

M変換を用いる高精度表面計測信号中のインパルス状雑音の除去*

原田博之^{*1}, 柏木 潤^{*2}, 安藤俊之^{*3}
大淵慶史^{*4}, 椛 一喜^{*5}Reduction of Impulsive Noise Included in High-Accuracy
Surface Measurement Signal by Using M-TransformHiroshi HARADA^{*6}, Hiroshi KASHIWAGI, Toshiyuki ANDO,
Yoshifumi OHBUCHI and Kazuki KABA^{*6}Department of Mechanical Engineering and Materials Science, Kumamoto University,
2-39-1 Kurokami, Kumamoto-shi, Kumamoto, 860-8555 Japan

The authors have recently proposed a new signal processing technique called M-transform. In this paper, we propose to use the M-transform for impulsive noise reduction. Since M-transform of a time signal is equivalent to calculate cross-correlation function between the time signal and M-sequence, both impulsive noise and white noise are converted into small-amplitude random signal through the M-transform. These small-amplitude random signals can be removed by use of some non-linear filter. And then, the filtered signal is transformed into time domain through the inverse M-transform and the noise reduction procedure is completed. The proposed filtering technique is applied to reduce impulsive noise included in surface tracing signal measured by an atomic force microscope. From the results of the experiment, it is shown that the proposed works quite well for impulsive noise reduction.

Key Words: Shape Measurement, Information Processing and Signal Analysis, M-Sequence, Correlation Function, Nonlinear Filter

1. まえがき

筆者等は M 系列信号をもとにした新たな信号の変換である M 変換を提案し, その性質および線形系の同定への応用について述べた⁽¹⁾. さらに, M 変換の性質を利用して信号に含まれるインパルス状雑音および白色雑音を除去する方法を提案した⁽²⁾. 信号中に含まれる雑音の除去に関しては, 従来, 様々なフィルタが提案されているが, インパルス状雑音および白色雑音の両方を良好に除去するものは数少ない⁽³⁾. 本研究は, この M 変換を用いる雑音除去手法を高精度表面計測信号に含まれるインパルス状雑音の除去に適用したものである.

3次元表面粗さ測定器, 原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM) やレーザ顕微鏡に代表される高精度表面形状計測においては, 被測定表面の性状に応じた測定パラメータの設定が比較的難しく, パラ

メータ設定が適切でない場合や被測定面内の不純物の存在などにより測定信号にインパルス状の雑音を生じることがある. このようなインパルス状雑音の除去は難しく, また, 不適切なフィルタなどにより除去を行うと本来の形状を歪ませてしまい, 正確な形状測定が困難になる.

本論文ではまず, 文献(1)で提案された M 変換について簡単にふれる. つぎに, 新たに提案する M 変換による雑音除去方法について述べる. さらに, 提案する方法が有効であることをシミュレーションにより確認する. 実際に提案する方法を原子間力顕微鏡の信号に適用し, 信号中に含まれるインパルス状雑音の除去に有効であることを示す.

2. M 変換とその性質

筆者等が文献(1)で提案した M 変換は以下のような信号処理手法である. ガロア体 $GF(2)$ 上で定義された n 次原始多項式 $f(x)$ より発生した M 系列信号を $\{a_i\}$ とし, ± 1 の 2 値をとる新たな系列 $\{m_i\}$ を式(1)のように定義すると, その自己相関関数 $\phi_{mm}(k)$

* 原稿受付 2003年8月4日.

^{*1} 正員, 熊本大学工学部知能生産システム工学科(☎860-8555 熊本市黒髪2-39-1).^{*2} 熊本大学工学部知能生産システム工学科.^{*3} 正員, 熊本大学大学院自然科学研究科.^{*4} 正員, 福岡工業大学工学部知能機械工学科(☎811-0295 福岡市東区和白東3-30-1).^{*5} (財)くまもとテクノ産業財団(☎861-2202 熊本県下益城郡益城町田原2081-10).

