

平成 30 年 6 月 23 日現在

機関番号：11201

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05751

研究課題名(和文) Pearson システムを用いた三次元表面性状のロバスト分布パラメータ推定法

研究課題名(英文) Robust Estimation of the Areal Texture Parameters using the Pearson Distribution System

研究代表者

内館 道正 (Uchidate, Michimasa)

岩手大学・理工学部・准教授

研究者番号：30422067

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,800,000円

研究成果の概要(和文)：表面の微細凹凸(性状,粗さ)の評価にスキューネスSskとクルトシスSk<sub>u</sub>が用いられるケースが見られるが,これらのパラメータは,きずなどの外れ値の影響を非常に強く受けてしまい,ばらつきが非常に大きいという問題があった.本研究ではデータの確率密度関数に対してPearson分布(タイプIV)を最尤法によって適合し,適合された確率分布関数からSskとSk<sub>u</sub>を算出する方法を試行した.検討の結果,生成されたデータに関しては,分布を適合してから算出する方法によって理論値に近い値の推定が可能であることがわかった.しかしながら,実測表面については更なる検討が必要とわかった.境界要素法による接触計算も試行した.

研究成果の概要(英文)：The surface texture parameters such as the skewness Ssk and kurtosis Sk<sub>u</sub> are sensitive to outliers on the surface. Hence, these values tend to be very unstable and the application of these parameters has been limited in engineering practice. To overcome these difficulties, this research seeks to develop a robust method to estimate these parameters. Firstly, the Pearson distribution type IV was fit to the height distribution of surface textures. Then the values of Ssk and Sk<sub>u</sub> were calculated on the fitted distribution parameters. Results showed that, in case of the computationally generated datasets, Ssk and Sk<sub>u</sub> calculated from the fitted distribution parameters are closer to the theoretical values than those calculated directly from the datasets. However, with regard to the actual surfaces, there were some discrepancies between the fitted curve and actual height distribution. Contact simulation based on the boundary element method was also studied.

研究分野：トライボロジー

キーワード：表面粗さ 高さ分布 モデル 接触 シミュレーション パラメータ

### 1. 研究開始当初の背景

日本の強みである細部まで緻密に作り上げられた高効率・高信頼性の機械システムにおいて、トライボロジー技術は欠かせない。例えば近年の自動車の低燃費・メンテナンスフリー化には、トライボロジー特性の改善も大きく寄与している。近年では、トライボロジー特性改善のため、加工条件の最適化等によって粗さや微細凹凸を制御し、所望の表面機能を実現するテクスチャリングの技術が広く用いられている。そこでは、表面機能が良い表面をどのようなパラメータで設計・記述するかが問題となっていた。

表面の特性を表すパラメータとして、以前より、算術平均粗さ Ra や最大高さ粗さ Rz などが用いられてきた。これらは表面の高さ方向の振幅の大小を表すものであるが、なじみ面の様にトランケートされた（高い山が削られた）表面の評価をする場合（例えば、図1）は、接触する突起や油溜まりとなる溝部の特徴量を十分に表す量とは言いがたい。そこで、近年、高さ分布の形状を表す特徴量である、スキューネス Ssk とクルトシス Sku を用いて、より詳細な表面の評価を行う研究例が見られるようになってきていた（それぞれ、統計用語で歪度（わいど）と尖度（せんど）と

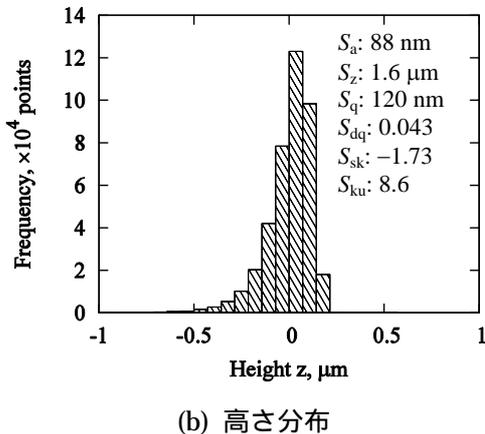
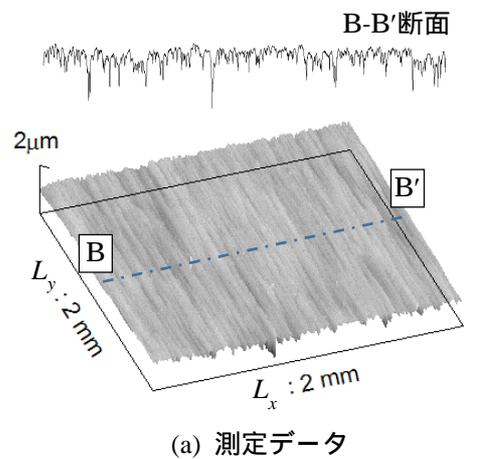


