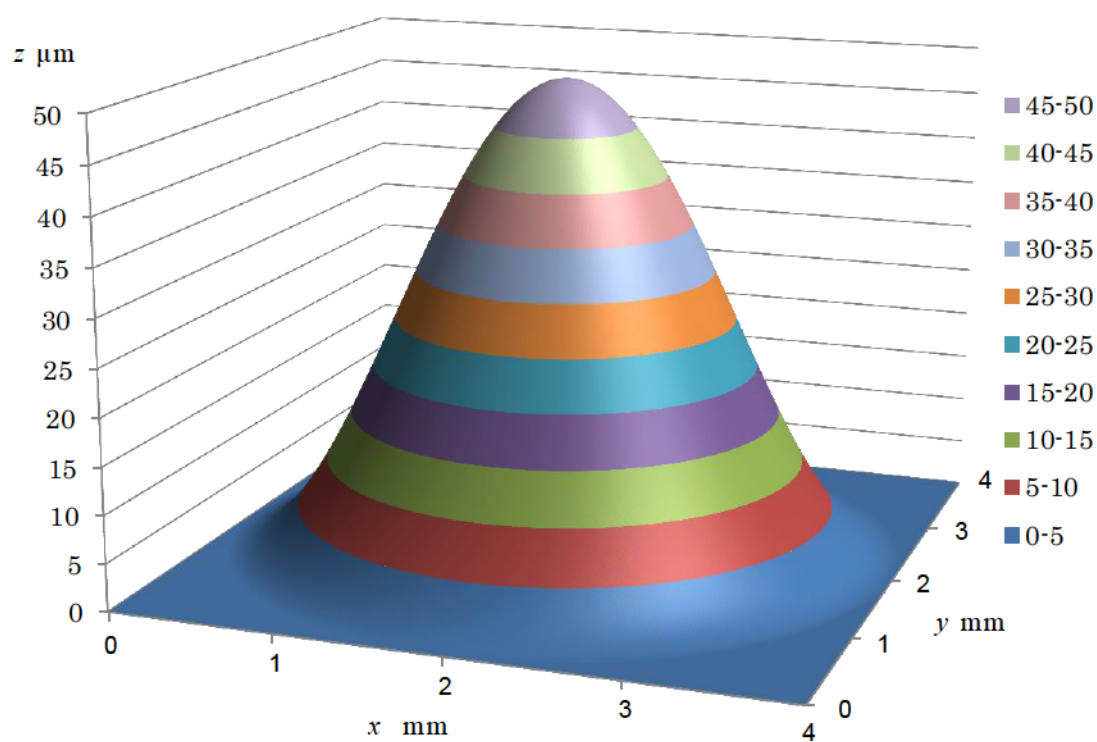


図 4.18 外れ値が含まれない場合の三次元表面性状用 FMGF 出力結果 ( $y \rightarrow x$  方向)



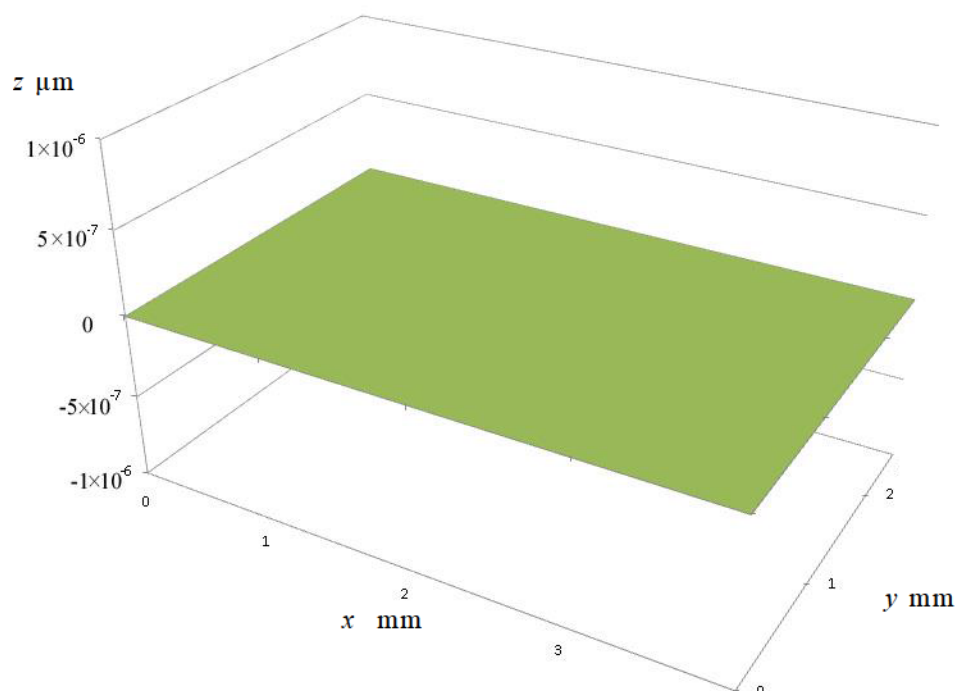


図 4.19 外れ値が含まない場合の三次元表面性状用 FMGF  
出力結果の差  
(1次元ガウシアンフィルタの適用方向順： $x \rightarrow y$ 方向と  
 $y \rightarrow x$ 方向)

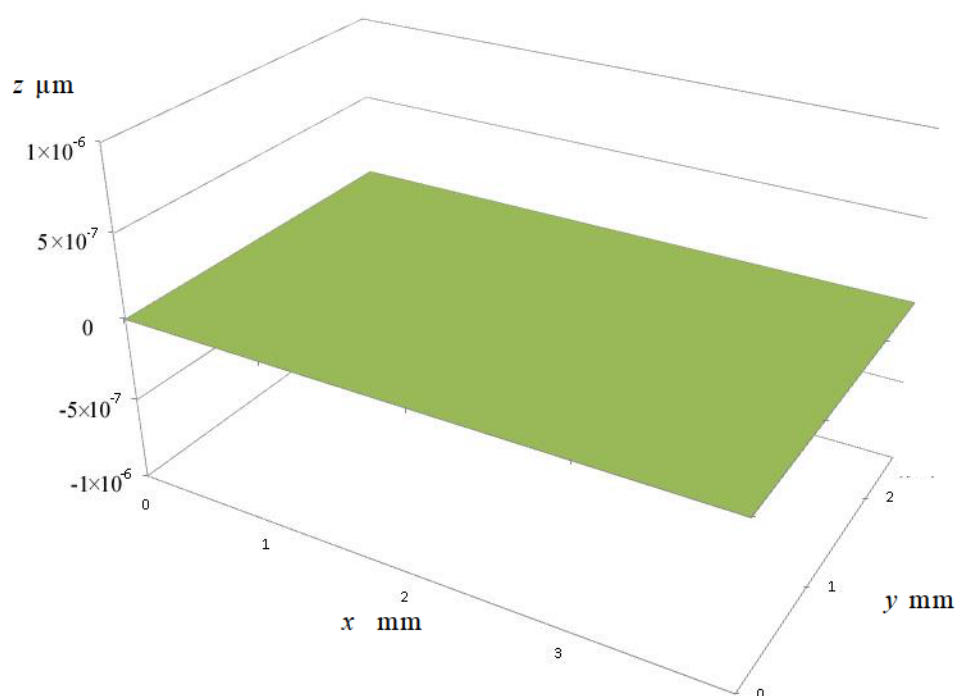


図 4.20 外れ値が含まない場合の三次元表面性状用 FMGF  
出力とガウシアンフィルタ出力との差

#### 4.7 外れ値が含まれない場合（振幅伝達特性ベース）

新しい三次元表面性状用 FMGF が，外れ値がない場合のガウシアンフィルタとの特性一致が崩れていないか，外れ値がない場合の三次元表面性状用 FMGF の振幅伝達特性も確認する．

図 4.21 と図 4.22 は，外れ値がない場合の三次元表面性状用 FMGF の振幅伝達特性である．図 4.21 は 1 次元ガウシアンフィルタを適用する方向の順番が  $x$  から  $y$  の場合であり，図 4.22 は 1 次元ガウシアンフィルタを適用する方向の順番が  $y$  から  $x$  の場合である．図 4.23 は，新しい三次元表面性状用 FMGF を適用する順番を  $x, y$  方向の順番にした場合と， $y, x$  方向の順番にした場合の振幅伝達特性の偏差である．フィルタを適用する方向の順番に依らず振幅伝達特性は一致した．よって，新しい三次元表面性状用 FMGF は，従来の FMGF に存在した方向特性問題が完全に解決しただけでなく，新たな問題も発生していないことが確認できた．

以上のことより，三次元表面性状用 FMGF は三次元表面性状に適用して問題ないことが確認でき，従来の FMGF に存在していた問題の 1 つが解決した．

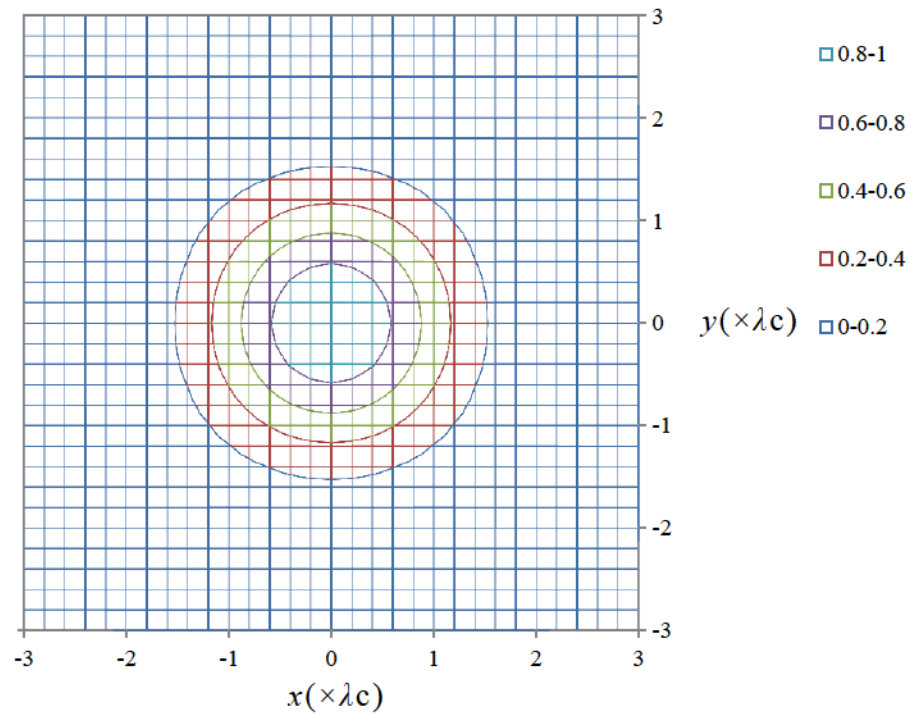


図 4.21 三次元表面性状用 FMGF の振幅伝達特性  
(1次元ガウシアンフィルタの適用方向順： $x \rightarrow y$ 方向)

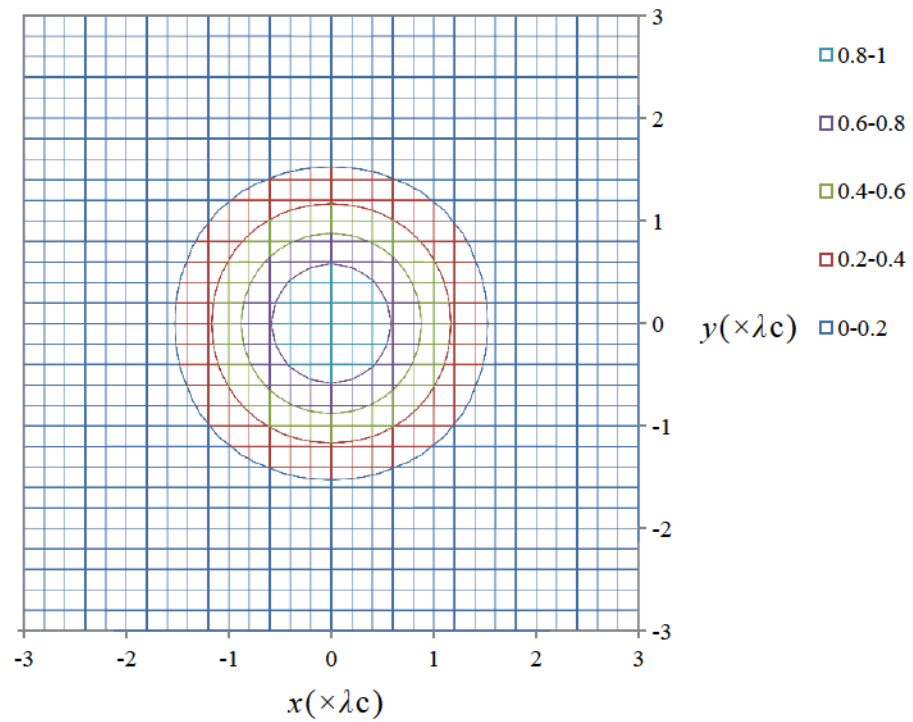


図 4.22 三次元表面性状用 FMGF の振幅伝達特性  
(1次元ガウシアンフィルタの適用方向順： $y \rightarrow x$ 方向)

