表面形状測定技術 —概要と触針式測定法—

荒 井 正 敏*

*(株)東京精密 計測社(〒300-0006 茨城県土浦市東中貫町4)

Surface Texture Measuring Instruments —General Description and Stylus Method—

Masatoshi ARAI

*Tokyo Seimitsu Co.,Ltd. Metrology Company(4, Higashinakanuki-machi, Tsuchiura-shi, Ibaraki 300-0006)

Keywords : Surface Texture Measurement, Form Measurement, Stylus Instrument

1. はじめに

表面形状は、表面に与えられた加工や表面処理によりさまざまな変化を起こす。それ故、表面形状を評価することにより、単に形状そのものの把握にとどまらず、表面処理のプロセス状況を推定することが試みられている。

表面形状を測定するには、さまざまな分析手法がある。そしてその方式によってその結果は少しずつ変わっている。ここではこの方式による問題と、広く用いられる触針式の概要および表面形状評価の規格について述べる。

2. 検出原理

検出原理として、ミクロな領域では、AFM, TEM, SEM, 微分干渉顕微鏡, 白色光干渉顕微鏡などが用いられる。

これに対して、マクロな領域では、触針式表面粗さ測定機, 光学共焦点顕微鏡, 斜入射干渉計および光変位センサや静電容量センサを走査する方法などが用いられる。これらさまざまな方法について比較してみると、結果に何らかの差異が見られる場合がある¹⁾。これにはさまざまな原因がある。

その原因の一つは、対象とする表面は何か²⁾、どの物理現象を評価するかということである。たとえば微分干渉顕微鏡, 位相シフト干渉顕微鏡, 白色光干渉顕微鏡, 光学共焦点顕微鏡, 斜入射干渉計および光変位センサなどは光学的表面の反射を検出している。この場合、半透明体・多層膜・急傾斜面・黒体などで、表面検出が困難な場合や、表面でなく下層の形状を検出してしまう場合がある。また、SEM・TEM・静電容量センサなどは、電子雲により形成される電磁気学的表面を検出している。この場合、表面の導電率や静電気の影響がある。これに対して、AFMや触針式表面粗さ測定機では、探針・触針が接触して機械的力学的表面を検出している。よって軟質材や液体表面は計測が困難である。

また別の観点では、測定力や光波長・電子線加速電圧など

によるエネルギーの相違によって、異なる深さの表面が検出される。さらに、同一原理の計測においても、触針先端半径や光スポット径などのプローブのサイズおよび測定システム固有のフィルタリング効果によって、測定されるデータの空間分解能は大幅に異なる。表面構造に幅の狭い溝や亀裂が存在しても、触針式ではその中を知ることはできない。

別の指標である全測定範囲の大きさは、一般的にはこの空間分解能にほぼ比例している。たとえば空間分解能の最も小さいAFM, TEMなどは、評価範囲も極小領域に限られる。上記ミクロ・マクロの計測の差がこれにあたる。これに対して光学的測定機では、ステッチングにより測定範囲を拡大することが行われている。

したがって、表面形状を評価する場合、評価の目的が何であるかによって、測定装置を選択することが重要である。

3. 表面形状測定規格

表面形状を定量的に評価する目的では、形状を何らかの評価基準により数値化する必要がある。それを国際的に標準化する目的で、ISO/TC213において、表面形状の評価方法の標準規格の審議が行われている。但し、TC213では主に古典的な触針式計測方法の標準化が行われてきた。その結果、触針式表面粗さ測定機では、標準化が浸透し、世界的に比較しうる計測が行われている。以下、触針式表面形状測定法を中心とした規格の動向について述べる。

3.1 表面形状のISOとGPSマトリックス

従来、表面粗さ・うねりや筋目などの表面形状はSurface textureと呼ばれ、JISB0031: '94では「面の肌」と呼んでいたが、JISB0031: '03³⁾から「表面性状」と名称を変更した。従来の産業界において表面性状は加工方法・加工条件でほぼ決定され、三角記号で指示される最大高さ R_{max} 、十点平均粗さ R_z および中心線平均粗さ R_a パラメータを、はめあいや寸法測定誤差の管理に用いるものであった。最近は、