図1 負のスキューネスを有する表面の例（平面研削+バフ研磨）

呼ばれる統計量に近い意味合いを持つ）。

しかしながら、これらの統計量は表面にあるきずなどの外れ値の影響を非常に大きく受けるため、同じ表面であっても測定箇所によって大きくばらつくという問題があり、工業的な表面の評価に適用するには困難な場合があった。

### 2. 研究の目的

前述のような背景を受け、本研究ではスキューネス Ssk とクルトシス Sku のばらつきを小さくできるロバストな推定方法として、Pearson システムを用いた方法を試行し、その有効性を検討した。また、接触における表面性状の影響を検討するため、境界要素法を用いた接触解析についても検討した。

### 3. 研究の方法

Pearson システムは、複数の関数から成る確率密度関数のモデルである。本研究では、無限な台を持つ Pearson タイプ IV を適用した。有限な台を持つ分布では、実表面への適用が困難と考えたためである。このモデルにおいて、確率密度関数  $f(z)$  は、平均値 0 のデータ  $z$  について以下の様な式で表される。

$$f(z) = k \left( 1 + \frac{z^2}{\alpha^2} \right)^{-m} \exp \left\{ -v \tan^{-1} \frac{z}{\alpha} \right\} \quad (1)$$

$$k = \frac{1}{\alpha F(m, v)} \quad (2)$$

$$F(m, v) = \int_{-\pi/2}^{\pi/2} \cos^{-2(m-1)} \theta d\theta \quad (3)$$

パラメータ  $m, v, \alpha$  を変化させると、この  $f(x)$  は図2の様に变化する。これらのパラメータについて、スキューネス Ssk とクルトシス Sku は解析的に以下から求めることができる。

$$\mu_2 = \frac{\alpha^2}{r^2(r-1)}(r^2 + v^2), \quad m > \frac{3}{2} \quad (4)$$

$$\mu_3 = -\frac{4\alpha^3 v(r^2 + v^2)}{r^3(r-1)(r-2)}, \quad m > 2 \quad (5)$$

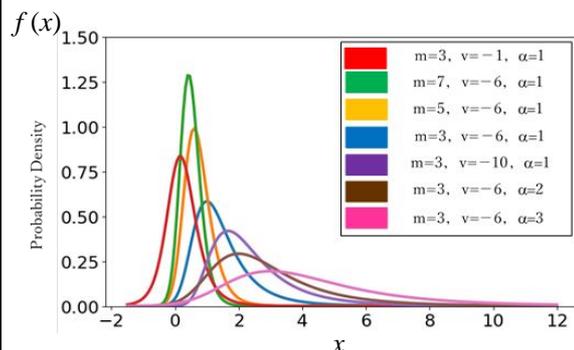


図2 Pearson タイプ IV

$$\mu_4 = \frac{3\alpha^4(r^2 + v^2)\{(r+6)(r^2 + v^2) - 8r^2\}}{r^4(r-1)(r-2)(r-3)},$$

$$m > \frac{5}{2} \quad (6)$$

$$r = 2m - 2 \quad (7)$$

$$S_{sk} = \frac{\mu_3}{\mu_2^{\frac{3}{2}}} \quad (8)$$

$$S_{ku} = \frac{\mu_4}{\mu_2^2} \quad (9)$$

Pearson タイプ IV を表面高さデータの確率密度関数に最尤推定法によって当てはめ、求められたモデル式から式(4)から式(9)を用いて  $S_{sk}$  と  $S_{ku}$  を算出することで、きずなどの外れ値に影響されにくいロバストな評価が行えるものと考えた（この方法を以下では「最尤法」と呼ぶ）。