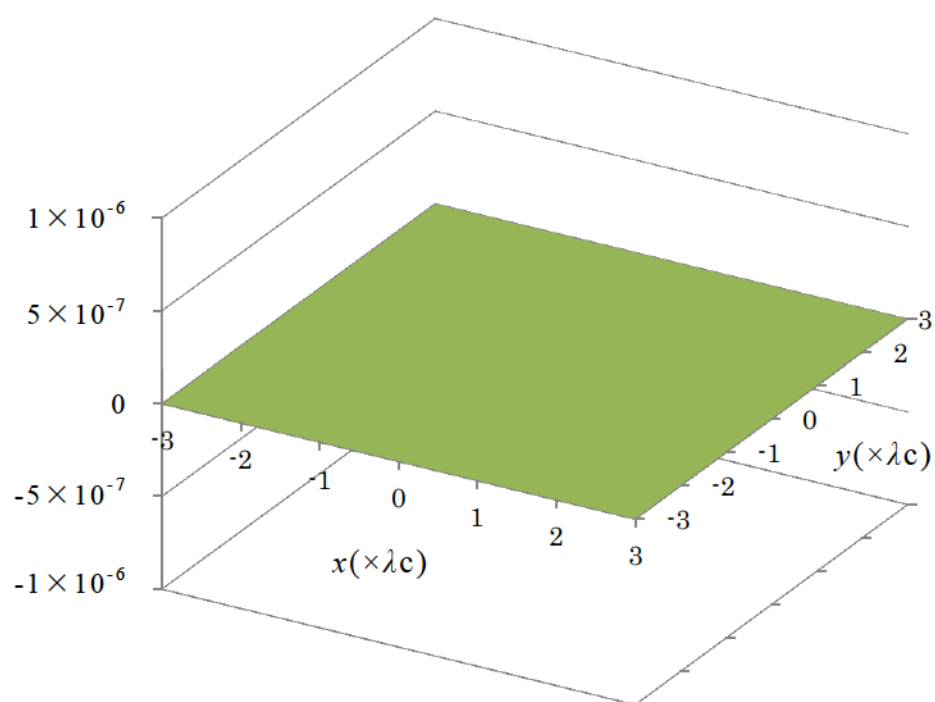


図 4.23 外れ値が含まれない場合の三次元表面性状用 FMGF の振幅伝達特性のフィルタ適用方向による偏差

## 4.8 ロバスト性を発揮した際の三次元表面性状用フィルタの振幅伝達特性の特徴検証概要

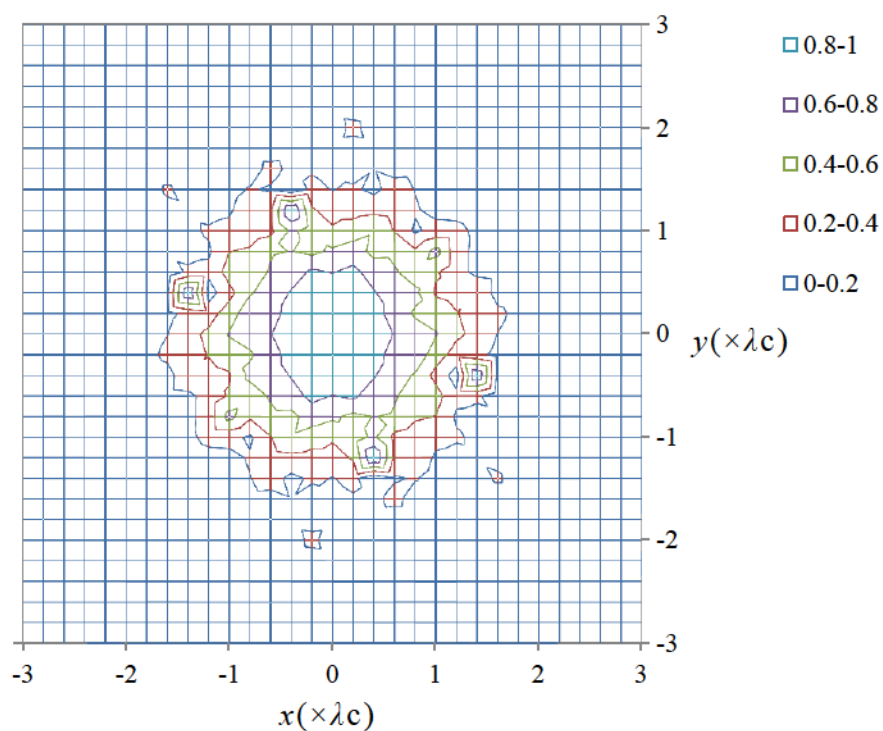
4.7 までで、新しい三次元表面性状 FMGF の外れ値が含まれる場合の方向特性問題が解決し、外れ値がある場合とない場合の振幅伝達特性も明らかになった。引き続き、これまで不明であった ISO 16610-31 [GRF]の、外れ値が含まれる場合と含まれない場合の振幅伝達特性も明らかにする。そして、ロバストフィルタがロバスト性を発揮した際の振幅伝達特性に共通傾向が見られるか、ISO 16610-31 [GRF]の振幅伝達特性と FMGF の振幅伝達特性とを比較することにより確認する。

まずは 4.9 で、外れ値がない場合の ISO 16610-31 [GRF]の振幅伝達特性を確かめる。4.10 では外れ値がある場合の ISO 16610-31 [GRF]の振幅伝達特性を確かめる。そして、外れ値がある場合の FMGF の振幅伝達特性との共通点を探ることにより、ロバストフィルタがロバスト性を発揮した際の振幅伝達特性に共通傾向が存在するか確かめる。

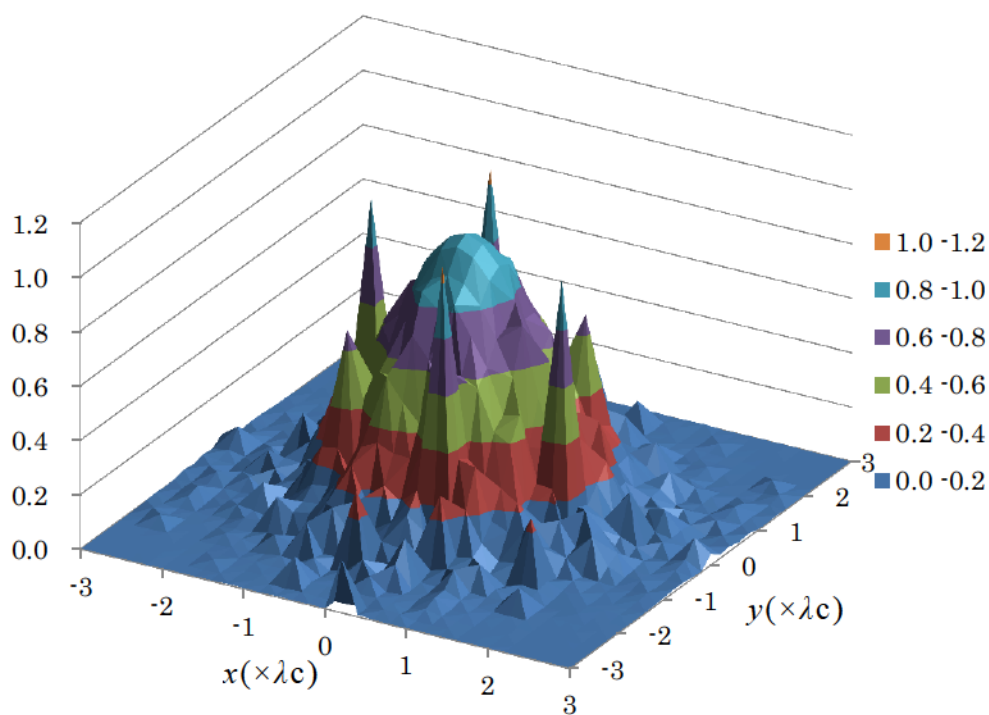
## 4.9 外れ値がない場合の ISO 16610-31 [GRF]の振幅伝達特性

まずは、外れ値がない場合の ISO 16610-31 [GRF]の振幅伝達特性を明らかにする．図 4.24 は、外れ値がない場合の ISO 16610-31 [GRF]の振幅伝達特性である．図 4.24(a)は等高線図で、図 4.24(b)は鳥瞰図である．外れ値はないが、ガウシアンフィルタの振幅伝達特性と異なった．また、円状の等高線にもならず等方性も満たしていなかった．他の特徴としては、位置や数は異なるものの FMGF がロバスト性を発揮した時と同様に角のような突起が見られる．この共通点より、外れ値はないがロバスト性が過剰に発揮されたことによって生じたと考えられる．このように、ロバストなフィルタがロバスト性を発揮した際には、振幅伝達特性にこのような角のような突起が生じ、形もひずんで等方性を満たさなくなるということは共通の特徴と考えられる．

また、ISO 16610-31 [GRF]は入力データが異なると図 4.24 とも異なる振幅伝達特性となった．以上の事より、ISO 16610-31 [GRF]の振幅伝達特性は外れ値がなくてもガウシアンフィルタの振幅伝達特性と異なる、かつ一意にすら決まらない事が判明した．



(a) 等高線図



(b) 鳥瞰図

図 4.24 外れ値が含まれない場合の ISO 16610-31 [GRF] の振幅伝達特性例



## 4.10 外れ値がある場合の ISO 16610-31 [GRF]の振幅伝達特性

引き続き，外れ値がある場合の ISO 16610-31 [GRF]の振幅伝達特性を明らかにする．図 4.25 は，外れ値がある場合の ISO 16610-31 [GRF]の振幅伝達特性である．外れ値がない場合に比べ，より大きな角状の突起が見られる．この大きな角状の突起は，同じ外れ値が含まれた入力データを用いた FMGF の振幅伝達特性である図 4.14 と図 4.15 の大きな角状の突起と同じ位置であった．

スパイク状の外れ値に対してロバスト性を発揮するということは，スパイク状の外れ値（高周波成分）の影響を相殺する必要がある．よって，該当する周波数成分の振幅伝達率は負の値になる．しかし，これら振幅伝達特性の図は絶対値で表現しているので，正の値に大きく振れて角状の突起となって表れる．よって，この大きな角状の突起部分が，スパイク状の外れ値に対してロバスト性を発揮した特徴であるとともに，ロバスト性を発揮した証拠といえる．

また，角状の突起部分の大きさより，ISO 16610-31 [GRF]は外れ値がなくてもロバスト性を過剰に発揮するが，外れ値に対してはより強くロバスト性を発揮していることも見てとれる．

以上より，ロバストなフィルタがロバスト性を発揮した際には，振幅伝達特性に角のような突起が生じ，形もひずんで等方性を満たさなくなるということは共通の特徴であることが判明した．