摺動面の摩擦力と潤滑性、接触部応力集中、シール特性、光散乱反射特性など、部品の各種特性に影響を及ぼす表面性状について、平均粗さ・平均波長・負荷長さ率および平均傾斜などのさまざまなパラメータが使用されている。もともとは提案国別規格だったが、欧州では工業規格は世界共通規格で管理する方向で、それらを ISO 規格に取り込み、表面性状パラメータの数が増え、定義も複雑化した。

機械部品の寸法公差、はめあい、幾何形状公差および表面性状についての規格は、国際標準化機構技術委員会 ISO/TC 213「製品の幾何特性の仕様及び検証」で審議制定されている。製品仕様設定から実際の検証に至る製造プロセスをもれなく管理する GPS マトリックス⁴⁾を定め、形体のさまざまな幾何特性について、1. 製品の文書指示、2. 公差の定義、3. 実形体の特性・パラメータ定義、4. 公差限界との比較、5. 測定装置、6. 校正というリンク番号に対応する規格を制定している。この一部として触針による曲線式表面性状(粗さ、うねり)の評価方法に関する、以下の ISO/JISがある。

・リンク番号 1

ISO1302: '02 JISB0031: '03 製品の幾何特性仕様(GPS)
—表面性状の図示方法

・リンク番号 2, 3

ISO4287: '97 JISB0601: '01(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

ISO11562: '96 JISB0632: '01(GPS) —表面性状: 輪郭曲線
方式—位相補償フィルタの特性

ISO12085: '96 JISB0631: '00(GPS) —表面性状: 輪郭曲線
方式—モチーフパラメータ

ISO13565-1: '96 JISB0671-1: '02(GPS) —表面性状: 輪
郭曲線方式—プラトー構造表面の特性評価—第 1 部:
フィルタ処理及び測定条件

ISO13565-2: '96 JISB0671-2: '02(GPS) —表面性状: 輪
郭曲線方式—プラトー構造表面の特性評価—第 2 部: 線
形表現の負荷曲線による高さの特性評価

ISO13565-3: '98 JISB0671-3: '02(GPS) —表面性状: 輪
郭曲線方式—プラトー構造表面の特性評価—第 2 部: 正
規確率紙上の負荷曲線による高さの特性評価

・リンク番号 3, 4

ISO4288: '96 JISB0633: '01(GPS) —表面性状: 輪郭曲線
方式—表面性状評価の方式及び手順

・リンク番号 5

ISO3274: '96 JISB0651: '01(GPS) —表面性状: 輪郭曲線
方式—触針式表面粗さ測定機

・リンク番号 6

ISO12179: '00 JISB0670: '02(GPS) —表面性状: 輪郭曲線
方式—触針式表面粗さ測定機の校正

ISO5436-1: '00 JISB0659-1: '02(GPS) —表面性状: 輪郭
曲線方式—測定標準—第 1 部: 標準片

3. 2 位相補償フィルタ Gaussian filter (JISB 0632⁵⁾)

断面曲線から粗さ曲線とうねり曲線を分けるために抵抗とコンデンサからなる 2RC フィルタが用いられてきた。しかしこれはカットオフ値付近で位相ずれを生じ粗さ曲線波形が元の断面曲線から大きく変わってしまう可能性がある。これ

図 1 位相補償フィルタの正規分布重み関数

を解決するために位相補償フィルタが採用された(図 1)。

1) 低域ろ波器の場合、正規分布曲線 $s(x)$ を重み関数として断面曲線 $p(x)$ に畳み込み積分し、 $w(x)$ を求める。

$$s(x) = \frac{1}{\alpha \lambda_c} e^{-\pi \left(\frac{x}{\alpha \lambda_c}\right)^2}$$

ここで、 x : 重み関数の中心からの距離(mm)

λ_c : 輪郭曲線フィルタのカットオフ値(mm)

$$\alpha = \sqrt{\frac{\ln 2}{\pi}} = 0.4697$$

長さの世界で畳み込みにより表される関数は空間周波数の世界では積となる。 $p(x)$, $s(x)$ のフーリエ変換をそれぞれ $P(\omega)$, $S(\omega)$ とすると、 $W(x)$ のフーリエ変換 $W(\omega) = P(\omega) \times S(\omega)$ である。そこで空間周波数特性が $S(\omega)$ と規定されたフィルタは、次の式で示す長さ軸での重み関数 $s(x)$ の畳み込み積分により表現できる。

$$w(\tau) = \int_{-\infty}^{\infty} p(x) s(\tau - x) dx$$

この結果得られた曲線 $w(x)$ は、平滑化され、短波長成分が除去された曲線である。ここで波長 λ がカットオフ値 λ_c の時に振幅伝達率は 50% であり、曲線間に位相ずれは生じない。