E-mail: hiroshi@mech.kumamoto-u.ac.jp

は式 (2) で与えられる (4).

$$m_i = (-1)^{a_i} \quad (1)$$

$$\phi_{mm}(k) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} m_{i-k} m_i$$

$$= \begin{cases} 1 & (k = 0, N, 2N, \dots) \\ -\frac{1}{N} & (\text{otherwise}) \end{cases} \quad (2)$$

ここで、 $N = 2^n - 1$ は n 次 M 系列の周期である。この式 (2) は M 系列の擬似直交性 (1) と呼ばれる性質である。

M 変換は、この 2 値系列 $\{m_i\}$ を用いて以下のように定義できる。まず、2 値系列 $\{m_i\}$ を用いて $N \times N$ の行列 M_i を式 (3) のように構成する。

$$M_i = \begin{bmatrix} m_i & m_{i-1} & \dots & m_{i-N+1} \\ m_{i+1} & m_i & \dots & m_{i-N+2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{i+N-1} & m_{i+N-2} & \dots & m_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

つぎに、時間信号 $x(t)$ を一定のサンプリング間隔 Δt おきにサンプルした時系列信号を $x(i\Delta t)$ とし、これを $x(i)$ と略記して時間信号 X を式 (4) のように定義する。

$$X = (x(0), x(1), \dots, x(N-1))^T \quad (4)$$

このとき、時系列信号 $\{x_i\}$ の M 変換 A は式 (5) により定義され、式 (6) により一意に決定される (1)。

$$X = M_i A \quad (5)$$

$$A = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{N-1})^T$$

$$= M_i^{-1} X \quad (6)$$

また、M 系列信号 $\{m_i\}$ と時間信号 $\{x_i\}$ の相互相関関数 $\phi_{mx}(k)$ は M 変換 A を用いて式 (7) のように表される (1)。

$$\phi_{mx}(k) = \frac{N+1}{N} \alpha_k - \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} \alpha_l \quad (7)$$

3. M 変換を用いる雑音除去法

本研究では、前述の M 変換を用いてインパルス状雑音と白色雑音の両方を除去する方法を提案する。まず、インパルス状信号と白色雑音の M 変換を考える。単一インパルスからなるインパルス状雑音 P_j を式 (8) のように表す。

$$P_j = (0, 0, \dots, p_j, 0, \dots, 0)^T \quad (8)$$

ここで、 p_j はインパルス状雑音の大きさ、 j はインパルスの位置を表す。インパルス状雑音 P_j の M 変換 A_p の要素 α_i は式 (6), (8) より、次式のように表される。

$$\alpha_i = \frac{1}{N+1} (m_{i+j} - 1) p_j \quad (9)$$

式 (9) より、インパルス状雑音に M 変換をほどこすことにより、これを小振幅の M 系列信号に変換することができる。一方、式 (7) より明らかに、M 変換は時系列信号と M 系列信号の相互相関関数を求めることと等価である。したがって、M 系列信号と無相関である白色雑音の M 変換は、小振幅の不規則信号となる。上記の結果より、M 変換を行うことにより、インパルス雑音と白色雑音はいずれも小振幅の不規則信号に変換されることがわかる。この不規則信号を小振幅雑音の除去に有効な非線形フィルタ、例えば、 ϵ -分離非線形フィルタ (5) などを用いることにより信号中の除去が可能となる。筆者等は提案する方法により 1 次元信号においてインパルス状雑音および白色雑音の除去が可能であることを示した (2)。本論文では雑音除去の対象となる信号が 2 次元の画像信号であるため、文献 (5) の方法をもとに、以下のような 2 つの雑音除去方法を提案する。

まず、雑音除去の対象となる $N_1 \times N_2$ の 2 次元信号を $x(i, j) (0 \leq i \leq N_1 - 1, 0 \leq j \leq N_2 - 1)$ とする。

第一の方法 (以下、方法 A と呼ぶ) では図 1 に示すように、2 次元信号 $x(i, j)$ の各列を取り出し、式 (10) のように 1 次元信号 $X_j (0 \leq j \leq N_1 - 1)$ とする。

$$X_j = (x(0, j), x(1, j), \dots, x(N_2 - 1, j))^T \quad (10)$$

この場合、 n 次 M 系列信号を用いて M 変換を行うため、画像の大きさは $N_2 = 2^n - 1$ を満足する必要がある。この 1 次元信号 X_j の M 変換 $A_j (0 \leq j \leq N_1 - 1)$ は式 (11) より求められる。