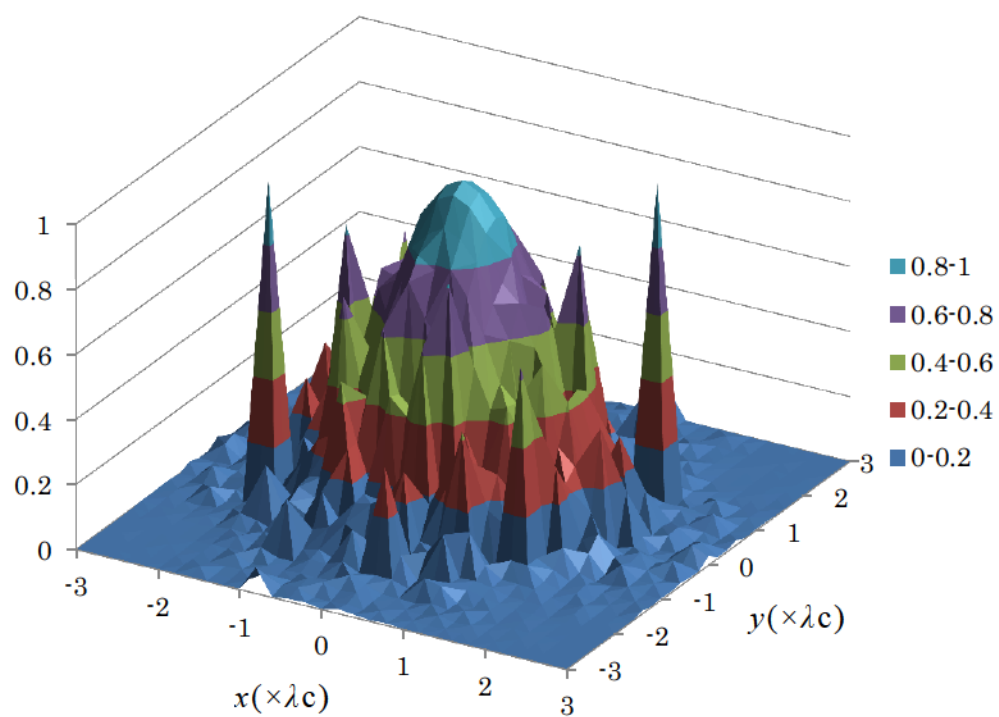


図 4.25 外れ値が含まれる場合の ISO 16610-31 [GRF] の  
振幅伝達特性例

#### 4.11 FMGF の三次元表面性状対応まとめ

FMGF の処理手順を見直し，新たに三次元表面性状用 FMGF を提案した．従来の 1 次元 FMGF を 2 方向に適用する方法では，外れ値が存在しない場合は問題がなかった．しかし，外れ値が存在する場合は他のロバストフィルタと同様に，1 次元フィルタを適用する方向の順番によって最終的な出力結果が異なり，方向特性問題が存在していた．よって，従来の FMGF は，三次元表面性状に適用することに問題があった．しかし，三次元表面性状用 FMGF は，外れ値が存在しない場合だけでなく，外れ値が存在する場合でも，1 次元フィルタを適用する方向の順番によらずに最終的な出力結果が一意に決まるようになり，方向特性問題を解決した．よって，従来の FMGF の問題の 1 つが解決した．

また，三次元表面性状用 FMGF の振幅伝達特性も確認した．その結果，外れ値が存在しない場合は，フィルタ出力結果だけでなく，振幅伝達特性もガウシアンフィルタの振幅伝達特性と一致することを確認した．

また，ISO 16610-31 [GRF]の振幅伝達特性は，外れ値が存在する場合だけでなく，外れ値が存在しない場合でも，ベースとなるガウシアンフィルタの振幅伝達特性と大きく異なることが判明した．さらにそれだけでなく，ISO 16610-31 [GRF]の振幅伝達特性は入力データにより異なり，一意にも決まらないことが判明した．これは，ISO 16610-31 [GRF]は振幅伝達特性の保証が一切されないということであり，ISO 16610-31 [GRF]の特性を示すうえで非常に大きな問題である．

さらに，世界で初めてロバストフィルタがロバスト性を発揮した際の振幅伝達特性を確認した．その結果，ロバストなフィルタがスパイク状の外れ値に対しロバスト性を発揮した際には，振幅伝達特性に角のような突起が生じ，形もひずんで等方性を満たさなくなる

ということが，ロバストフィルタがロバスト性を発揮した際の共通の特徴であることが確認された．

表 4.1 に，この章での成果後の FMGF と他フィルタの，三次元表面性状フィルタに求められる四大特性の達成状況を示す．なお，ガウシアンフィルタのガウシアンフィルタとの特性一致はそのものであるため自明であり除外している．FMGF のみが 4 つすべての条件を満たしている．

表 4.1 各フィルタの四大特性達成状況

	GF	FMGF	GRF
GF との特性一致	—	◎	×
方向特性	◎	◎	×
ロバスト性	×	○	○
高速計算性	◎	○	×

---

---

# 第 5 章

## FMGF のロバスト性強化

---

---

### 5.1 FMGF のロバスト性調整新手法

FMGF のロバスト性の高さは、 $z$  方向に適用する 2 次 B スプライン基底関数の基本幅分割数  $m$  に依存する．この  $m$  の値が大きいとロバスト性は低くガウシアンフィルタとの一致性が高くなり，小さいとロバスト性が高くガウシアンフィルタとの一致性が下がる．よって，FMGF のロバスト性の調整はこの  $m$  の値の設定が重要となる．なお，これまでの実験から， $m$  の値は  $x$  座標毎に重みの存在するセルの数を計算し，そのセルの数の平均  $\mu$  と分散  $\sigma^2$  をもとに  $m = \mu + 2\sigma$  で設定すると，ロバスト性とガウシアンフィルタとの特性一致のバランスの良い結果が得られる傾向がある．なお，処理の都合上  $m$  の値は奇数が望ましいので， $\mu + 2\sigma$  を超える最小の奇数に繰り上げる．

そして，ロバスト処理が行われる FMGF の出力プロセスには， $x$  座標毎に独立して行なわれるという特殊な性質がある．ということは，FMGF のロバスト性は  $x$  座標毎に変えることが可能ということである．他のロバストフィルタも，ロバスト性を調整するパラメー

タの値を変えることにより、ロバスト性の程度を変えることは可能である。しかし、 $x$  座標毎にロバスト性を変えることができるのは、FMGF 以外には見られない特性である。

この特性を基に、FMGF の新たなロバスト性強化手法を提案する。手順としては、まずは一度通常の FMGF とガウシアンフィルタの処理を行なった後、両フィルタ出力を比較する。そして、ロバスト性改良 FMGF では、値が一致した  $x$  座標はそのまま出力を行ない、値が異なった  $x$  座標のみ  $m$  の値を小さくして再演算を行ない、ロバスト性を強化・調整できるようにする。これにより、ロバスト性改良 FMGF は外れ値がない場合のガウシアンフィルタとの特性一致を維持しつつ、外れ値に対してのみさらにロバスト性が強化されることが期待できる。このロバスト性改良 FMGF の処理の流れを図 5.1 に示す。

一方、このロバスト性調整・強化処理を行うことにより、通常の FMGF と比べて処理時間の増加が見込まれる。

まずは通常の FMGF とガウシアンフィルタの出力結果を比較するために、ガウシアンフィルタの処理時間が加わる。しかし、ガウシアンフィルタの処理時間は FMGF の処理時間と比べて短い時間であるので増加量は小さい。また、通常のガウシアンフィルタの代わりに、通常のガウシアンフィルタと等価である量子化ガウシアンフィルタを用いれば、FMGF の処理途中データを用いて、推定値出力プロセスの追加のみでガウシアンフィルタと同等の出力が可能である。よって、通常の FMGF 出力との比較処理を、ガウシアンフィルタ出力とでなく量子化ガウシアンフィルタ出力との比較処理にすれば、更に高速化できることが期待される。

比較用ガウシアンフィルタ処理以外の処理時間増加要素は、外れ値がない場合にはガウシアンフィルタ出力と比較する時間が増えるのみである。外れ値がある場合の再演算も、外れ値が 1 点のみの場合はフィルタ幅に相当する全データ数の  $1/5$  のみの再演算で済む。その再演算処理も、 $x$  方向へのガウシアンフィルタをかけるステッ

プまでの結果をそのまま再利用できる． よって， 総合的な処理時間増加量は多く見積もっても 1.5 倍程度に抑えることができると考えられる．

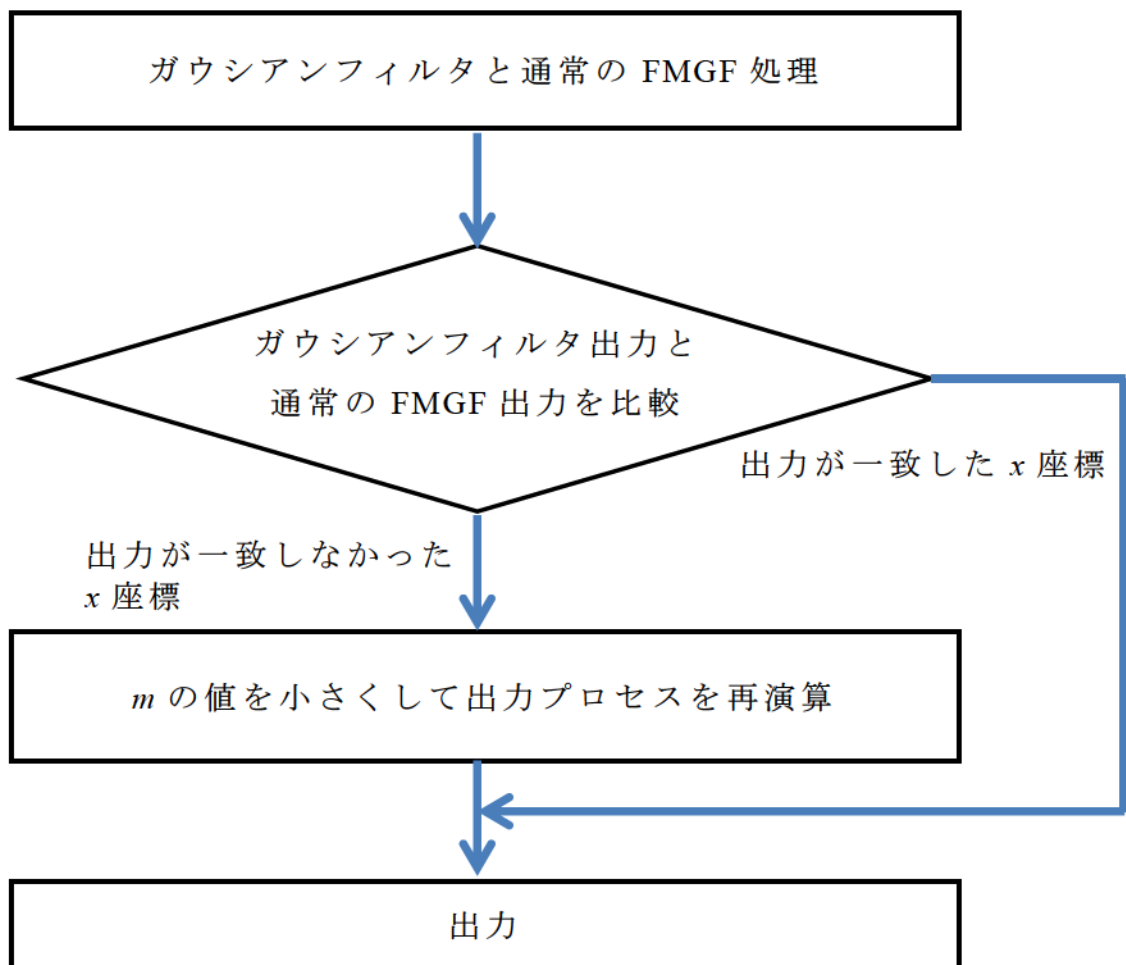


図 5.1 ロバスト性改良 FMGF のフローチャート



## 5.2 ロバスト性検証実験概要

5.1 で提案したロバスト性強化・調整を適用したロバスト性改良 FMGF のロバスト性検証実験を行なう．用いる計測データは外れ値が含まれる，外れ値部分の通常の FMGF 出力結果が ISO 16610-31 [GRF]出力よりもガウシアンフィルタ出力に近い計測データの場合と，外れ値部分の通常の FMGF 出力結果が ISO 16610-31 [GRF]出力よりもガウシアンフィルタ出力より遠い計測データの場合の両方で検証を行なう．また，再演算時の  $m$  の値をどの程度小さくするかは， $m = \mu + 2\sigma$  で設定された値を基準に，90%，80%，70%，60%，50% で検証を行なう．ただし，FMGF の処理の都合上， $m$  の値は奇数が望ましいため，奇数になるように調整を行なう．なお，奇数に調整する際，各％に小さくした  $m$  の値が，他の各％に小さくした  $m$  の値と等しくなる場合もありうるが，その場合は結果が同じとなるため片方を省略して実験を行なう．また，再演算を行なうかの判断基準である FMGF 出力とガウシアンフィルタ出力が一致しているかの判断は，小数点以下 6 桁の有効桁でわずかでも差があれば，出力が一致していないと判断し再演算を行なう．これら条件でロバスト性強化検証実験を進める．