2) 高域ろ波器については、断面曲線 $P(x)$ から、1) の平滑化曲線 $W(x)$ を差し引くと、粗さ曲線 $R(x)$ が得られる。すなわち、 $P(x) = W(x) + R(x)$

同様に $\lambda = \lambda_c$ の時振幅伝達率 50% で曲線間の位相ずれは無い。

3. 3 λ_s フィルタ (JISB0651⁶⁾)

粗さ測定で、輪郭の谷底曲率半径が触針先端半径より小さい場合は触針先端が谷底まで到達しないため、輪郭形状の高さが小さくなり、一種のフィルタ効果がある。

これに対し触針によるフィルタ効果の影響よりも効果の大きい低域フィルタにより触針先端半径による波形歪みを少なくするものが λ_s フィルタである。位相補償低域フィルタを用い、その短波長カットオフ値は触針先端半径により、次の数値から選択する。

先端半径 $2\mu\text{m}$ のとき、 $\lambda_s = 0.25, 0.8$ または $2.5\mu\text{m}$

$5\mu\text{m}$ のとき、 $\lambda_s = 2.5, 8$ または $25\mu\text{m}$

これにより粗さ曲線 R は長波長カットオフ値 λ_c と短波長カットオフ値 λ_s に挟まれた伝達帯域のバンドパスフィルタを通ったものとなる。同様に、うねり曲線 W は高域カットオフ値 λ_c と、低域カットオフ値 λ_f に挟まれた波長帯域となる。

3. 4 二次元評価パラメータ

波長領域で区分する輪郭曲線すなわち、断面曲線 P ・粗

さ曲線 R ・うねり曲線 W のそれぞれについて各種表面性状パラメータが規定され、この曲線の記号をパラメータ記号の最初に書く。JIS B 0601: '01⁷⁾ のパラメータを以下列挙する。

1) 高さ方向のパラメータ (山および谷)

- ・輪郭曲線の最大山高さ Pp, Rp, Wp
- ・輪郭曲線の最大谷深さ Pv, Rv, Wv
- ・輪郭曲線の最大高さ Pz, Rz, Wz
- ・輪郭曲線要素の平均高さ Pc, Rc, Wc
- ・輪郭曲線の最大断面高さ Pt, Rt, Wt

2) 高さ方向のパラメータ (高さ方向の平均)

- ・輪郭曲線の算術平均高さ Pa, Ra, Wa
- ・輪郭曲線の二乗平均平方根高さ Pq, Rq, Wq
- ・輪郭曲線のスキューネス Psk, Rsk, Wsk
- ・輪郭曲線のクルトシス Pku, Rku, Wku