$$A_j = (\alpha_0, \alpha_1, \dots, \alpha_{N_2-1})^T$$

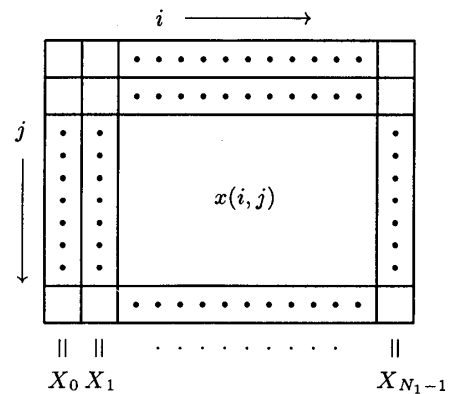


Fig. 1 Construction of one-dimensional signal in case of method A

$$= M_i^{-1} X_j \tag{11}$$

得られた M 変換 A_j を小振幅雑音を除去する非線形フィルタに通す。非線形フィルタを通した後の M 変換 B_j を式 (12) のようにおくと、その要素 β_i はもとの M 変換 A_j の要素を用いて式 (13) のように表すことができる。

$$B_j = (\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_{N_2-1})^T \tag{12}$$

$$\beta_i = g(\alpha_{i-L}, \alpha_{i-L+1}, \dots, \alpha_i) \tag{13}$$

ここで、 g は非線形な関数であり、 L は非線形フィルタのフィルタ長である。たとえば、小振幅雑音の除去に有効な非線形フィルタである ϵ -分離フィルタ⁽⁵⁾の場合、 B_j の各要素は式 (14) により求められる。

$$\beta_i = \alpha_{i,j} - \sum_{l=0}^{L-1} a_l \cdot h(\alpha_{i,j} - \alpha_{i-l,j}) \tag{14}$$

式 (14) において、 a_l は定数、関数 h は

$$|h(x)| \leq \epsilon \quad (\epsilon: \text{正の定数}) \tag{15}$$

を満足する非線形関数である。非線形フィルタを通した M 変換 B_j を式 (5) に代入し、逆 M 変換することにより、雑音が除去された信号が得られる。この処理を画像信号の各列について行うことにより、雑音が除去された 2 次元信号 $x_f(i, j)$ が得られる。

第二の方法 (以下、方法 B と呼ぶ) では、まず、前述の方法 A により、雑音を除去した 2 次元信号 $\xi_f(i, j)$ を求める。つぎに、図 2 に示すように、もとの 2 次元信号 $x(i, j)$ の各行より式 (16) にしたがって 1 次元信号 $Y_i (0 \leq i \leq N_2 - 1)$ を作成する。

$$Y_i = (x(i, 0), x(i, 1), \dots, x(i, N_1 - 1))^T \tag{16}$$

このとき、 n 次 M 系列信号を用いて M 変換を行うため、画像の大きさは $N_2 = 2^n - 1$ を満足する必要

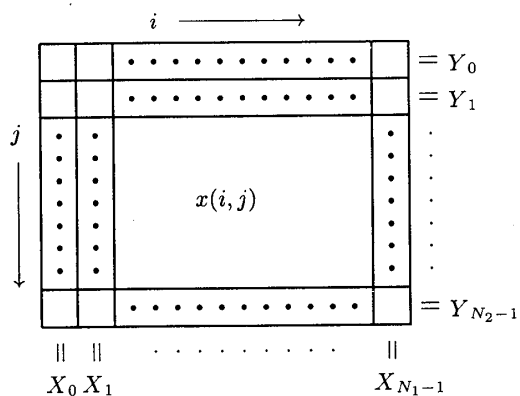


Fig. 2 Construction of one-dimensional signal in case of method B

がある。方法 A と同様に、得られた 1 次元信号 Y_i の M 変換を非線形フィルタを通して小振幅雑音を除去した信号を逆 M 変換することにより、雑音を除去した 2 次元信号 $\eta(i, j)$ が求まる。もとの 2 次元信号 $x(i, j)$ より式 (17) にしたがって、得られた信号 $\xi(i, j)$ および $\eta(i, j)$ のうち絶対値の小さなものを信号の値 $x_f(i, j)$ とするという方法である。

$$x_f(i, j) = \begin{cases} \xi(i, j) & (\text{if } |\xi(i, j)| \leq |\eta(i, j)|) \\ \eta(i, j) & (\text{if } |\xi(i, j)| > |\eta(i, j)|) \end{cases} \tag{17}$$