まずは 5.3 で，通常の FMGF のロバスト性が ISO 16610-31 [GRF] より低い場合の検証を行なう．引き続き 5.4 で，提案手法を用いるまでもなく，通常の FMGF のロバスト性が ISO 16610-31 [GRF] より高い場合の検証を行なう．そして，5.5 でロバスト性改良 FMGF の処理時間検証を行なう．

なお，ロバスト性のないガウシアンフィルタ出力と比べて，スパイク状の外れ値の影響範囲でスパイクの方向と逆に離れているほどロバスト性が高いとする．ロバスト性の妥当性について述べる．ロバストフィルタのロバスト性は外れ値の重みを小さくする．しかし，その小さくする重みは 0 にするのが限界でマイナスになることはな

い．よって，外れ値として扱うかは別として，外れ値に対してはロバスト性が過剰に発揮されるということはないため，妥当性の基準としても問題はない．

なお，入力データの 1 点をスパイク状の外れ値に変更する前のガウシアンフィルタ出力値との一致性を見るという判断基準も考えられる．しかし，そのガウシアンフィルタ出力結果には，外れ値に差し替える前の元の入力値が影響している．ロバストフィルタがロバスト性を発揮するということは，あくまで外れ値の重みを小さくすることにより外れ値の影響を除去するという意味合いである．外れ値の値を元の差し替え前の入力値にするのとは全く異なる．よって，この基準は参考基準にはなりえても，一致性を突き詰める基準にはなりえない．なお，外れ値に差し替える前のその座標のフィルタ入出力結果が一致する場合，その座標点においては外れ値の重みを 0 にすることにより，外れ値に変更する前の出力値と一致させることは可能である．しかし，その場合でもフィルタ幅  $\lambda_c$  の範囲の出力結果は，元の入力値が差し替えられて消えたことにより，差し替え前の出力結果と一致することはない．よって，外れ値に差し替え前のフィルタ入出力結果が一致するようなモデルデータを作成したとしても，その基準では一致は不可能である．



### 5.3 FMGF のロバスト性の方が低い場合

まずは、通常の FMGF のロバスト性が ISO 16610-31 [GRF] のロバスト性より低かった場合の検証を行なう。図 5.2 はその条件を満たす入力データである。図 5.3 は、図 5.2 の入力データを用い得られたフィルタ出力結果とガウシアンフィルタの出力との差分である。なお、初回の通常 FMGF 処理時の  $m$  の値は 21 であったので、再演算時の  $m$  の具体値は 19 (90%), 17 (80%), 15 (70%), 13 (60%), 11 (50%)となる。なお、ガウシアンフィルタのフィルタ幅は  $\lambda_c$  ( $L/5 = 1 \text{ mm}$ ) であるので、外れ値の影響範囲は外れ値から  $\pm 0.5 \text{ mm}$  の範囲に留まる。まず、ISO 16610-31 [GRF]出力は、外れ値の影響範囲外でもガウシアンフィルタの出力結果と異なっている。しかし、FMGF は再演算時の  $m$  の値が変わっても、外れ値影響範囲以外の FMGF 出力はガウシアンフィルタ出力と一致したままである。そして、 $m$  の値が小さくなるにつれて外れ値影響範囲の FMGF 出力とガウシアンフィルタ出力との偏差が増え、ロバスト性が強くなっていった。 $m$  の値が 90%の段階では、まだ ISO 16610-31 [GRF]のロバスト性の方が強かったが、 $m$  の値が 80%以下になると、FMGF の方がロバスト性の方が強くなる結果が得られた。

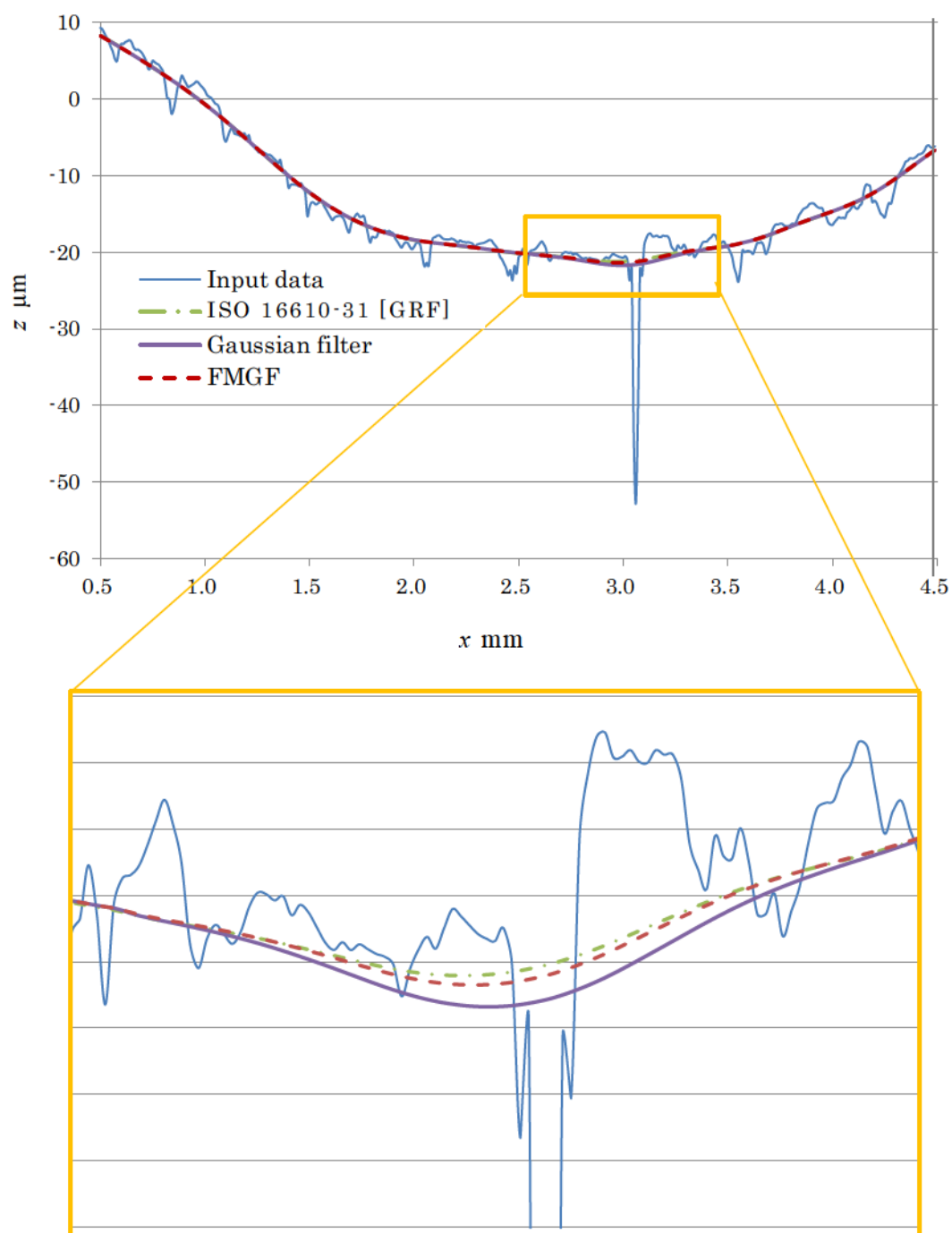


図 5.2 通常の FMGF のロバスト性が ISO 16610-31 [GRF] のロバスト性より低い入出力例

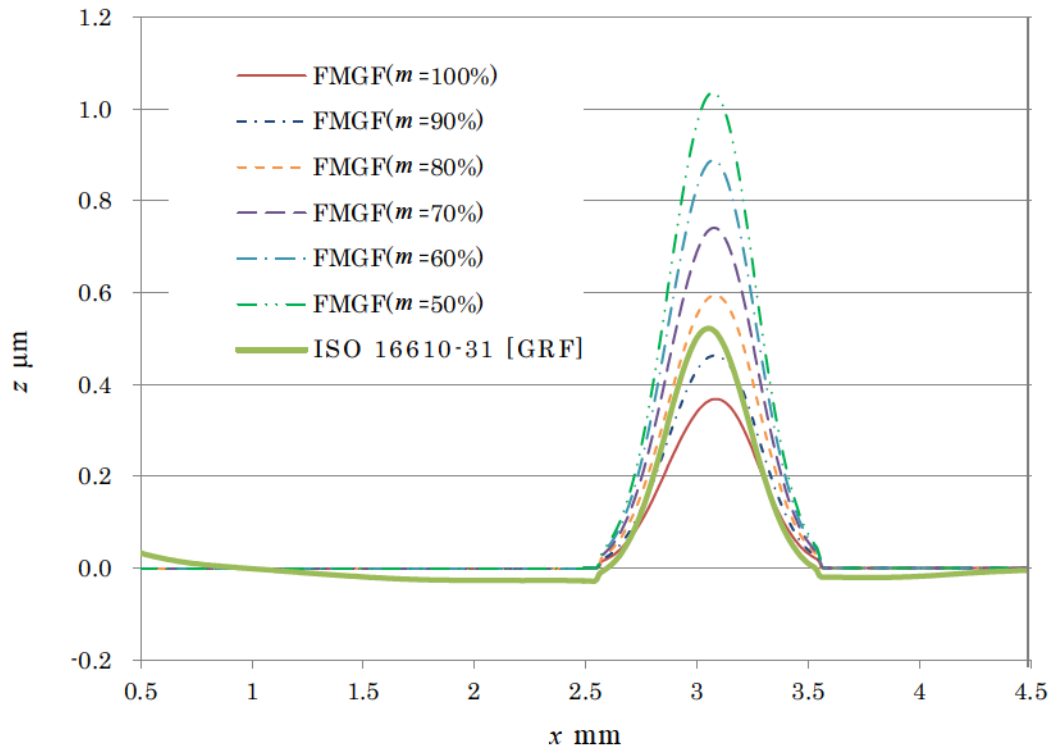


図 5.3 各フィルタのガウシアンフィルタ出力との偏差

一部区間のみロバスト性が異なると、その境界部分のフィルタ出力結果に不自然な段差が発生することが懸念される。図 5.4 は再演算時の  $m$  の値を 50%にした際の FMGF 出力結果を拡大した結果である。  $x = 2.6, 3.6$  mm あたりがロバスト性変更の境界となる。しかし、出力結果に懸念された不自然な段差は発生していない。よって、この場合、再演算時の  $m$  の値を 50%に下げても問題がないことが確認された。