3) 横方向のパラメータ

- ・輪郭曲線要素の平均長さ PSm, RSm, WSm

4) 複合パラメータ

- ・輪郭曲線の二乗平均平方根傾斜 $P\Delta q, R\Delta q, W\Delta q$

5) 負荷曲線および確率密度関数に関するパラメータ

- ・輪郭曲線の負荷長さ率 $Pmr(c), Rmr(c), Wmr(c)$

- ・輪郭曲線の切断レベル差 $P\delta c, R\delta c, W\delta c$

- ・輪郭曲線の相対負荷長さ率 Pmr, Rmr, Wmr

3. 5 粗さの評価方法 JISB0633⁸⁾

測定長さ範囲設定と評価手順は、JIS B0601-'82 に対して大きく変更された。その相違を次に示す。

- 1) 評価長さ標準値はカットオフ値の 5 倍。従来は $Rmax$, Rz は 1 基準長さ, Ra はカットオフ値の 3 倍以上。

- 2) 計算する長さ範囲はパラメータにより二種類ある。

- ・基準長さについてのパラメータ：評価長さ内の複数基準長さについて求めたパラメータのすべての値から評価する

- ・曲線と評価長さについてのパラメータおよび断面パラメータ：評価長さ全体を一つの曲線として評価する

- 3) 粗さの大きさによるカットオフ値 (= 基準長さ) 選定法が、JIS 独自方式から周期性判定を含む ISO4288 の表に変更⁹⁾。

4. 触針式測定機

4. 1 触針式測定機の構成と原理

触針式測定機の構成を図 3 に示す。検出器は、ダイヤモンドなどの触針と差動変圧器などの変位電気変換器とをピボッ

図 2 表面粗さ，表面うねりの領域

図 3 触針式測定機の構成

ト支点の周りの梘子で結合したもので、触針の上下変位を電気信号として解析装置へ送る。X 軸駆動装置は、この検出器を対象面に平行に基準案内に沿って駆動し、表面形状を示す輪郭曲線の信号を得る。解析装置は信号を増幅して量子化し、X 軸方向の一定間隔毎に離散化した XZ デジタル信号列(測定断面曲線)を得る。三次元表面評価の場合は、さらに Y 方向に等間隔ずつ送り、測定断面曲線群を得る。コンピュータは、空間点列データから、デジタルフィルタにより粗さ曲線・うねり曲線などの対象となる空間波長範囲の成分を抽出し、表面性状の各種解析を行う。

原理は単純であるが、各種計測原理の中で最も広い範囲を計測することが可能であり、構成要素の精度を高めることにより、範囲対分解能比が大きく、測定データの精度が高く、測定結果に世界的な互換性があることが特徴である。

4. 2 触針式測定機の問題点

触針式測定機は、触針に起因する問題を抱えている。触針先端半径が大きいと、前述のとおり、凹部へ入り込めない。逆に先端半径が小さいと、測定力によって、触針先端が摩耗したり、対象面に傷がついたりする。この理由から、触針式では先端半径は $2\mu\text{m}$ や $5\mu\text{m}$ が、測定力は 0.75mN が用いられる。AFM の場合は、等価先端半径は 10nm 程度、測定力は数 nN 程度と推定される。また、触針でこの慣性モーメントにより、高速での測定には追従性の限界がある。その他、触針と対象面の相対振動は直接表面形状データに重ね合わされるので、測定系の剛性は特に高いことが要求される。

4. 3 触針式測定機の例

触針式測定機は、表面性状検査の目的で広く産業界で使用されている。その一例として図 4 のラインサイドで大型部品の全自動表面性状測定機では、以下の技術を採用した。

1) リニアモータ駆動部(X 軸)

触針先端を駆動部から大きく突き出すことが必要な大型部品測定においては、低振動であるリニアモータ駆動部の効果が発揮される。

2) XY 軸一体型駆動部

X 軸駆動部内に Y 軸駆動部を備えており、対象物の高さに関わらず高倍率での三次元表面性状測定が可能である。

図 4 全自動表面性状測定機 Surfcom C5

3) 全自動測定機能

一度実行した内容を記憶させることができ(ロギング機能)、その内容をコピーや編集するだけで測定・データ保存、印刷までの操作を全自動で行うパートプログラムが作成される。

4) 広範囲測定機能

高分解能かつ広範囲を有する検出器により、1 回の測定で表面粗さ解析と輪郭形状解析を行う装置もある。広範囲化の手法としてレーザ干渉計や、広範囲差動変圧器が用いられる。触針式では、通常梘子機構が用いられ触針は円弧運動する。触針の接触点は、この円弧運動と針先端形状が測定対象面の傾斜角度にどう接触するかで変わる。これらの形状誤差・運動誤差と、変位電気変換器の直線性誤差を分離して補正を行うことにより、広範囲の変位でも高精度を実現している。

5) 触針先端形状補正機能

触針式で測定される輪郭曲線は、円に近い形状の触針先端の中心の軌跡である。そこでこの輪郭曲線の個々の点列に、実際の接触点への法線ベクトルを与えて、実際の接触点の座標を推定することができる。これを輪郭形状測定プログラムの中で実施して触針による誤差を小さくしている(図 5)。

5. 表面形状測定規格の審議動向

5. 1 フィルタの高度化

位相補償フィルタは、ISO/TC213 の標準フィルタとなっているが、以下の問題点がある。

(a) 形体の両端部分で、フィルタ効果が消失する。

(b) 顕著な突出点(または傷)がある場合、または山側は平滑だが、谷側には深い谷が点在している、すなわち振幅の確率密度関数の分布に顕著な偏りがある場合などには、深い谷の両側が山側に突出し、突出点の両側が谷側に突出するような波形歪みがある。

