実用的な表面トポグラフィデータの生成と応用*

Practical Data Generation of Surface Topography and Its Application

内館道正**

Michimasa UCHIDATE

Key words

surface metrology, surface topography, calibration, measurement standard, softgauge, surface topography generation, simulation, algorithm

1. はじめに

トライボロジー特性などの表面機能のさらなる高度化や、光学的手法をはじめとする表面トポグラフィ測定方式および機種が多様化の流れの中で、加工面粗さなどの測定精度およびトレーサビリティの問題は避けて通れない。

JIS B 0659-1:2002 においては、触針式粗さ計による輪郭曲線方式の表面トポグラフィ校正のための標準片 (material measure) として、表 1 のような種類が規定されている¹⁾。タイプ A と C は、精密に製作された溝等で高さおよび横方向の校正を行うもので、タイプ B と E は触針先端形状の確認および座標系の総合点検に用いる。そして、タイプ D は粗さ測定器およびパラメータの総合点検に用いるもので²⁾、ユーザーレベルで最も日常的な標準片といえよう。同規格は 2 次元の曲線に対するものであるが、ISO の技術委員会 TC213 では面領域 (三次元) の標準片の規格化を検討中である。また、測定データのデジタル処理化およびパラメータの多様化・複雑化の中で、解析の妥当性を検証するソフトゲージ (softgauge) が必要とされている³⁾。

本稿では、面領域測定のためのランダム標準片およびソフトゲージとして適用が可能な、表面トポグラフィデータの生成とその応用について述べる。

2. ランダム表面の生成手法

表面トポグラフィデータは、面内の直行する二方向を X , Y 方向とし、それぞれの方向に等しいデータ間隔 Δx , Δy で離散化した点 (x, y) における高さデータ $z(x, y)$ として測定するのが一般的である。そして、測定データに基づ

いて高さ方向や面方向などのパラメータが算出される。

ランダム表面トポグラフィデータ生成はこの手順を逆に行うもので、はじめに必要なとされるデータの条件 (データ点数やピッチ、スペクトル特性、高さ分布など) を指定し、その条件を満たすランダム表面 $z(x, y)$ の数値を数値計算によって生成する (図 1)。生成アルゴリズムとしては、

- 1) 係数行列による畳み込み^{4)~12)}
- 2) 逆フーリエ変換を用いる方法^{13)~15)}
- 3) フラクタルモデル^{16)~17)}

などが提案されている。1) の例として、非因果的二次元自己回帰 (AR: Autoregressive) モデル⁶⁾ を用いると、 $z(x, y) = z_{xy}$ は以下のように表される (図 2)。

$$z_{xy} = \sum_{(i,j) \in D} \phi_{ij} z_{x-\Delta x \cdot i, y-\Delta y \cdot j} + a_{xy} \quad (1)$$

$$D = \{(i,j) | -m \leq i \leq m, -n \leq j \leq n, (i,j) \neq (0,0)\} \quad (2)$$

ここで、 $\{\phi_{ij}\}$ はデータ間の相関を表す AR パラメータ、 $\{a_{xy}\}$ はランダム性を表すホワイトノイズ (通常、標準正規分布 $N[0, 1]$)、 m と n はそれぞれ X , Y 方向の次数である。このモデルによる生成データは、放電加工面、研削面、研磨面などの表面トポグラフィを精度良く再現できることが確かめられている⁷⁾⁸⁾。そのほかに、ノイズ成分に対する畳み込みとして z_{xy} を表現する二次元移動平均 (MA: Moving Average) モデルがある^{9)~12)}。

$$z_{xy} = \sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n \theta_{ij} a_{x-\Delta x \cdot i, y-\Delta y \cdot j} \quad (3)$$

ここで、 $\{\theta_{ij}\}$ は MA パラメータである。

2) の逆フーリエ変換を用いる方法はより直接的な方法であり、Wu¹³⁾¹⁴⁾ や Pawlus¹⁵⁾ らの研究が参考になる。また、3) のフラクタルモデルとして、パイトゲンら¹⁶⁾ や伊

*原稿受付 平成 22 年 6 月 15 日

**正 会 員 岩手大学工学部 (岩手県盛岡市上田四丁目 3 番 5 号)

内館道正

岩手大学生産開発工学修士、博士 (工学)。三次元表面形状のモデル化と解析、水潤滑環境下でのトライボロジーの研究に従事。

表 1 JIS B 0659-1 に規定されている標準片の分類¹⁾

タイプ	名称	種類
A	深さ用標準片	丸底/平底の広幅溝
B	触針先端用標準片	三角溝、ナイフエッジなど
C	間隔用標準片	三角/円弧溝など
D	粗さ用標準片	不規則形状
E	座標用標準片	半球、台形プリズム