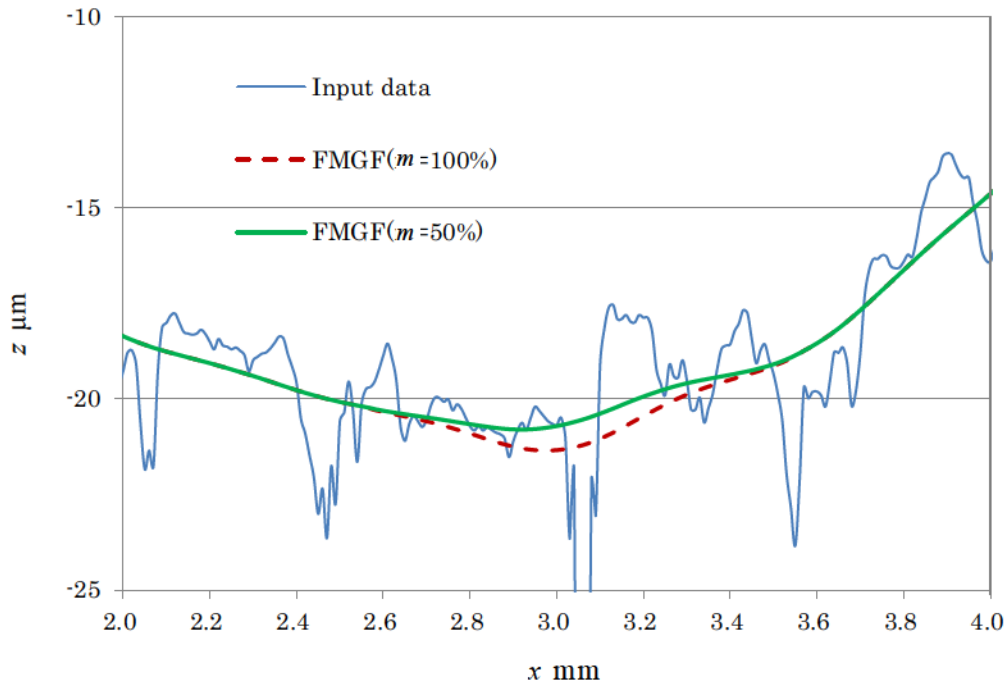


図 5.4 FMGF の入出力（ロバスト性境界面拡大）

図 5.2 以外の，通常の FMGF のロバスト性が ISO 16610-31 [GRF] のロバスト性より低かった場合の入力データでも同様の結果が得られるか，図 5.5 のデータでも同様の検証を行なう．なお，図 5.5 のデータの場合，初回の  $m$  の値は 15 であり，10% 刻みでは  $m$  の値が重複するため，再演算時の  $m$  は 13 (90%)，11 (70%)，9 (60%)，7 (50%) のみで行なう．

図 5.6 は図 5.5 の入力データを用い，得られたフィルタ出力結果とガウシアンフィルタの出力との差分である．先程と同様に，外れ値影響範囲以外の FMGF 出力はガウシアンフィルタ出力と一致しつつ， $m$  の値が小さくなるにつれてロバスト性が強くなる傾向が見られた．しかし，60%と 50%では全く同じ出力結果となり， $m$  の値は一定まで小さくするとロバスト性が頭打ちになることが確認された．

また、図 5.5 のデータを用いた場合、FMGF のロバスト性を最大にしても、ISO 16610-31 [GRF]とほぼ同程度であった。

図 5.7 は再演算時の  $m$  の値を 50%にした際の FMGF 出力結果を拡大した図である。  $x = 3.4, 4.4$  mm あたりがロバスト性変化の境界となるが、出力結果に不自然な段差は発生しておらず、この場合でも  $m$  の値を 50%に下げても問題はなかった。

他の通常の FMGF のロバスト性が ISO 16610-31 [GRF]のロバスト性より低かったデータでも検証を行なった結果、再演算時の  $m$  の値を下げて、どの程度までならロバスト性が強化されるかはデータによりまちまちであった。しかし、どのデータでも、ロバスト性改良 FMGF のロバスト性は上記 2 データと同様に、通常の FMGF よりも強化された。そして、ISO 16610-31 [GRF]のロバスト性と比べても同等以上のロバスト性が確認された。

また、再演算時の  $m$  の値を 50%に下げても、上記 2 データと同様に出力結果に不自然な段差が発生することはなかった。よって、少なくとも、通常の FMGF のロバスト性が ISO 16610-31 [GRF]のロバスト性より低かった場合は、ロバスト性改良 FMGF は再演算時の  $m$  の値を 50%にしても問題なく、ロバスト性のみを強化できることが確認された。

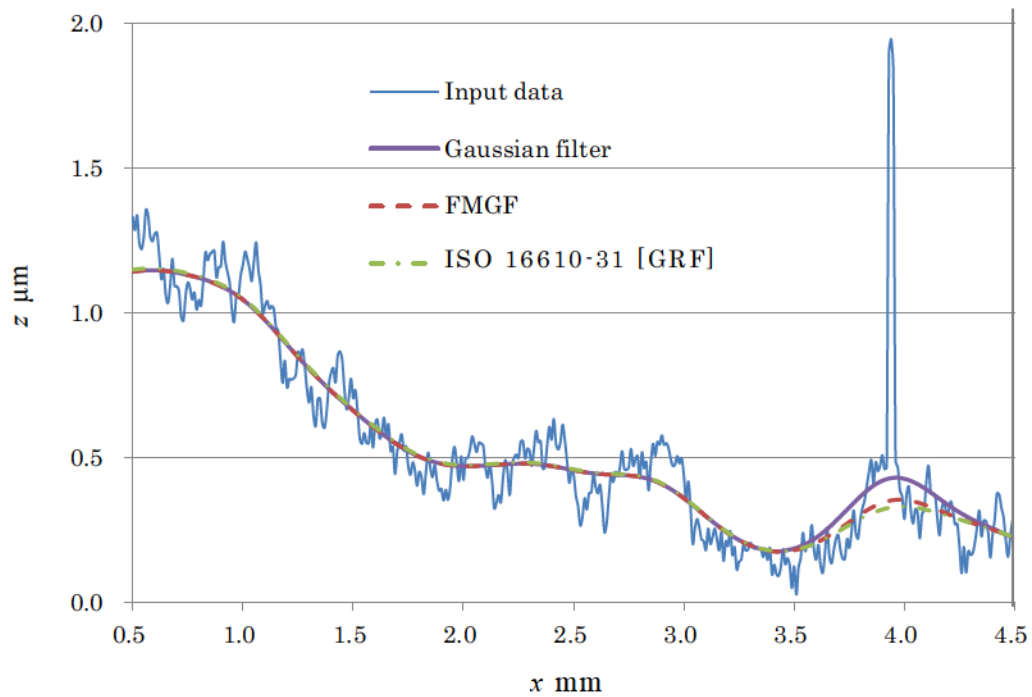


図 5.5 通常の FMGF のロバスト性が ISO 16610-31 [GRF] より低い入出力

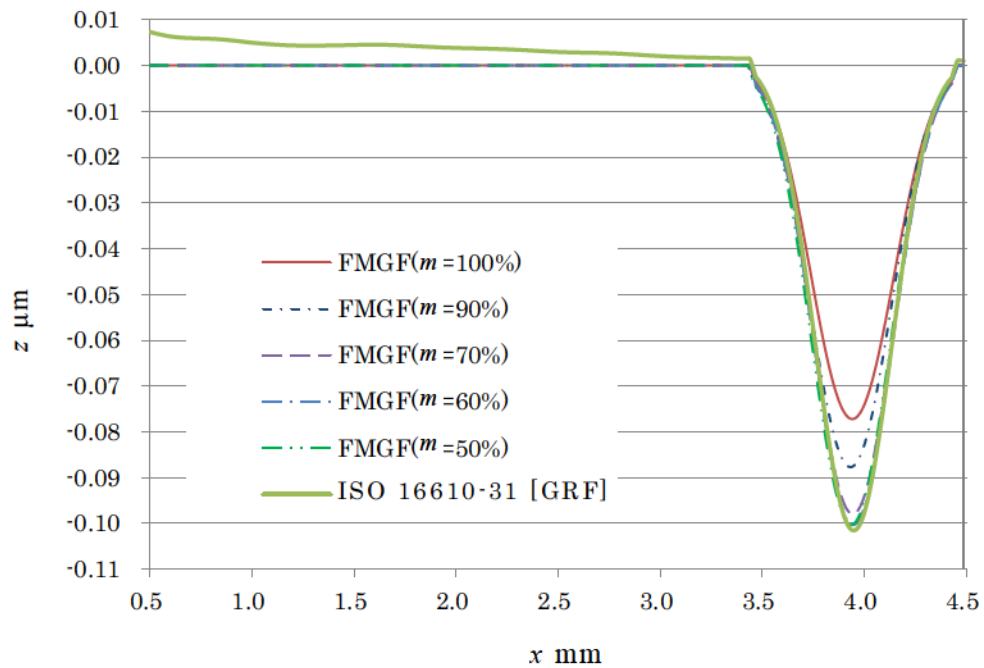


図 5.6 各フィルタのガウシアンフィルタ出力との偏差

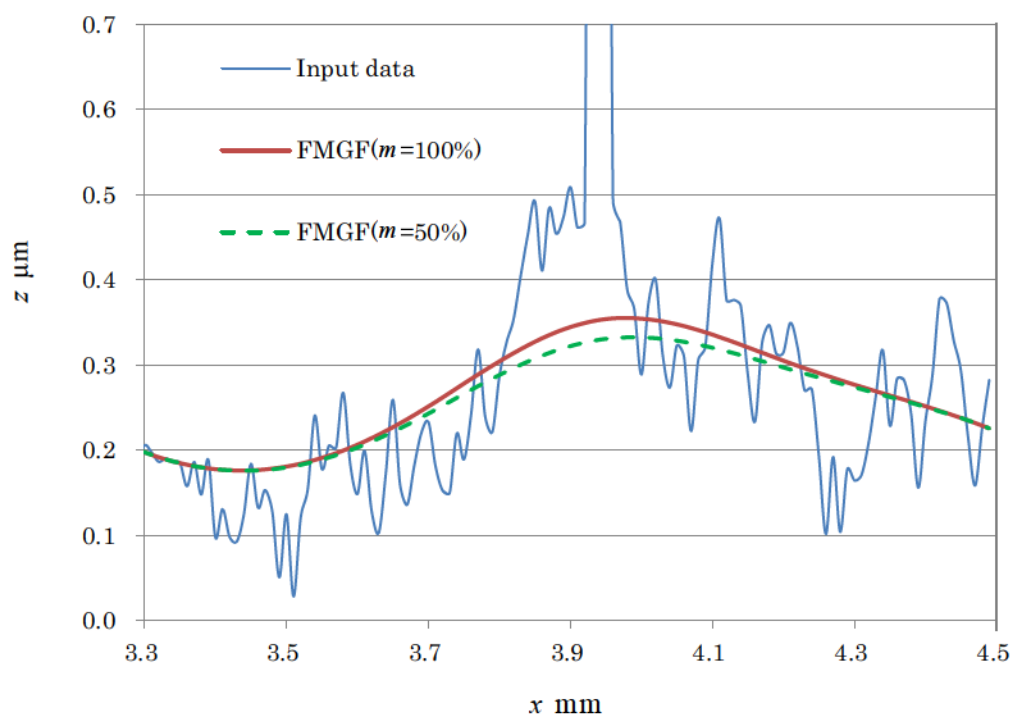


図 5.7 FMGF の入出力（ロバスト性境界面拡大）

## 5.4 FMGF のロバスト性の方が高い場合

再演算を行なうまでもなく，元々 ISO 16610-31 [GRF]出力結果よりも通常の FMGF 出力結果の方がロバスト性が高い場合の入力データでも同様の検証を行なう．この場合，もともと高い FMGF のロバスト性がさらに高くなることとなり，ロバスト性変更の境界面で不自然な段差が発生しやすくなることが懸念される．

図 5.8 は元々 ISO 16610-31 [GRF]出力結果よりも通常の FMGF 出力結果の方がロバスト性が高くなる計測データである．この場合の初回の  $m$  の値は 19 であり， $m$  の値を各割合に下げた具体値は 17 (90%)，15 (80%)，13 (70%)，11 (60%)，9 (50%)となる．図 5.9 は図 5.8 の入力データを用い，得られたフィルタ出力結果とガウシアンフィルタの出力との差分である．3.1 の ISO 16610-31 [GRF]よりも FMGF のロバスト性の方が低かった場合の実験と同様に，外れ値影響範囲以外の FMGF 出力はガウシアンフィルタ出力と一致しつつ， $m$  の値が小さくなるにつれてロバスト性が強くなる傾向が見られた．そして，図 5.2.1.5 と同じく，60%と 50%では全く同じ出力結果となり， $m$  の値は一定まで小さくするとロバスト性が頭打ちになることが確認された．

図 5.10 は再演算時の  $m$  の値を 50%にした際の FMGF 出力結果を拡大した図である． $x = 1.7, 2.7$  mm あたりが境界となるが，出力結果に不自然な段差は発生しなかった．