次章のシミュレーション結果にも示すように、第一の方法 A ではインパルス状雑音が十分に除去されない場合でも方法 B を用いることにより、雑音の少ない信号が得られる。

4. シミュレーション結果

提案した方法によりインパルス状雑音と白色雑音の除去が可能であることを確認するため、以下のようにシミュレーションを行った。まず、もとの 2 次元信号 $x_o(i, j) (0 \leq i \leq 126, 0 \leq j \leq 126)$ が式 (18) で表されるような 2 次元ガウス信号の場合を考える。

$$x_o(i, j) = \frac{A}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left\{ -\frac{(i-\mu)^2 + (j-\mu)^2}{2\sigma^2} \right\} \tag{18}$$

$$A = 40.0, \quad \mu = 63.0, \quad \sigma = 4.0$$

もとの 2 次元信号 $x_o(i, j)$ に 10 個のインパルス雑音および区間 $[-0.1, 0.1]$ で一様に分布する白色雑音を付加した 2 次元信号 $\{x(i, j)\}$ を図 3 に示す。図 3 にしめした雑音を含む 2 次元信号よりインパルス雑音を含む列 $x(i, j_p)$ を取り出したものを図 4 に示す。また、図 5 は図 4 に示した信号に対して式 (6) によ

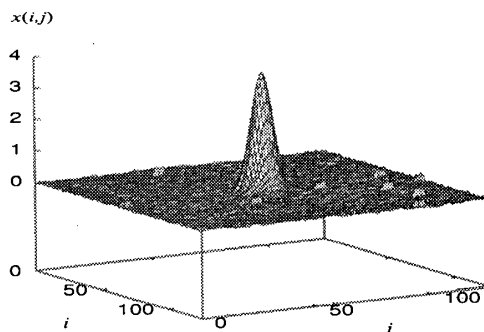


Fig. 3 Original signal $x(i, j)$ which includes impulsive noise and white noise

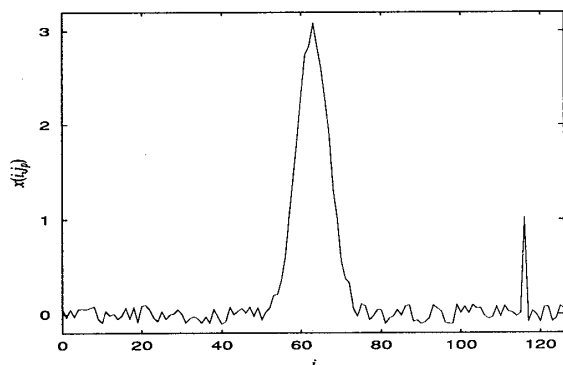


Fig. 4 Original signal $x(i, j_p)$ including impulsive noise

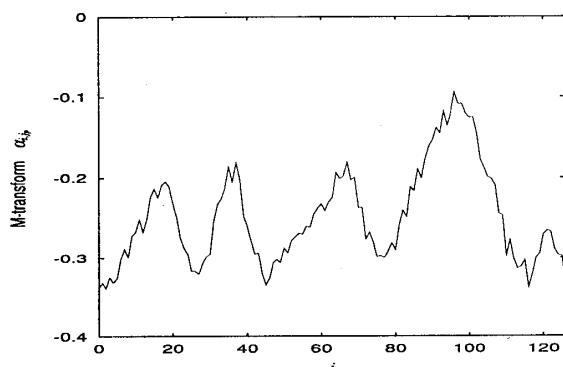


Fig. 5 M-transform of the original signal

り求めた M 変換である。ここで、信号 $x(i, j_p)$ の長さが $N = 127$ であるため、M 変換には特性多項式 $f(x)$ が次式で表されるような次数 $n = 7$ の M 系列信号を用いている。

$$f(x) = x^7 + x^3 + 1 \quad (19)$$

図 5 より、得られた M 変換がもとの信号の M 変換である振幅の大きな信号とインパルス状雑音および白色雑音の M 変換である微小振幅の不規則信号からなっていることがわかる。この M 変換を ϵ -フィルタに通して小振幅の信号を除去したものが図 6 の信号である。用いた ϵ -フィルタのフィルタ長は $L = 5$ であり、微小定数は $\epsilon = 0.1$ である。図 5 と図 6 を比較すると、 ϵ -フィルタにより微小振幅の雑音が除去されていることがわかる。図 6 の信号を逆 M 変換して得られた信号を図 7 に示す。図より、インパルス雑音および白色雑音が除去されており、本研究で提案した方法が有効であることがわかる。