(c) 二面の接触問題では、頂点のみが接触する。この状態を評価したい。

これらの問題点を克服すべく、ISO/TC213 では次世代の高度な表面性状評価に向けて次のような各種フィルタが ISO 16610 シリーズとして提案されている。

1) スプラインフィルタ(Spline filter)

断面曲線 zk の各点データからその「平均線 $w(x_k)$ 」までの偏差の二乗の積分値と、「平均線」の曲がりエネルギー(二次微分値)の積分値の総和 I が最小となるような「平均線」を算出する過程を、スプラインフィルタと呼ぶ。

図 5 触針先端半径・形状補正演算

図6 ロバストスプラインフィルタの効果

図7 モルフォロジカルフィルタ

$$I = P \sum_{k=1}^n \{z_k - w(x_k)\}^2 + \int \left\{ \frac{d^2 w(x)}{dx^2} \right\}^2 dx$$

これを行列でまとめた最終のフィルタ式は

$$(I + \alpha^4 Q)w = z$$

ここで、 I : $n \times n$ 単位行列 Q : $n \times n$ 係数行列

z : 入力データ値の列ベクトル $z = (z_1, z_2, z_3, \dots, z_n)^T$

w : 出力データ値の列ベクトル $w = (w_1, w_2, w_3, \dots, w_n)^T$

$$\alpha = \frac{1}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi \Delta x}{\lambda_c}\right)}$$

Δx …サンプリング間隔 λ_c …カットオフ波長

平均線の曲がりエネルギーと残差平方和の両方を最小とするような平均線であるから、断面曲線の突出点や両端点による影響は最小限に抑えられる。

ISO/TC213 で提案されているのは、このスプラインフィルタを、三次のカーディナルスプラインを用いて一般化したものである。三次のカーディナルスプラインでは、スプラインのたわみやすさをテンションパラメータ β ($0 \leq \beta \leq 1$) で定義し、それによる最終フィルタ式は次の通り。

$$[I + \beta \alpha^2 P + (1 - \beta) \alpha^4 Q] w = z$$

ここで P : $n \times n$ 係数行列

但し、実際は前述の $\beta = 0$ のときに最も特性が良くなる。

問題点(a)と(b)はこのフィルタにより、ある程度改善される。

2) スプラインウェーブレットフィルタ (Spline Wavelet filter)

逆スカラー関数がBスプラインであるような対称ウェーブ

レットをスプラインウェーブレットといい、これによるウェーブレット変換を用いて、断面曲線に平滑フィルタを畳み込みすると低域成分が得られ、差分フィルタを畳み込みすると高域成分が得られる。この技術により波長成分を多重分解するフィルタである。

3) ロバストスプラインフィルタ (Robust Spline filter)

(b)の影響を最小限とするのが、ロバストスプラインフィルタ(図6)である。基本的考え方は、スプラインフィルタと同様であるが、スプラインのエネルギーを最小にするという付帯条件の下で、断面曲線データとの残差の絶対値の総和(L_1 norm)を最小にする $w(x_k)$ を求める方法である。

$$Qw = 8 \alpha^4 \operatorname{sgn}(z - w)$$

ここで Q : $n \times n$ 係数行列

z : 入力データ値の列ベクトル $Z = (Z_1, Z_2, Z_3, \dots, Z_n)^T$

w : 出力データ値の列ベクトル

$$W = (W_1, W_2, W_3, \dots, W_n)^T$$

$$\alpha = \sin \frac{\pi \Delta x}{\lambda_c}$$

4) モルフォロジカルフィルタ (Morphological filter)

(c)に対応するのがモルフォロジカルフィルタ(図7)で、これは従来のモチーフ法を発展させたものである。

$A \oplus B$ = 膨張 Dilation filter (Opening filter) 転がり円うねり

$A \ominus B$ = 縮退 Erosion filter (Closing filter) 包絡線フィルタ

図形要素 B として、円板と水平線分の二種類がある。

包絡線方式は、座標測定機や輪郭形状測定機で、円形または平面端のプロープを用いて測定した断面曲線のプロープ先

端形状を補正した曲線に相当する。

ある形体のデータムを算出する場合、形体に含まれる凹部はデータムから除外する。この包絡線方式フィルタをデータムに適用するとしたデータムの ISO 規格草案が投票に掛けられたが結局否決され、再見直中である。