一方、 $S_{sk}$  とクルトシス  $S_{ku}$  は、表面性状の測定データから、直接的に求めることもできる（この方法を以下では、「直接法」と呼ぶ）。

$$S_{sk} = \frac{Ave \langle z^3 \rangle}{S_q^3} \quad (10)$$

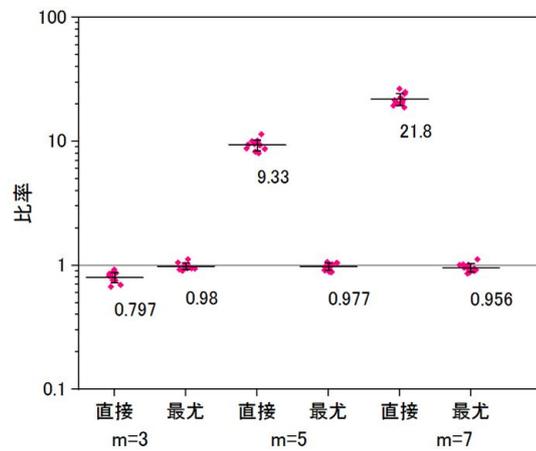
$$S_{ku} = \frac{Ave \langle z^4 \rangle}{S_q^4} \quad (11)$$

ここで、 $S_q$  は二乗平均平方根高さである。

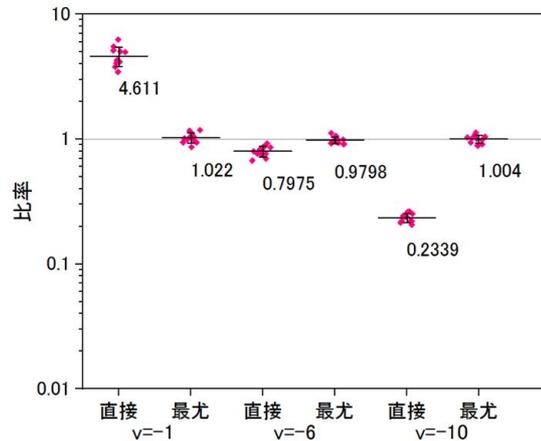
最尤法の有効性を検討するため、生成されたデータを用いて値の推定を行い、直接法との比較を行った。データの生成には、棄却法を用い、Pearson タイプ IV の確率変数  $z$  を、7 種類の  $m$ 、 $v$ 、 $\alpha$  の組み合わせについてそれぞれ 11 組を生成した。また、実測の非正規分布表面として、エンジンのシリンダライナーで用いられているホーニング加工面での検討を行った。さらに、接触解析としては境界要素法を用いた手法の検討を行った。

#### 4. 研究成果

図 3 に直接法と最尤法における値の推定結果の例を示す。ここで、縦軸の比率とは、生成データの理論値に対する比率で、1 に近いほど理論値に近い値が推定できていると言える。図より、直接法では理論値から最大 20 倍程度外れた値が算出されている場合があるのに対し、最尤法では極めて近い推定値が得られていることがわかる。さらに、推定値のばらつき（標準偏差）に関する比較より、直接推定では大きくばらついてしまうケースが見られたが、最尤法では比較的安定した推定値が得られることがわかった。



(a)  $v = -6, \alpha = 1$



(b)  $m = 3, \alpha = 1$

図 3 直接法と最尤法の比較（比率は 1 に近いほど理論値に近いことを示す）

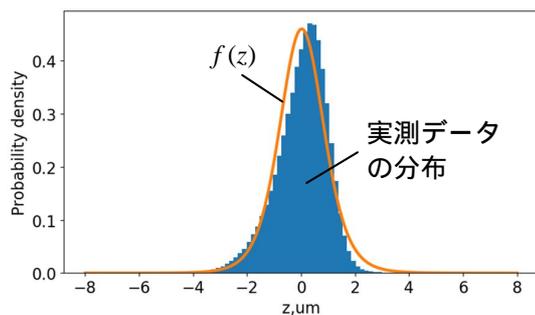


図 4 実測のホーニング加工面への Pearson タイプ IV 適合結果

実測データにおけるあてはめの結果を図 4 に示す。適合された確率密度関数  $f(z)$  は、実測の分布とずれていることがわかる。この原因については、Pearson タイプ IV が高さの平均値の変動に対して追従できない関数となっているためであると考えられ、実表面への適用については、推定アルゴリズムの改良に加え、その他の確率密度関数の試行など、さらなる検討が必要である。