図 3 の 2 次元信号に方法 A を適用し、得られた信号を図 8 に示す。図より、提案した手法によりインパルス状雑音と白色雑音が除去されているのがわかる。しかし、インパルス状雑音の影響が少し残っている。

一方、図 9 は図 3 の信号に対して、方法 B により雑音除去を行った結果である。図 8, 9 を比較すると、

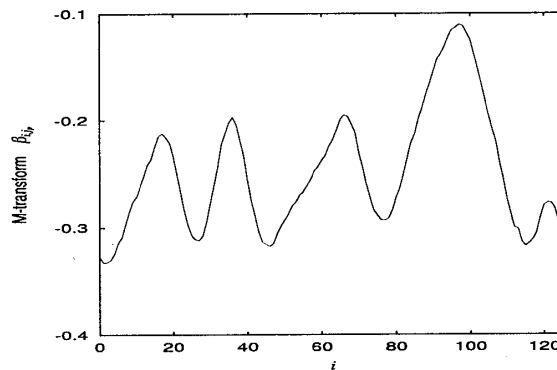


Fig. 6 Filtered M-transform

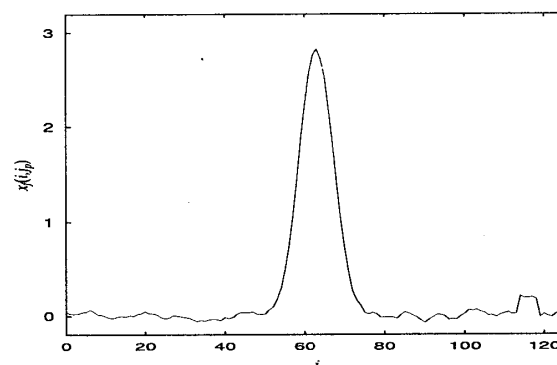


Fig. 7 Reconstructed signal $x_f(i, j_p)$

方法 B の方がインパルス状雑音および白色雑音をよく除去されていることは明らかである。

つぎに、提案する手法の有効性を式 (20) により定義した平均 2 乗誤差 (MSE) を用いて定量的に評価した。

$$\text{MSE} = \sum_{i=0}^{N_1-1} \sum_{j=0}^{N_2-1} (x_f(i, j) - x_o(i, j))^2 \quad (20)$$

式 (20) において $x_o(i, j)$, $x_f(i, j)$ はそれぞれ、もとの 2 次元信号および雑音を除去したあとの信号である。MSE と雑音除去に用いるフィルタ長 L の関係を求め

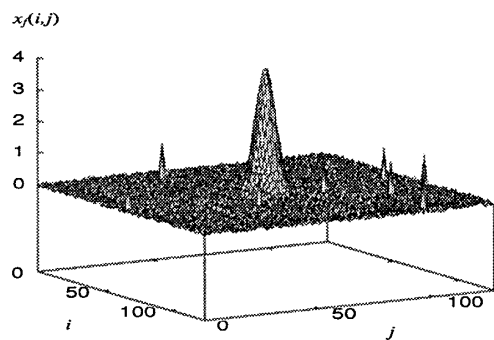
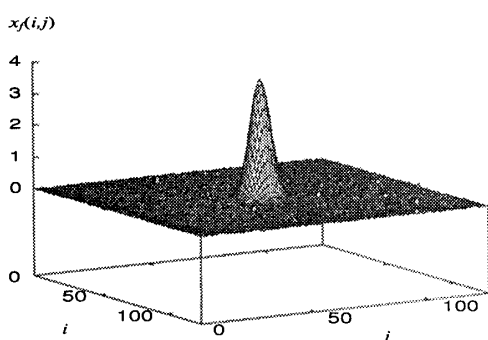
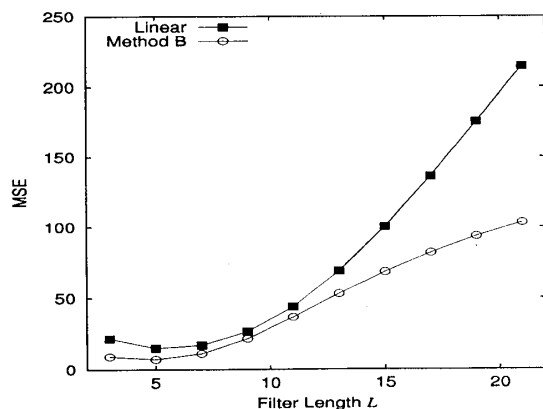