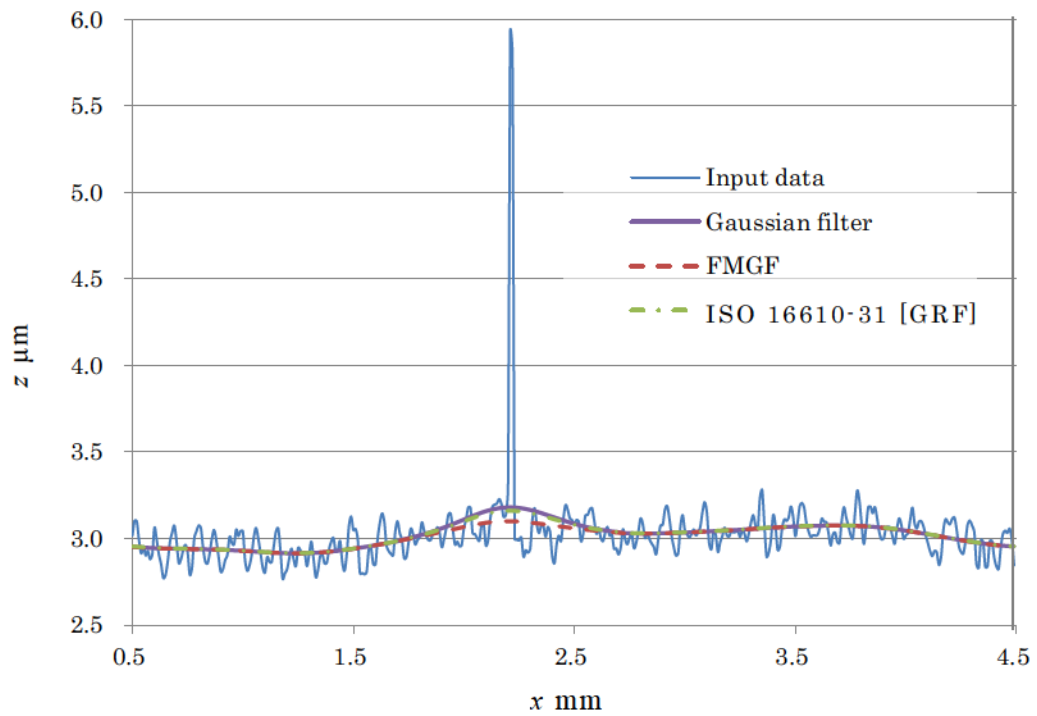


図 5.8 通常の FMGF のロバスト性が ISO 16610-31 [GRF] より高い入出力

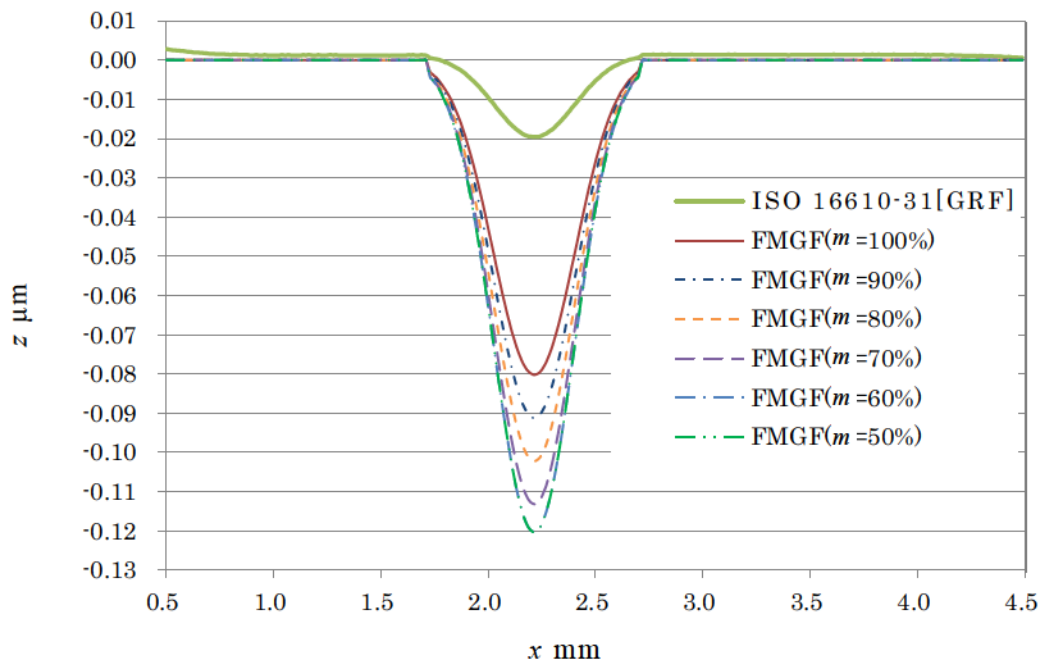


図 5.9 各フィルタのガウシアンフィルタ出力との偏差

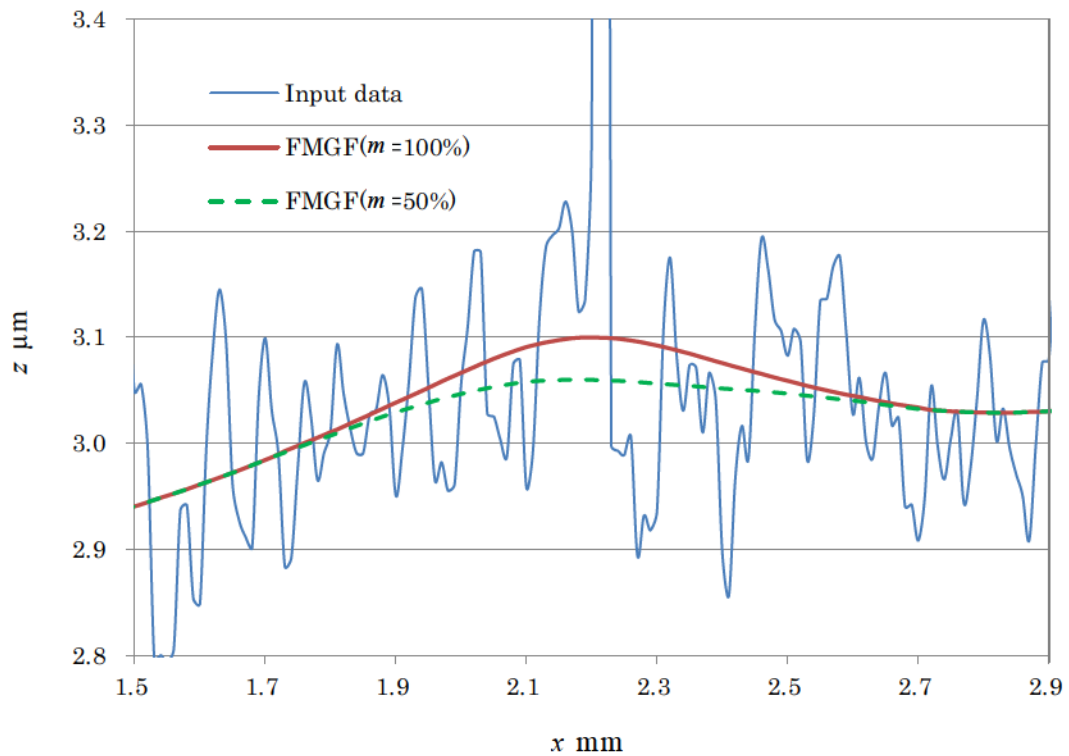


図 5.10 FMGF の入出力（ロバスト性境界面拡大）

他のデータでも検証を行なったが，再演算時の  $m$  の値を下げて，どの程度までならロバスト性が強化されるかはデータによりまちまちであった．しかし，どのデータでも，ロバスト性改良 FMGF のロバスト性は通常の FMGF よりもさらに強化された．そして，ISO 16610-31 [GRF] のロバスト性と比べても，さらにロバスト性が強化されたことが確認された．

また，再演算時の  $m$  の値を 50% に下げても，同様に出力結果に不自然な段差が発生することはない．よって，元々 FMGF の方がロバスト性が高かった場合でも， $m$  の値を 50% に下げてもロバスト性が過剰に働き出力結果がおかしくなるような副作用は発生しないものと考えられる．

以上の実験結果より，提案手法は，再演算時の  $m$  の値を 50% に下げると，入力データに関係なく安定してロバスト性のみが強化される．また，副作用も特に発生せず，問題なく使用できることが確認された．

## 5.5 ロバスト性改良 FMGF の処理時間検証実験

ロバスト性調整・強化の再演算処理により，ロバスト性改良 FMGF の処理時間が FMGF と比べてどの程度変化したか検証する．

処理時間検証実験で用いる計測データは，外れ値が 1 点のみ含まれたデータ 10 種 ( $N = 500$ ) を用いて検証を行なう．そして，各入力データの各フィルタ測定時間は 10 回計測した平均値をとる．なお，通常の FMGF とロバスト性改良 FMGF の共通の設定値は， $z$  方向の離散化セル数は 50，初回処理時の基本幅分割数  $m$  は  $\mu+2\sigma$  を超える最小の奇数になるように設定した．また，ロバスト性改良 FMGF の再演算時の  $m$  の値は，初回の通常 FMGF 処理時の  $m$  の値の 50%を超える最小の奇数になるよう設定した．

他のロバストフィルタとの比較のため，ISO 16610-31 [GRF]の処理時間も計測する．なお，ISO 16610-31 [GRF]は繰り返し演算回数により処理時間は大きく異なるため，繰り返し演算回数（初回の通常のガウシアンフィルタと同じ処理を 1 回目としてカウントする）も併せて記録する．

表 5.1 は，通常の FMGF，ロバスト性改良 FMGF，ISO 16610-31 [GRF]の処理時間を計測した結果である．ロバスト性改良 FMGF の処理時間は，通常の FMGF の処理時間と比べ平均で約 1.34 倍の処理時間を要した．しかし，同じロバストフィルタである ISO 16610-31 [GRF]の処理時間と比べると平均で 58%と短く高速であった．なお，ISO 16610-31 [GRF]の繰り返し演算回数が最も少なく高速であった繰り返し演算回数 3 の場合にしばって比較しても平均で 71%の処理時間で済み，高速であった．よって，ロバスト性改良 FMGF になっても ISO 16610-31 [GRF]に対する高速処理の優位性は崩れなかった．

なお，ロバスト性改良 FMGF の処理時間には，ロバスト性改良 FMGF で再演算を行なうかの比較判断に用いるガウシアンフィルタ

処理の時間も含まれる．比較判断用のガウシアンフィルタ出力に通常のガウシアンフィルタを用いる場合の処理時間は平均 0.129 ms であったが，比較判断用のガウシアンフィルタ出力に量子化ガウシアンフィルタを用いた場合の処理時間は平均 0.0565 ms であった．このように，比較処理用のガウシアンフィルタ処理時間は，FMGF の処理を有効活用することにより半分以下に減らす事に成功し，ロバスト性改良 FMGF 総処理時間の増加を最低限に抑えることに成功した．

なお，ISO 16610-31 [GRF]の計算量オーダー  $O(N^2)$  に対し，FMGF の計算量オーダーは  $O(N)$  である [37]．よって，データ数  $N$  の値が大きくなればなるほど FMGF の高速優位性はさらに大きくなる．今回の実験では測定データ数  $N$  は 500 と少なかったために，ISO 16610-31 [GRF]に対する FMGF の速度優位性は数倍程度であったが，実用域である  $N = 8000$  以上のデータ数では，圧倒的な処理時間の差が生じることとなり，FMGF の速度優位性は非常に大きなものとなる．

表 5.1 各フィルタの処理時間（データ数  $N = 500$ ）

データ	通常の FMGF (ms)	ロバスト性改良 FMGF (ms)	ISO 16610-31 [GRF] (ms)	GRF の繰り返し 演算回数
1	2.44	3.23	4.67	3
2	2.50	3.40	6.24	4
3	2.58	3.45	4.89	3
4	2.54	3.49	6.45	4
5	2.56	3.42	7.16	5
6	2.44	3.19	5.81	4
7	2.47	3.21	7.28	5
8	2.38	3.06	4.67	3
9	2.74	3.86	6.12	4
10	2.49	3.26	4.76	3
平均	2.51	3.37	5.81	3.8