5) カットオフ値の名称変更

各種新フィルタの導入により、従来のカットオフ値の概念には収まらなくなったため、これを Nesting index という用語に変更することが提案されている。

6) フィルタの選択と図示方法

現在はガウシアンフィルタに一本化されているが、今後はこれらのフィルタを指定により使用することになる。今後のデフォルトとしてはスプラインフィルタが本命と目されている。図示方法としては、ISO 1302: '02 ですでに規定されている通り、パラメータ記号の前の括弧内にフィルタ種別記号を入れる方法が取られると思われる。

5. 2 三次元評価と各種測定方法の規格化

表面の機能と表面性状の関係を考察する場合、従来の表面から部分的に抜き取った二次元輪郭曲線よりも、三次元表面性状で評価する方が実際の物理作用をより正確に評価ができる。この観点から、ISO/TC 213 では三次元評価の規格検討に入った。最終的に ISO25178 シリーズとして制定予定である。以下、草案から関連する分冊規格毎の要点を説明する。

1) 面性状—第 2 部 用語・定義と表面性状パラメータ

測定は、SEM や AFM と同様に、球状の触針先端により等間隔 n 個の点列からなる測定断面曲線を平行に n 本走査した行列データとして抽出される。二次元での λ_s フィルタと同様に、この行列データに面領域の S-filter を適用して、触針先端に起因する短波長歪み成分を除去し一次表面 Primary surface を得る。この一次表面から、それに当てはめた公称形状面を差し引く。この操作を F-operator とする。

さらに、この一次表面に面領域の L-filter (デフォルトはガウシアンフィルタ) を適用して、長波長面成分を除去する。

2) 面性状—第 6 部：表面性状測定方法の分類

市場にある測定機を次のように分類する。

- ・輪郭線方式：触針式、位相シフト干渉式 など
- ・面解析方式：触針、位相シフト干渉、分光、SEM、AFM
- ・面積分方式：散乱光(全積分 TIS、角度分解)、平面静電容量式、流体式 など

3) 面性状—第 11 部：触針式測定機の公称特性

市場で多数派である梃子揺動式触針法を基本に、測定機の構成と計測特性について規定している。

4) 面性状—第 13 部：非接触(分光式プローブ)測定機の公称特性

最近市場に使われてきた、焦点位置が光波長により変わる光学系による共焦点式により、表面の高さにより変わる検出光波長を分光器で計測する方式についての計測特性について規定している。

5) 面性状—第 15 部：非接触(位相シフト干渉式)測定機の公称特性

フィゾー干渉計などの位相シフト干渉原理により、面領域の表面性状を一度に採取する測定機の公称特性について規定するための審議に入ったところである。

6. おわりに

ここでは表面形状を測定する方法として、マクロな評価では広く用いられている触針式と、その規格について概説した。実際の表面形状の評価においては、用いる検出原理と測定条件によって、さまざまな結果が得られることになる。測定結果の意味するところを、測定原理と実際の条件から判断することが、測定評価において最も難しいことではないかと思われる。本稿がいくらかなりとも客観的な判断の一助となれば幸いである。

(2006-6-26 受理)

文 献

- 1) 稲, 佐藤; 光 VS. 非光, 立体形状計測, '99 光計測シンポジウム (光学測定器工業会)
- 2) 佐藤公隆; 化学教育, 30, 41 (1982)
- 3) JISB0031: '03 GPS-表面性状の図示方法 (日本規格協会)
- 4) TRB0007: '98 (ISO/TR14683: '95) (GPS)—マスタープラン
- 5) JISB0632: '01 GPS-表面性状：輪郭曲線方式—位相保証フィルタの特性 (日本規格協会)
- 6) JISB0651: '01 GPS-表面性状：輪郭曲線方式—触針式表面粗さ測定機特性 (日本規格協会)
- 7) JISB0601: '01 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 (日本規格協会)
- 8) JIS B0633: '01 GPS-表面性状：輪郭曲線方式—表面性状評価の方式及び手順 (日本規格協会)
- 9) 荒井; 表面性状のパラメータ, 設計工学, 39, 4 (2004)