Fig. 8 Signal $x_f(i, j)$ reconstructed by method A

Fig. 9 Signal $x_f(i, j)$ reconstructed by method B

た結果が図 10 である。ここで、雑音除去の対象とした信号は図 3 と同様の 2 次元ガウス信号 $x_o(i, j)$ に 10 個のインパルス状雑音と白色雑音を付加した信号である。方法 B は M 変換とともに用いる非線形フィルタは図 8 の場合と同様に ε -分離フィルタである。また比較の対象として、線形フィルタであるフィルタ長 L の平均値フィルタを用いた場合の MSE も図中にプロットしている。図より、提案する方法 B では、線形フィルタを用いた場合よりも MSE の値が小さく、雑音低減に有効であることがわかる。一般にフィルタを用いて雑音を除去する場合、フィルタ長が長くなると雑音除去後の信号の形状が変化し、誤差が大きくなる。これに対して、提案する方法は短いフィルタ長であっても雑音低減の効果が大きいことがわかる。図がわかりにくくなるため、図 10 では方法 A の MSE 値はプロットしていないが、方法 A では、フィルタ長 L が短い場合 ($L \leq 9$) においては線形フィルタとほぼ同じ MSE 値を示し、フィルタが長くなると方法 B と同じ MSE 値をとる。以上の結果より、本研究で提案した方法においては、方法 B において短いフィル

Fig. 10 Relation between filter length L and MSE

タ長の非線形フィルタを使用することが雑音低減に有効であると考えられる。

5. AFM 信号中の雑音除去

本論文では、前章で提案した雑音除去方法を超精密表面形状計測機器のひとつである原子間力顕微鏡 (Atomic Force Microscope, AFM) の信号に含まれるインパルス状雑音の除去に適用した。AFM は原子間力を用いて物体の表面形状を計測するが、走査速度を上げるとインパルス状の雑音が混入し、正確な測定が困難になる。このようなインパルス状雑音は通常のガウシアンローパスフィルタやメディアンフィルタでは十分に雑音を除去することができない⁽⁶⁾。このため、局所的なメディアンフィルタなどが提案されている⁽⁶⁾が、近傍領域の選び方が不適当な場合、この方法でもインパルス状雑音や白色雑音が十分に除去できない。

本研究では、前章で提案した M 変換を用いる雑音除去手法を原子間力顕微鏡信号中の雑音除去に用いる。本研究で使用した原子間力顕微鏡はセイコー電子工業(株) SPI3700 であり、測定範囲は最大で $150\mu\text{m} \times 150\mu\text{m}$ 、最小で $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ である。変位検出分解能は測定範囲が $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m}$ 場合に最小であり、面内が 0.2 nm 、垂直方向が 10^{-2} nm である。AFM チップは底辺が $4\mu\text{m}$ の四角錐形状の窒化珪素であり、先端半径は十分に小さく、また摩擦により分解能の低下が生じれば直ちに交換する消耗品であるため、分解能の値への影響はない。

図 11 にインパルス状雑音を含んだ AFM 信号の一例を示す。ここで、測定に使用した試料は半導体デバイス用に鏡面研磨したシリコンである。走査速度は 1 Hz 、測定範囲は $25.57\mu\text{m} \times 25.57\mu\text{m}$ であり、図は測定した 256×256 画素の画像より 127×127 画素を取り出し、表示したものである。図より、この画像信号にはインパルス状の雑音が多く含まれており、試料の正確な表面性状は測定できていないことは明らかである。