接触解析手法の確立を目指し、境界要素法 (Boundary Element Method, BEM) を用いた粗

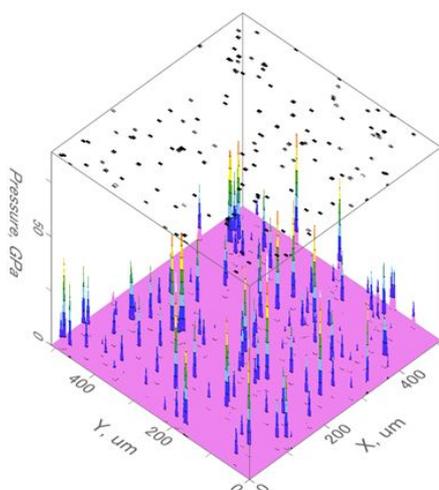


図5 境界要素法による接触解析による接触圧力分布の例

さ面の解析手法について検討を行った(図5)。統計的な手法と比較した結果、正規分布の等方性粗さ面で、表面波長に対して十分に細かなサンプリング間隔のデータの場合、表面の傾斜を用いる BGT モデルによる結果と近い値が得られることがわかった。また、ISO 25178-2:2012 で定義されている Segmentation では、近接 8 点法とほぼ類似した結果が得られた(〔雑誌論文〕)。

#### まとめ

Pearson 分布を用いたスキューネスとクルトシスの評価手法を試行し、生成された確率変数に対して検討したところ、この方法では直接的に計算する場合よりも理論値に近い値が得られることがわかり、その有効性を確認することができた。一方、実測の非正規分布の粗さ面に適用した場合は、実測値と分布関数とのずれが生じるという結果となった。この点については、適合アルゴリズムの修正とその他のモデルの適用を検討する予定である。また、境界要素法による接触解析手法について検討し、等方性の正規分布表面に関しては確率的な手法と類似した結果が得られた。今後は、異方性表面や非正規分布表面での検討が必要である。

#### <引用文献>

- 鈴木厚, 自動車の省資源・省エネルギー予測, トライボロジスト, 61, 2 (2016)109-115.  
 青木才子, 益子正文, 擬静止状態からの広いすべり速度範囲における鋼の境界摩擦特性, トライボロジスト, 53, 3 (2008) 156-161.  
 内館道正, 三次元表面粗さパラメータの動向, トライボロジスト, 60, 1(2014)15-22.  
 蓑谷千鳳彦, 統計分布ハンドブック増強版, 朝倉書店, (2010)。

## 5. 主な発表論文等

### 〔雑誌論文〕(計1件)

M. Uchidate, Comparison of contact conditions obtained by direct simulation with statistical analysis - Normally distributed isotropic surfaces -, Surface Topography: Metrology and Properties, 6, 3(2018)034003. 査読有  
 DOI:10.1088/2051-672X/aac072

### 〔学会発表〕(計6件)

内館道正, 三次元表面性状パラメータを用いた統計理論に基づく接触解析と直接計算の比較, トライボロジー会議 2017 秋高松(2017)G29. 2017年11月16日.

M. Uchidate, Comparison of contact conditions obtained by direct simulation with statistical analysis - Normally distributed isotropic surfaces -, 16th International Conference on Metrology and Properties of Engineering Surfaces, Gothenburg, Sweden. 2017年6月28日.  
 N. Hasegawa, T. Fujita, N. Kamura, M. Uchidate and M. Abo, Improvement of rolling contact fatigue life by controlling run-in surface characteristics, APCF2016, Toyama, Japan (p189-190)2016年9月19日~22日.

内館道正, 直接シミュレーションによる接触状態と統計解析の比較(正規分布等方性表面の場合), 日本機械学会 2016 年度年次大会, 福岡, S1150103. 2016年9月12日.

N. Hasegawa, T. Fujita, M. Uchidate, M. Kawashima, and M. Abo, Fatigue progression at rolling contact surfaces with hardness difference and surface modified layer, ICEFA, Leipzig, Germany (09B.2)2016年7月3日~6日.

内館道正, 自己相関係数のべき乗係数が表面性状と接触状態に及ぼす影響, 日本トライボロジー学会 トライボロジー会議 2015 春 姫路 (2015) G15(P520-521). 2015年5月29日.

### 〔その他〕

ホームページ等  
<http://www13.plala.or.jp/Uchi/field01.html>

## 6. 研究組織

### (1)研究代表者

内館 道正 (UCHIDATE, Michimasa)  
 岩手大学・理工学部・准教授  
 研究者番号: 30422067