図1 データ生成の流れ

図2 非因果的二次元自己回帰モデルの概念図

藤ら¹⁷⁾の研究がある。

このように数種類のモデルが提案されており、同一のモデルでも複数のアルゴリズムが存在するため、データ生成にはそれらの選択が必要となる。2) の逆フーリエ変換による方法は、生成データの一様性という点において、MAモデルやARモデルに劣っているとする指摘がある¹⁸⁾。また、式(3)のように係数行列の範囲を1/4平面とするモデルでは、相関係数にゆがみが生じる⁶⁾。しかしながら、異なったモデル間での生成データの特長(指定した条件との一致度、一様性など)に関する定量的な比較はほとんどなされておらず、アルゴリズムの複雑さや計算時間等の利便性を含め、今後の課題といえる。

生成データ $\{z_{xy}\}$ の高さ分布は、一般に正規分布となる。 $\{z_{xy}\}$ の標準偏差は、 $\{z_{xy}\}$ のそれぞれの値に Sq/Sq^* (Sq と Sq^* は、それぞれ生成条件と $\{z_{xy}\}$ の標準偏差) を掛けることで修正するのが簡単である。また、突起がトランケート

された表面のように正規分布から外れる場合には、Johnson変換^{19)~21)}やPearsonシステム²²⁾のような方法が適用される。ランダム成分 $\{a_{xy}\}$ を変えることで、統計的には同一な性質をもちながら、異なった形状の表面トポグラフィを生成することも可能である。なお、別のアプローチとして、加工プロセスを模擬したシミュレーションがある²³⁾。

3. 標準片およびソフトゲージとしての応用

現在審議中の面領域の表面性状に関するISOにおいて、日本発の生成データに基づく「ランダム標準片」が検討されている。図3は上述のARモデルによって生成されたデータと、それをもとにFIB(Focused Ion Beam)で製作された標準片のプロトタイプである²⁴⁾。図3(a)の生成データはランダムでありながら、データ端部で反対の端と連結する周期性を有している(図3(b))。そのため、作成された標準片では図3(c)のA~Cのように測定箇所が変わっても高さデータに差異はなく、安定した校正が行えるように工夫されている。同種の生成データから、マシニングセンターを用いて作成されたより広領域(評価領域 $768 \times 768 \mu\text{m}^2$)の標準片も試作されており²⁵⁾、面領域の測定器の日常的なチェックに活用できる。なお、英国NPL(National Physical Laboratory)においても、同様な試作が試みられている。

解析用ソフトウェアの妥当性評価のためのソフトゲージとして、米国NIST(National Institute of Standards and Technology)はSMATS(Surface Metrology Algorithm Testing System)の試験運用を行っており²⁶⁾²⁷⁾、そのなかで生成データが活用されている(図4)。欧州においても、英国Huddersfield大学のグループを中心として標準解析

図3 生成データと FIB による試作標準片の表面トポグラフィー [出典：文献 24)]

図4 NIST による表面トポグラフィー解析用アルゴリズム検証システム SMATS [出典：文献 26)]

アルゴリズム (reference algorithm) 提案の準備が進められており、国外の動きが活発化しつつある。

4. 終わりに

本解説記事では、確率モデル等による表面トポグラフィデータの生成と応用について紹介した。これまでのところ、表面は確率的な意味で一様という前提の下でモデル化がなされており、その性質は標準片として望ましい。その一方で、材料・加工・摩耗等の不均一性から、実際は単純でないという意見もあろうかと思う。非一様モデルは、その基礎となる理論が十分に確立されておらず、現状では取り扱いが困難である。例えば、上述の係数行列による畳み込み手法では、座標によって係数を変化させることで非一

様性を表現可能であるが、パラメータの対称性が失われることで複素数経由の問題となる。複数モデルへの分解と統合が現実的な解と思われる。

データ生成は、それ自体では問題解決につながらない。あくまでも「ツール」である。本記事で紹介したランダム校正データの他に、トライボロジーや光学などのシミュレーションへ活用されている。CAD/CAM システムへの応用の研究もある²²⁾。読者の方々にも面白い応用をご一考いただければ幸いである。

参考文献

- 1) JIS B 0659-1:2002 (ISO 5436-1:2000) 製品の幾何特性仕様 (GPS) 一表面性状：輪郭曲線方式；測定標準—第 1 部：標準