この画像信号に対して、提案する方法 A により雑音除去を行った後の AFM 信号を図 12 に示す。この場合、画像の大きさが 127×127 であるため、M 変換に使用した M 系列信号の次数は $n = 7$ である。非線形フィルタとしては、フィルタ長 $L = 5$ の傾斜適応 ε -フィルタ⁽⁵⁾を用いている。図より、提案する方法 A により、インパルス状雑音が低減されていることがわかるが、まだインパルス状雑音の影響が大きな部分

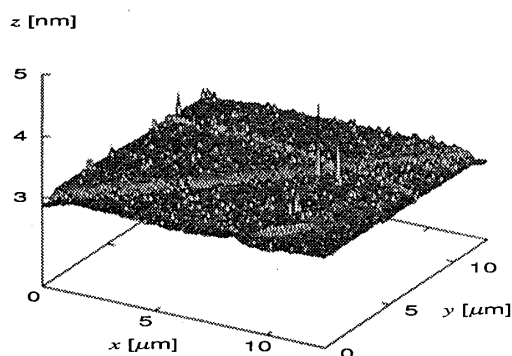


Fig. 11 AFM signal including impulsive noise

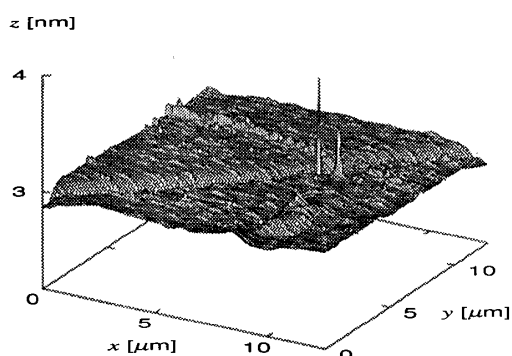


Fig. 12 AFM signal reconstructed by method A

があり、明瞭な物体の表面形状は得られていない。

一方、図 13 は方法 B により雑音除去処理を行った信号である。図 12 と図 13 を比較すると、インパルス状雑音が除去されており、試料表面の溝状の部分が明確になっていることがわかる。ただ被測定表面上の異物に起因すると思われる画像中の特に大きなインパルス状雑音に関しては、提案する方法でも除去は不可能であった。

6. あとがき

本研究では、M 変換の性質を利用して、信号に含

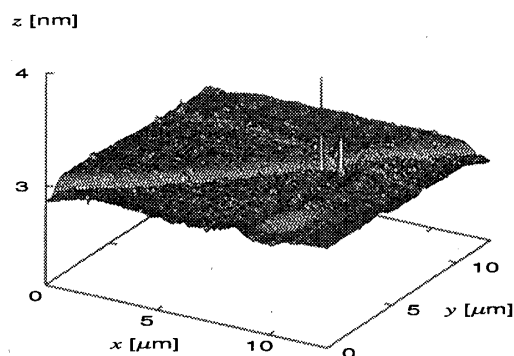


Fig. 13 AFM signal reconstructed by method B

まれるインパルス状雑音および白色雑音を除去する新たな方法を提案した。シミュレーションの結果より、線形フィルタよりも雑音除去に有効であることが確認された。さらに、提案する方法を原子間力顕微鏡信号に含まれるインパルス状の雑音の除去に適用し、良好な結果が得られることを示した。本論文で提案した雑音除去方法は M 変換と様々な非線形フィルタを組み合わせることにより、高精度表面計測等における種々の雑音除去に有効であると考えられる。

文 献

- (1) H.Kashiwagi, M.Liu, H.Harada and T.Yamaguchi, *M-transform and its Application to System Identification*, "Trans. of the Society of Instrument and Control Engineers", Vol.E-1, No.1, (2002), pp.289-294
- (2) 原田, 柏木, 安藤, 梶, M 変換を用いるインパルス状雑音除去, "計測自動制御学会論文集", 39 巻, 7 号, (2003), pp.688-690
- (3) 棟安, 田口, 非線形デジタル信号処理, 朝倉書店 (1999)
- (4) 柏木, M 系列とその応用, 昭晃堂, (1996)
- (5) 原島, 小田島, 鹿喰, 宮川, ϵ -分離非線形デジタルフィルタとその応用, "電子通信学会誌", J65-A 巻, 4 号, (1982), pp.297-304
- (6) 柳, 成瀬, 光学式表面凹凸形状測定機におけるデータ補正の試み, "精密工学会誌", 67 巻, 1 号, (2001), pp.106-108