## 5.6 ロバスト性改良 FMGF まとめ

ロバスト性を強化・改良した新たな FMGF・ロバスト性改良 FMGF を提案し，検証を行なった．

ISO 16610-31 [GRF]をはじめとするこれまでのロバストフィルタは，ロバスト性をつかさどるパラメータの値を変えることによりロバスト性の調整は可能であった．しかし，ロバスト性を強化するとベースとなるフィルタとの一致性がより悪化し，ベースとなるフィルタとの一致性を高めるとロバスト性が低下するトレードオフの関係が存在していた．そして，部分的にロバスト性を変更することもできなかった．しかし，このロバスト性改良 FMGF は，部分的なロバスト性の強化ができる．そして，ベースとなるガウシアンフィルタとの一致性を崩すことなく，副作用もなくロバスト性のみをさらに強化することに成功した．この成果は，FMGF の改良だけにとどまらず，これまでのロバストフィルタの常識を覆す大きな成果である．

ロバスト性改良 FMGF は，ガウシアンフィルタ出力との比較と，部分的な再演算処理を行なうことにより，通常の FMGF と比べて処理時間は増加した．しかし，処理の高速・最適化等の効果もあり，ロバスト性改良 FMGF の処理時間は元々高速である通常の FMGF と比べても約 1.3 倍程度と，実用上はほぼ問題がない程度に抑えることに成功した．処理時間を他のフィルタと比べても，ロバスト性改良 FMGF の処理速度は，同じロバストガウシアンフィルタの一種である ISO 16610-31 [GRF]と比べて数段高速であった．よって，ロバスト性改良 FMGF になっても，他のロバストフィルタに比べて FMGF の速度優位性は崩れず，FMGF の特性の 1 つである「高速計算性」は崩れなかった．

このロバスト性改良 FMGF の成果により，FMGF のロバスト性が，データによっては ISO 16610-31 [GRF]と比べて劣ることもある問題が，副作用もなく解決した．



---

---

# 第 6 章

## まとめ

---

---

### 6.1 研究成果のまとめ

フィルタ入出力データから求める事ができる，新たな振幅伝達特性検証方法を開発した．この新たな振幅伝達特性検証方法を用い，FMGF の振幅伝達特性がガウシアンフィルタの振幅伝達特性と一致する事を確かめ，外れ値がない場合，FMGF がガウシアンフィルタと互換性があることが証明された．

また，FMGF 処理手順を見直し拡張することにより，新たに三次元表面性状用 FMGF を開発した．この三次元表面性状用 FMGF は，三次元表面性状に適用しても，従来の FMGF に存在した方向特性問題が発生せず，従来の FMGF では対応しきれなかった三次元表面性状に対応できるようにした．

さらに，外れ値に対してのみロバスト性を発揮する FMGF のロバスト性を，ガウシアンフィルタとの一致性を崩すことなく強化した．これにより，計測データによっては ISO 16610-31 [GRF]よりもロバスト性が低くなる問題を解決した．ロバスト性強化 FMGF は，外れ値がない場合にガウシアンフィルタ出力との一致性を維持しながら，外れ値に対してのみ，これまで以上にロバスト性を発揮した．これ

はロバスト性強化とベースとなるフィルタとの一致性がトレードオフの関係であったこれまでのロバストフィルタの常識を覆す成果である。さらに，処理速度においても ISO 16610-31 [GRF]よりも高速であることを確認した。

以上のように，FMGF の拡張と，新たな振幅伝達特性検証方法の確立の成果により，FMGF は「ガウシアンフィルタとの特性一致」，「高速計算性」，「ロバスト性」，「方向特性」という，三次元表面性状用ローパスフィルタに求められる四大特性すべてを満たすことに成功した。表 6.1 は各フィルタの四大特性対応状況である。現状この四大特性を満たす他のフィルタは存在せず，この FMGF が唯一無二のフィルタである。

表 6.1 各フィルタの四大特性対応状況

項 目	GF	RGF	FMGF
ガウシアンフィルタとの特性一致	—	×	◎
高速計算性	◎	×	○
ロバスト性	×	○	◎
方向特性	◎	×	◎


## 6.2 成果の波及効果、技術分野産業現場への福音


本研究により，FMGF の実用化を妨げる技術的問題は全て解決した．そして，計測現場が求めている，三次元表面性状にも適用可能な，ガウシアンフィルタと互換性のある高速なロバストガウシアンフィルタである FMGF が完成した．

この FMGF は，2014 年 10 月に開催された，第 27 回日本国際工作機械見本市に出展された（図 6.1）．

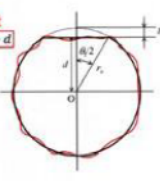
**真円度のJCSS校正事業者を目指します！**

産業技術総合研究所 尾藤洋一 博士、近藤余範 博士との共同研究  
『真円度測定機のプロープ倍率校正法に関する研究』






切欠き標準片 (フリックスタンド) と切欠き量



切欠き量  
 $h = r - d$




切欠き標準片 (フリックスタンド) のメリット

- ① 真円度測定機の仕様状態で校正が可能です。
- ② 標準片を置くだけで校正が可能です。
- ③ 実体を持った標準であるため、取り扱いが容易です。

---

**エンジンボアの表面粗さ評価に適したロバストガウシアンフィルタ！**

中京大学 教授 沼田宗敏 先生との共同研究  
『高速M推定を用いた3次元表面粗さ用ローパスフィルタの開発』  
『高速ロバストガウシアンの実用化の研究』

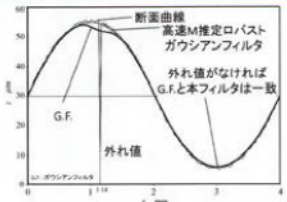


高速M推定を用いたロバストガウシアンフィルタの特徴

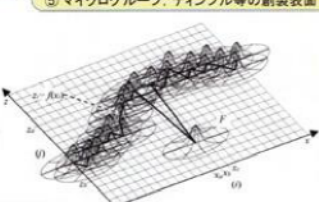
- ① 外れ値に対するロバスト性
- ② 従来のガウシアンフィルタ特性との一致性
- ③ 演算の高速性

具体的なワークの例

- ① エンジンボア内面、自動車部品
- ② 焼結体の研磨面
- ③ 多孔質
- ④ 摺動面
- ⑤ マイクログループ、ディンプル等の創製表面



高速M推定を用いたロバストガウシアンフィルタ処理の例



高速M推定を用いたロバストガウシアンフィルタ処理の概念図

図 6.1 第 27 回 日本国際工作機械見本市  
株式会社小坂研究所チラシ

そして現在では，株式会社小坂研究所製の表面粗さ測定機（図 6.2）で使われる表面粗さ用ソフトウェア SGA31 に搭載され，産業界で用いられている．



図 6.2 株式会社小坂研究所製表面粗さ測定機  
<http://www.kosakalab.co.jp/product/precision/coarseness/>

### 6.3 残された課題と将来展望

現在確認されている FMGF の技術的な問題は全て解決した．よって，今後の課題はこの FMGF の普及である．しかし，現在のロバストガウシアンフィルタの規格である ISO 16610-31 [GRF]は制定されたばかりであり，従来の ISO 規格更新のペースでは当面の間は FMGF が ISO 規格に置き換わる[48-51] 機会はないと思われる．JIS 規格も，基本的に ISO 規格に対応する規格は，ISO 規格を日本語訳したものが JIS 規格化される方針であるため，ISO 規格にならなければ JIS 規格化の可能性も否定される．よって，当面の間は規格化の見込みはない．そこで，長期的視点に切り替え，まずは計測機メーカー各社の計測機への搭載を進め，足場を固めることを目指す．そして，普及が進んだ暁には業界標準となり，最終的には現在の ISO16610-31 と置き換わり ISO/JIS 規格化され，FMGF が広く用いられることを望む．

---

---

# 謝 辞

---

---

本学位論文は，2012 年 4 月に中京大学大学院 情報科学研究科 博士前期課程 情報科学専攻に入学してからの 2 年間と，2014 年 4 月に中京大学大学院情報科学研究科博士後期課程情報認知科学専攻に入学してからの 2 年間，中京大学沼田研究室で行なった研究の成果をまとめたものです．ここに，本研究を遂行するにあたり，長年ご指導いただいた担当教授であり，本学位論文主査である本学工学部沼田宗敏教授に謝意を表します．

また，副査として，本学位論文について御精査いただき，助言・ご指導いただいた本学工学部興水大和教授，同野浪亨教授，同青木公也教授に謝意を表します．

本学位論文執筆に先立ち，学術論文共著者として助言・ご指導いただいた，富山県立大学工学部知能デザイン工学科神谷和秀教授，ならびに法政大学理工学部機械工学科吉田一朗専任講師に謝意を表します．

そして，本研究を進めるにあたり，数々の貴重な情報・ご意見・機会をいただいた，長岡技術科学大学柳和久名誉教授に謝意を表します．

また，本研究を進めるうえで，計測データの提供とともに，数々のご助言ををいただいた株式会社小坂研究所，三鷹光器株式会社に謝意を表します．

中京大学編入にあたり，沼田研究室を紹介いただいた故 嶋田普教授に謝意を表します．

本研究の一部は，JSPS 科研費 23560271，15K05880 の助成によって行われました．また，本研究の一部は，株式会社小坂研究所との共同研究によって行われました．謝意を表します．

最後に，これまで育ててくれ，博士課程まで進学させてくれた両親に謝意を表します．

2016 年 7 月

近藤 雄基

## 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，Vol.69, No.8, pp.1057-1060 (2003).
- [2] 吉田一朗：表面粗さ―その測定方法と規格に関して―，精密工学会誌，Vol.78, No.4, pp.301-304 (2012).
- [3] 吉田一朗：表面粗さ-その 3 教科書に書けないワークのセッティングの裏技と最新の JIS 規格-，精密工学会誌，Vol.80, No.12, pp.1071-1075 (2014).
- [4] 吉田一朗，塚田忠夫：表面粗さ測定における不確かさに及ぼす触針先端半径の影響：第 1 報：FFT による解析，設計工学会誌，Vol.39, No.8, pp.450-455 (2004).
- [5] 関根俊彰，宇野彰一，島崎景正，信本康男：接触式・非接触式粗さ測定結果の相関性について，埼玉県産業技術総合センター研究報告，No. 6 , pp.1-4 (2008).
- [6] 吉田一朗，塚田忠夫：表面粗さ測定における不確かさに及ぼす触針先端半径の影響：第 2 報：フラクタル的性質をもつプロフィールによるシミュレーション，Vol.40, No.2, pp.91-96 (2005).
- [7] 吉田一朗：表面粗さ-その 4 触針式の表面粗さ測定用センサーの設計機構・原理とその上手な使い方-，精密工学会誌，Vol.82, No.2, pp.142-147 (2016).
- [8] 吉田一朗，塚田忠夫：粗さプロフィール補正による触針先端半径に起因する不確かさの解析，2003 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，pp.91 (2003).
- [9] 直井一也：触針式表面性状校正装置にみる最新技術と不確かさ解析，精密工学会誌，Vol.76, No.9, pp.991-994 (2010).



- [10] 佐藤敦：非接触による三次元表面性状の測定の現状 – 三次元規格の意義とものづくりへの活用–，精密工学会誌，Vol.81, No.10, pp.922-925 (2015).
- [11] 藤井章弘，林真市，藤井信太朗，寺沢智丈，柳和久：光学式表面性状測定機の基本形状に対する応答特性の解析，精密工学会誌，Vol.80, No.9, pp.851-855 (2014).
- [12] 深津拓也：光学式輪郭測定技術を用いた工業表面のトポグラフィ測定，精密工学会誌，Vol.76, No.9, pp.995-998 (2010).
- [13] 西川孝：白色光干渉顕微鏡による表面トポグラフィ測定，精密工学会誌，Vol.76, No.9, pp.999-1002 (2010).
- [14] 吉田一郎：表面粗さ – その 2 ちょっとレアな表面性状パラメータの活用方法–，精密工学会誌，Vol.79, No.5, pp.405-409 (2013).
- [15] 柳和久：表面幾何構造の捉え方と形状特性の評価技術に関する概観，精密工学会誌，Vol.76, No.9, pp.987-990 (2010).
- [16] ISO 4287, Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Terms, definitions and surface texture parameters; 1997.
- [17] JIS B 0601, 製品の幾何特性仕様(GPS) – 表面性状：輪郭曲線方式 – 用語，定義及び表面性状パラメータ; 2013.
- [18] ISO 4288, Geometrical Product Specifications (GPS) – Surface texture : Profile method – Rules and procedures for the assessment of surface texture; 1996.
- [19] JIS B 0633, 製品の幾何特性仕様 (GPS) – 表面性状：輪郭曲線方式-表面性状評価の方式及び手順; 2001.
- [20] ASME B46.1, Surface texture (Surface roughness, waviness, and lay); 2009.
- [21] ISO 11562, Geometrical product specifications (GPS) – Surface Texture: Profile method – Metrological characteristics of phase correct filters; 1996.