- 片.
- 2) R. Leach: Measurement Good Practice Guide No. 37—The Measurement of Surface Texture Using Stylus Instruments, NPL, (2001) 44.
- 3) L. Blunt, X. Jiang, R. Leach, P. Harris and P. Scott: The Development of User-friendly Software Measurement Standards for Surface Topography Software Assessment, *Wear*, **264** (2008) 389.
- 4) D.J. Whitehouse: The Generation of Two Dimensional Random Surfaces Having a Specified Function, *Annals. CIRP*, **32**, 1 (1983) 495.
- 5) G. Xinjian and H. Yiyun: The Modeling and Simulation of a Rough Surface, *Wear*, **137** (1990) 275.
- 6) M. Uchidate, T. Shimizu, A. Iwabuchi and K. Yanagi: Generation of Reference Data of 3D Surface Texture Using the Non-Causal 2D AR Model, *Wear*, **257** (2004) 1288.
- 7) 清水友治, 内館道正, 岩渕明: 非因果的二次元 AR モデルによる三次元ランダム表面粗さデータのモデリングと生成 (第 1 報), *トライボロジスト*, **45**, 6 (2000) 477.
- 8) 内館道正, 清水友治, 岩渕明: 非因果的二次元 AR モデルによる三次元ランダム表面粗さデータのモデリングと生成 (第 2 報), *トライボロジスト*, **46**, 10 (2001) 814.
- 9) N. Patir: A Numerical Procedure for Random Generation of Rough Surfaces, *Wear*, **47** (1978) 263.
- 10) V. Bakolas: Numerical Generation of Arbitrarily Oriented Non-Gaussian Three-Dimensional Rough Surfaces, *Wear*, **254** (2003) 546.
- 11) J.A. Ogilvy: Theory of Wave Scattering from Random Rough Surfaces, IOP Publishing Ltd., (1991) 243.
- 12) Y.Z. Hu and K. Tonder: Simulation of 3-d Random Surface by 2-D Digital Filter and Fourier Analysis, *Int. J. Mach. Tools Manufact.*, **32**, 1 (1992) 83.
- 13) J.J. Wu: Simulation of Rough Surfaces with FFT, *Tribology Int.*, **33** (2000) 47.
- 14) J.J. Wu: Simulation of Non-Gaussian Surfaces with FFT, *Tribology Int.*, **37** (2004) 339.
- 15) P. Pawlus: Simulation of Stratified Surface Topographies, *Wear*, **264** (2008) 457.
- 16) H.-O. パイトゲン, D. ザウベ: フラクタルイメージ, シュプリンガー・フェアラーク東京, (1990) 63.
- 17) 伊藤憲朗, 塚田忠夫: フラクタルディメンジョンを利用した工学表面の不規則微細凹凸の生成 (第 1 報, 等方性表面凹凸), *設計・製図*, **27**, 12 (1992) 525.
- 18) S.J. You and K.F. Ehmann: Computer Synthesis of Three-Dimensional Surfaces, *Wear*, **145** (1991) 29.
- 19) N.L. Jonson: Systems of Frequency Curves Generated by Moments, *Biometrika*, **36** (1949) 149.
- 20) I.D. Hill, R. Hill and R.L. Holder: Fitting Johnson Curves by Moments, *Applied Statistics*, **25** (1976) 180.
- 21) I.D. Hill: Normal-Johnson and Johnson Normal Transformations, *Applied Statistics*, **25** (1976) 190.
- 22) 戸澤幸一, 小林義和, 白井健二, 原靖彦, 菊池照彦: 機械加工による表面テクスチャ生成システムの開発, *精密工学会誌*, **71**, 7 (2005) 879.
- 23) 松井正己: 統計的手法による研削機構の解析, 一研削加工のシミュレーション, *機械の研究*, **53**, 2 (2001) 257.
- 24) M. Uchidate, K. Yanagi, I. Yoshida, T. Shimizu and A. Iwabuchi: Generation of 3-D Random Topography Datasets with Periodic Boundaries for Surface Metrology Algorithms and Measurement Standards, *Wear*, (In press).
- 25) K. Nemoto, K. Yanagi, M. Aketagawa, I. Yoshida, M. Uchidate, T. Miyaguchi and H. Maruyama: Development of a Roughness Measurement Standard with Irregular Surface Topography for Improving 3D Surface Texture Measurement, *Measurement Science and Technology*, **20** (2009) 1.
- 26) S.H. Bui and T.V. Vorburger: Surface Metrology Algorithm Testing System, *Precision Engineering*, **31** (2007) 218.
- 27) NIST, Internet Based Surface Metrology Algorithm Testing System (<http://syseng.nist.gov/VSC/jsp>) (2010.6.7 アクセス)