- [22] JIS B 0632, 製品の幾何特性仕様(GPS)-表面性状：輪郭曲線方式-位相補償フィルタの特性; 2001.
- [23] ISO 16610-21, Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 21: Linear profile filters: Gaussian filters; 2011.
- [24] Youxi Yuan, Xin-Fa Qiang, Jun-Feng Song, Theodore V. Vorburger : A fast algorithm for determining the Gaussian filtered mean line in surface metrology, Precision Engineering, Vol.24, pp62-69 (2000).
- [25] Michael Krystek : Form filtering by splines, Measurement, Vol.18, No.1, pp.9-15 (1996).
- [26] Michael Krystek, Paul James Scott, Vijay Srinivasan : Discrete linear filters for metrology. In: Proceedings of the 16th IMEKO World Congress, Vienna, Austria, pp.25-8 (2000).
- [27] Michael Krystek : Discrete linear profile filters, Proceedings of the X International Colloquium on Surfaces, Chemnitz University of Technology, Chemnitz, pp.145-152 (2000).
- [28] Tomonori Goto, Kazuhisa Yanagi : An optimal discrete operator for the two-dimensional spline filter, Measurement science and technology, Vol.20, No.12, pp.1-4, (2009).
- [29] ISO 16610-22, Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 22: Linear profile filters: Spline filters; 2006.
- [30] ISO 16610-1, Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 1: Overview and basic concepts; 2006.
- [31] ISO 16610-28, Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 28: End effects; 2010.
- [32] 後藤智徳：表面性状評価のためのトポグラフィデータ処理技術，精密工学会誌，Vol.76, No.9, pp.1007-1010 (2010).
- [33] 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，pp.109-110 (2005).

- [34] ISO 16269-4, Statistical interpretation of data – Part 4: Detection and treatment of outliers; 2010.
- [35] Stefan Brinkmann, Horst Bodschiwinna and H.-W. Lemke : Accessing roughness in three-dimensions using Gaussian regression filtering, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol.41, No.13, pp.2153-2161 (2001).
- [36] Tomonori Goto, Jota Miyakura, Kozo Umeda, Soichi Kadowaki, Kazhisa Yanagi : A Robust Spline Filter on the basis of L2-norm, Precision Engineering, Vol.29, pp.157-61 (2005).
- [37] 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, Vol.76, No.6, pp.684-688 (2010).
- [38] Munetoshi Numada, Hiroyasu Koshimizu, W Araki : A Robust Gaussian Filter by Using Fast M-Estimation Method. In: Proceedings of the ICSM, pp.1-6 (2012).
- [39] ISO 25178, Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 6: Classification of methods for measuring surface texture; 2010.
- [40] JIS B 0681-6, 製品の幾何特性仕様 (GPS) – 表面性状 : 三次元 – 第 6 部 : 表面性状測定方法の分類; 2014.
- [41] ISO 25178-2, Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Areal – Part 2: Terms, definitions and surface texture parameters; 2012.
- [42] ISO 16610-61, Geometrical product specification (GPS) – Filtration – Part 61: Linear areal filters – Gaussian filters; 2015.
- [43] ISO 16610-60, Geometrical product specification (GPS) – Filtration – Part 60: Linear areal filters – Basic concepts; 2015.
- [44] ISO 16610-30, Geometrical product specifications (GPS) – Filtration – Part 30: Robust profile filters: Basic concepts; 2015.
- [45] 中村周 : フーリエ解析, 朝倉書店, pp.29 (2003).

- [46] ISO 5436-1 : Geometrical product specifications (GPS) – Surface texture: Profile method – Measurement standards – Part 1: Material measures; 2000.
- [47] 内舘道正：実用的な表面トポグラフィデータの生成と応用，精密工学会誌, Vol.76, No.9, pp.1003-1006 (2010).
- [48] 奈良治郎：表面粗さの国際規格の改正，精密機械誌，Vol.48, No.2, pp.262-267 (1982).
- [49] 酒井誠：表面粗さ規格の改定（I），近畿アルミニウム表面処理研究会誌，No.145, pp.1-5 (1990).
- [50] 酒井誠：表面粗さ規格の改定（II），近畿アルミニウム表面処理研究会誌，No.148, pp.2-6 (1991).
- [51] 沼田宗敏：三次元表面性状の規格化へ – JIS の ISO 化の流れ–，中部経済新聞，1月14日号 (2016).

## 関連文献

### ○原著論文

- [1] 近藤雄基, 沼田宗敏, 輿水大和 : 高速M推定を用いたロバスト  
ガウシアンフィルタの振幅伝達特性, 精密工学会誌, Vol.79, No.7,  
pp.659-664 (2013).
- [2] 近藤雄基, 沼田宗敏, 輿水大和, 吉田一朗 : 2次元高速 M 推定  
ガウシアンフィルタ (FMGF) の四大特性の研究, 精密工学会誌,  
Vol.81, No.2, pp.170-175 (2015).
- [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, Precision Engineering, Vol.44, pp.55-61 (2016).
- [4] 近藤雄基, 沼田宗敏, 輿水大和, 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,  
Vol.82, No.3, pp.272-277 (2016).

### ○解説論文

- [1] 近藤雄基, 吉田一朗, 沼田宗敏, 輿水大和 : 表面粗さおよび (ロバスト)  
フィルタの動向, 非破壊検査, 65, 6 (2016).

### ○国際会議

- [1] Yuki Kondo, Munetoshi Numada, Hiroyasu Koshimizu : A Robust Gaussian Filter  
Corresponding to the Transmisson Characterisic of the Gaussian Filter, proc. of  
the Met & Props 2013, TS7-02, pp.1-5 (Jun. 2013).  
2013.06.21 GIS NTU Convention Center, Taipei TAIWAN.
- [2] Yuki Kondo, Munetoshi Numada, Hiroyasu Koshimizu, Kazuhide Kamiya, Ichiro  
Yoshida : A Transmission Characteristics of the Low-pass Filter Using Actual  
Measurement Data, proc. of The 38th International MATADOR Conference on

Advanced Manufacturing, pp.453-459, Yunlin, Taiwan (Mar. 2015) (Invited paper)  
2015.03.29 National Formosa University, Huwei, Yunlin, Taiwan.

- [3] 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 AISM2015, pp.258-263, Guilin, China (Oct. 2015)  
2015.10.09 Ronghu Lake Hotel, Guilin, China.

## ○招待講演

- [1] 沼田宗敏，近藤雄基：「究極のフィルタ演算と普及策」，平成 27 年度第 3 回にいがたナノ基盤技術実践会講演会，ホテルニューオータニ長岡（2016.03.11）.

## ○国内会議

- [1] 近藤雄基，沼田宗敏，奥水大和：FMGF(高速 M 推定ガウシアンフィルタ)の振幅伝達特性，2013 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp.889-890 (2013.03).  
2013.03.13 東京工業大学 大岡山キャンパス.
- [2] 沼田宗敏，近藤雄基，奥水大和：高速 M 推定を用いた 2 次元ガウシアンフィルタの構築，2013 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp.891-892 (2013.03).  
2013.03.13 東京工業大学 大岡山キャンパス.
- [3] 近藤雄基，沼田宗敏，奥水大和：FMGF(高速 M 推定ガウシアンフィルタ)の処理時間，2013 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，pp.369-370 (2013.09).  
2013.09.13 関西大学 千里山キャンパス.
- [4] 近藤雄基，沼田宗敏，奥水大和：2 次元高速 M 推定ガウシアンフィルタ（FMGF）の四大特性，2014 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp.13-14 (2014.03).  
2014.03.18 東京大学 本郷キャンパス.

- [5] 近藤雄基，沼田宗敏，輿水大和，吉田一朗：三次元表面性状用高速 M 推定ガウシアンフィルタ（FMGF）の振幅伝達特性検証，2014 年度精密工学会秋季大会学術講演会講演論文集，pp.821-822 (2014.09).  
2014.09.16 鳥取大学.
- [6] 近藤雄基，沼田宗敏，輿水大和，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，2015 年度精密工学会春季大会学術講演会講演論文集，pp.191-192 (2015.03).  
2014.03.19 東洋大学 白山キャンパス.
- [7] 近藤雄基，沼田宗敏，輿水大和，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，pp.99-100 (2015.09).  
2015.09.04 東北大学 川内北キャンパス.
- [8] 近藤雄基，長谷川英樹，沼田宗敏，輿水大和，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，pp.29-30 (2016.03).  
2016.03.17 東京理科大学 野田キャンパス.

## ○実用化

- [1] 株式会社小坂研究所，表面粗さ用ソフトウェア SGA31 (2015)

## その他の業績

### ○国際会議

- 1) Yuki Kondo, Munetoshi Numada, Hiroyasu Koshimizu : Proposal of High Precision Hough Transform Using Resampling Method, proc. of the 20th Korea-Japan Workshop on Frontiers of Computer Vision FCV2014, pp.108-111 (Feb. 2014).  
2014.02.05 Okinawa National College of Technology, Okinawa Japan.
- 2) Yuki Kondo, Munetoshi Numada, Hiroyasu Koshimizu : A Fast Hough Transform Based on C3TR Using Shift Operation, proc. of the 21st Korea-Japan Workshop on Frontiers of Computer Vision FCV2015, P1-3, pp.1-6, Mokpo, Korea (Jan. 2015).  
2015.01.28 Shinan Beach Hotel, Mokpo, Korea.

### ○国内会議

- 1) 近藤雄基, 沼田宗敏, 興水大和 : 再標本化を用いた高精度 Hough 変換の提案, Vision Engineering Workshop 2013 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, IS2-D3, pp.1-5 (2013.12).  
2013.12.06 パシフィコ横浜アネックス・ホール.
- 2) 近藤雄基, 沼田宗敏, 興水大和 : 再標本化を用いた Hough 変換の高精度化, 電気学会研究会資料(知覚情報/次世代産業システム研究会), PI-14-6(IIS-14-51), pp.27-30 (2014.03).  
2014.03.28 中京大学 八事キャンパス.
- 3) 近藤雄基, 沼田宗敏, 興水大和 : 再標本化補間を用いた Hough 変換の高精度化, 平成 26 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集, H1-5, pp.1 (2014.09).  
2014.09.08 中京大学 八事キャンパス.
- 4) 三宅雄也, 近藤雄基, 沼田宗敏, 興水大和 : OK 量子化理論と遺伝的アルゴリズムを用いた階調削減法, 平成 26 年度電気・電子・情報関係学会



- 東海支部連合大会講演論文集, Po1-8, pp.1 (2014.09).  
2014.09.08 中京大学 八事キャンパス.
- 5) 近藤雄基, 沼田宗敏, 興水大和: 再標本化補間を用いた高精度 Hough 変換の提案, Vision Engineering Workshop 2014 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, IS1-19, pp.1-4 (2014.12).  
2014.12.04 パシフィコ横浜アネックス・ホール.
- 6) 近藤雄基, 福井陽平, 沼田宗敏: Hough 変換によるロバストな無限遠点検出法, 平成 27 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集, Po1-44, pp.1 (2015.09).  
2015.09.28 名古屋工業大学
- 7) 長谷川 英樹, 近藤 雄基, 沼田 宗敏: サッカーロボットのための遺伝的アルゴリズムとシミュレーション, 平成 27 年度電気・電子・情報関係学会東海支部連合大会講演論文集, Po1-8, pp.1 (2015.09).  
2015.09.28 名古屋工業大学
- 8) 近藤雄基, 福井陽平, 沼田宗敏, 興水大和: 領域分割と高速 M 推定法を用いたロバストかつ高速な車載用無限遠点検出システムの研究, Vision Engineering Workshop 2015 ビジョン技術の実利用ワークショップ講演論文集, IS2-5, pp.322-325 (2014.12).  
2015.12.04 パシフィコ横浜アネックス・ホール.